ГЕОГРАФИЯ
И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии

ГЕОГРАФИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Коллективная монография

Под редакцией А.А. Соловьева

ИД «Энергия»

Москва – 2019

УДК 911.3
ББК 65.04
ISBN 978-598908-481-4

Печатается по решению
Ученого совета географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова
Published by the decision
of the Academic Council of the Faculty of Geography
Lomonosov Moscow State University

Рецензенты:

член-корр. РАН, доктор географических наук, профессор К.Н. Дьяконов,
доктор технических наук, профессор В.В.Бушуев

География и рациональное использование возобновляемых источников энергии / Под редакцией А.А. Соловьева. Коллективная монография. – М.: ИД «Энергия», 2019. – 288 с. DOI:

Коллектив авторов:

Алексеев В.В., Андреенко Т.И., Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Залиханов А.М., Киселева С.В., Калинина О.Ю., Нефедова Л.В., Нечаев А.М., Рафикова Ю.Ю., Сапожников Ф.В., Синюгин О.А., Соловьев А.А., Соловьев Д.А., Чекарев К.В., Чернова Н.И., Шакун В.П.

Geography and rational use of renewable energy sources / Edited by A.A. Solovyev. Collective monograph. – M .: Publishing House "Energia", 2019. – 288 p. DOI:

Collective of authors:

Alekseev V.V., Andreenko T.I., Berezkin M.Yu., Degtyarev K.S., Zalikhanov A.M., Kiseleva S.V., Kalinina O.Yu., Nefedova L.V., Nechayev A.M., Rafikova Yu.Yu., Sapozhnikov F.V., Sinyugin O.A., Solovyev A.A., Solovyev D.A., Chekarev K.V., Chernova N.I., Shakun V.P.

Предлагаемая вниманию монография – результат труда сотрудников научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета Московского университета, отмечающей в 2018 г. 30-летний юбилей. Показаны этапы формирования лаборатории, ее научные достижения. Рассмотрены тенденции и развитие технологических, географических, социально-экономических, природопользовательских направлений фундаментальных и прикладных работ в области освоения возобновляемых источников энергии. Выполнены исследования по географии возобновляемой энергетики мира, позволяющие говорить о том, что возобновляемая энергетика с новыми технологиями претендует на серьезную роль в будущей мировой энергетике.

Издание предназначено для широкой аудитории специалистов в области возобновляемой энергетики, экономической географии, рационального природопользования, преподавателей и научных сотрудников вузов, студентов и аспирантов.

ISBN 978-598908-481-4
© Коллектив авторов, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ ... *5*

РАЗДЕЛ 1. ПРОБЛЕМЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Цели, задачи, перспективы использования солнечной энергии (В.В.АЛЕКСЕЕВ) …*7*

Экологические циклы и биоконверсия солнечной энергии (В.В.АЛЕКСЕЕВ) … *17*

Энергетический базис природы и общества и естественная налоговая политика (В.В.АЛЕКСЕЕВ) … *23*

Методы оценки энергоотдачи на основе межотраслевого баланса (В.В.АЛЕКСЕЕВ, О.А.СИНЮГИН) … *33*

Энергетический анализ воздействия на окружающую среду в топливно-энергетическом секторе (В.В.АЛЕКСЕЕВ, О.А.СИНЮГИН) … *43*

Этапы становления исследований возобновляемых источников энергии в Московском университете (А.А.СОЛОВЬЕВ) … *54*

В.В.Алексеев – как основатель научной школы возобновляемых источников энергии (А.А.СОЛОВЬЕВ) ... *65*

Список научных трудов В.В.Алексеева … *70*

РАЗДЕЛ 2. РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ РОССИИ

Оценка ресурсного потенциала возобновляемой энергетики: задачи, методы, результаты (С.В.КИСЕЛЕВА, Ю.Ю.РАФИКОВА) … *77*

Проблема мониторинга функционирования солнечных энергетических систем в России (С.В.КИСЕЛЕВА, В.П.ШАКУН) … *94*

Анализ рисков освоения возобновляемых источников энергии в России (Л.В.НЕФЕДОВА) … *100*

Районирование территорий по потенциалу возобновляемых энергоресурсов (Л.В.НЕФЕДОВА) … *113*

План ГОЭЛРО и возобновляемые источники энергии (К.С.ДЕГТЯРЕВ, А.М.ЗАЛИХАНОВ, А.А.СОЛОВЬЕВ) … *126*

РАЗДЕЛ 3. ЭКОНОМИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Географические особенности развития возобновляемой энергетики (К.С.ДЕГТЯРЕВ, М.Ю.БЕРЁЗКИН) ... *139*

География инноваций в сфере традиционной и возобновляемой энергетик мира (М.Ю.БЕРЁЗКИН, О.А.СИНЮГИН.) … *146*

Типы стран по уровню инвестиций в возобновляемую энергетику (М.Ю.БЕРЁЗКИН, О.А.СИНЮГИН) … *154*

Экономика возобновляемой энергетики (К.С.ДЕГТЯРЕВ) ... *162*

Использования возобновляемых источников энергии в странах Африки для устойчивого развития и снижения эмиссии парниковых газов (Л.В.НЕФЕДОВА)… *176*

РАЗДЕЛ 4. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ

Производство биотоплива из микроводорослей (Н.И.ЧЕРНОВА, С.В.КИСЕЛЕВА) … *189*

Биотопливо из водорослей: технологии выращивания, способы экстракции липидов и конверсия биомассы (Н.И.ЧЕРНОВА, С.В.КИСЕЛЕВА) … *202*

География альгологических исследований (О.Ю.КАЛИНИНА, Ф.В.САПОЖНИКОВ) … *210*

Комплексный анализ распределения ресурсов бионергетики для территории Волгоградской области (Т.И. АНДРЕЕНКО, С.В.КИСЕЛЕВА, Ю.Ю.РАФИКОВА) … *220*

К оценке энергетического потенциала биомассы России. Отходы сельскохозяйственного растениеводства (Т.И.АНДРЕЕНКО, С.В.КИСЕЛЕВА, В.П.ШАКУН) … *230*

РАЗДЕЛ 5. ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА

Возобновляемые источники воды в атмосфере (В.В.АЛЕКСЕЕВ, М.Ю.БЕРЁЗКИН) … *245*

Экспериментальные исследования конденсации воды в естественных условиях (К.В.ЧЕКАРЕВ, А.М.ЗАЛИХАНОВ) … *253*

Исследования в области освоения источников низкопотенциального тепла (К.В.ЧЕКАРЕВ) … *258*

Ураган и торнадо: о механизме работы природных аккумуляторов энергии (А.М.НЕЧАЕВ) ... *266*

Интенсификация низкопотенциального тепла в электростанциях низкоширотного размещения (А.А.СОЛОВЬЕВ, Д.А.СОЛОВЬЕВ) … *274*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ... *284*

ОБ АВТОРАХ ... *286*

30-летию лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета Московского университета посвящается

ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография посвящена 30-летнему юбилею научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ. Возникло естественное желание эту относительно небольшую дату работы университетской лаборатории отметить представлением достигнутых научных результатов. История лаборатории отсчитывается с момента принятия 8 июля 1988 г. официального решения об ее организации на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова. Первоначально – проблемная лаборатория на кафедре рационального природопользования. В 1992 г. преобразована в самостоятельное, отдельное подразделение – со статусом научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии.

Фактически лаборатория стала первым в стране вузовским научным подразделением, специализирующимся в области постановки и решения междисциплинарных научных проблем возобновляемой энергетики и энерговедения. География возобновляемых энергоресурсов, инновационные технологии приема и преобразования энергии возобновляемых источников, экономические и хозяйственные возможности их рационального использования, приоритеты экологического и социального обеспечения общества продукцией зеленой энергетики – такой круг тем составлял предмет исследований лаборатории, как в фундаментальном, так и прикладном направлении.

Нашедший отражение в коллективной монографии, вклад лаборатории в решение научных задач, связанных с исследованиями источников энергии, формирующихся с возобновлением в природных процессах, позволяет представить основные этапы и результаты творческой деятельности университетской научной школы возобновляемых источников энергии.

Авторы книги – сотрудники лаборатории и ведущие специалисты некоторых дружественных нам образовательных организаций и научных учреждений. Цель монографии направлена на решение следующих задач: обобщить опыт становления отечественных междисциплинарных эколого-географических исследований возобновляемых источников энергии и формирования методологических подходов и традиций лаборатории при проведении научных изысканий; обсудить результаты современных исследований с их приоритетами в ближайшей перспективе и динамике развития пространственно-временных процессов в энергетике.

В первом разделе книги рассматриваются проблемы возобновляемой энергетики и общеметодологические вопросы, связанные с программой их решения. Они касаются как общей постановки задачи выявления и атрибуции процессов

возникновения и преобразования энергии в географической оболочке физических и биологических систем, так и обсуждения ряда важных подходов к методам решения. В том числе натурных наблюдений, математического и экспериментального моделирования, а также экономико-географических подходов к оценкам межотраслевого энергетического баланса и эффективности генерации энергии различными энергоносителями. Основные программные для развития научных исследований возобновляемых источников энергии работы, представленные в этой части монографии принадлежат основателю лаборатории – профессору Вячеславу Викторовичу Алексееву. Биография, научная, педагогическая деятельность в Московском университете и библиография его трудов включена в содержание этого раздела.

Основу следующих разделов монографии составляет анализ нескольких взаимосвязанных тем. Во втором разделе результаты исследований, связанных с практической реализацией диверсификации энергоносителей. Что в свою очередь повлекло за собой необходимость представления разработанных методов прецизионного определение энергетических потенциалов ресурсов возобновляемых источников энергии и их рационального использования на конкретные территории.

Следующий, третий раздел посвящен результатам исследований в области географии инновации, инвестиций и экономики возобновляемой энергетики, обсуждены вопросы устойчивого развития мировой энергетики.

Четвертый раздел включает в себя результаты исследований, продолжающих трансформацию первых работ лаборатории по культивированию и использованию биомассы микроводорослей используемой при производстве биологических видов топлива. Излагаются результаты поиска эффективных штаммов микроводорослей для аккумуляции солнечной энергии и преобразования накопленной биомассы в биотопливо четвертого поколения. Приводятся результаты географических исследований территориального распределения биоэнергетических отходов.

Наконец в заключительном пятом разделе предпринимается попытка аргументировать значимость практического освоения термогидродинамических механизмов генерации энергии в природных процессах, существующих в интенсивных атмосферных вихрях и гейзерах. Следует обратить внимание на представленные здесь изобретения и разработки с инновационными технологическими решениями по использованию низкопотенциальных источников тепла. В том числе методологические подходы к разработке принципов генерации энергии в парниковых электростанциях, в которых тепловой нагрев приземного слоя приводит к формированию потоков, кинетическая энергия которых преобразуется в электрическую энергию.

В заключении отметим, что нашедшие свое отражение монографии новые знания в области энерговедения можно рассматривать как основу для интеграции различных дисциплин в изучении экологически чистых источников возобновляемой энергии. Это дает основание надеяться, что книга вызовет интерес, не только энергетиков, но и представителей смежных научных направлений, а также преподавателей вузов при подготовке специалистов, изучающих возобновляемые источники энергии.

Авторы выражают благодарность Ю.Ю. Рафиковой и М.Ю. Берёзкину за помощь в наборе, редакторской корректуре и подготовки иллюстративных материалов, вошедших в настоящую книгу.

РАЗДЕЛ 1

ПРОБЛЕМЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ, ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

В.В.АЛЕКСЕЕВ

Около 90% потребляемой в настоящее время энергии получается в результате сжигания угля, нефти и газа, то есть веществ, которые были накоплены в результате биологических процессов за миллионы лет. Эти источники энергии ограничены и при использовании в больших масштабах отрицательно влияют на окружающую среду. Оценки показывают, что все ископаемое топливо может быть израсходовано в течение 110-150 лет [Meadows, 1974]. При сжигании угля, нефти и газа выделяется углекислый газ, который не успевает поглощаться биосферой. Накопление углекислоты в атмосфере к середине следующего столетия может привести вследствие парникового эффекта к повышению температуры поверхности Земли на 4°С. [Будыко, 1980].

Поэтому необходимо найти другие источники, которые обладали бы следующими важнейшими качествами:

- практически не иссякали бы со временем;
- давали бы поток энергии достаточной плотности и мощности, чтобы удовлетворить будущие потребности человечества;
- не оказывали бы вредного воздействия на окружающую среду.

Достаточно хорошо известны источники энергии, отвечающие первому требованию. Это солнечная радиация, ядерная энергия, геотермальное тепло, гидроэнергия, энергия ветра, приливов, морских волн и т.д. Однако, хотя гидроэнергия и является неиссякаемым источником энергии, мощность его недостаточна - почти все реки зарегулированы. В мировом энергетическом балансе гидроэнергия составляет в настоящее время не более 5%, и, по-видимому, это предел. Энергия ветра, приливов и морских волн имеет низкую плотность, и поэтому пока они могут рассматриваться лишь как вспомогательные источники энергии.

Геотермальное тепло из-за плохой теплопроводности земной коры успешно используется только в районах расположения вулканов, например в Исландии. Но таких районов мало, кроме того, геотермальные воды, как правило, сильно минерализованы, и сброс их опасен для окружающей среды. Для использования геотермального тепла в больших масштабах необходимо хорошо изучить структуру недр Земли. Поэтому в настоящее время трудно делать прогнозы о крупномасштабном использовании геотермальной энергии.

Вопрос о воздействии того или иного источника энергии на окружающую среду не является тривиальным. Нам кажется, наиболее последовательно его можно проанализировать, используя концепцию В.И. Вернадского о развитии биосферы [Вернадский, 1977].

«Биосфера, – писал В.И. Вернадский, – является той единственной земной оболочкой, в которую непрерывно проникают космическая энергия, космические излучения и прежде всего лучеиспускание Солнца, поддерживающее динамиче-

ское равновесие, организованность; «биосфера – живое вещество». ...Организованность биосферы – организованность живого вещества - должны рассматриваться как равновесия, подвижные, все время колеблющиеся в историческом и геологическом времени около точно выражаемого среднего. Смешения или колебания этого среднего непрерывно проявляются не в историческом, а в геологическом времени» [Вернадский,1977, с. 15].

«Наиболее изменчивой частью биосферы является живое вещество, в котором наблюдается "пластичный эволюционный процесс".

Эволюционный процесс живых веществ непрерывно в течение всего геологического времени охватывает всю биосферу и различным образом, менее резко, но сказывается на ее косных природных телах.

Уже по одному этому мы можем и должны говорить об эволюционном процессе самой биосферы в целом. ...Эволюция видов переходит в эволюцию биосферы» [Вернадский, 1977, с. 16].

Организованность биосферы, или, по крайней мере, ее живого вещества, имеет тенденцию к непрерывному возрастанию. Это, в частности, проявляется в том, что у части обитателей нашей планеты появляется «все более и более совершенный, чем тот, который существовал на ней раньше, центральный нервный аппарат – мозг».

Этот процесс, названный энцефалозом, привел в конечном итоге к появлению Homo sappiens, человеческого общества, а вместе с ним - к возникновению науки. Можно сказать, что научная мысль есть продукт эволюции организованности биосферы.

Концепция В.И. Вернадского очень хорошо коррелирует с основной концепцией диалектического материализма, который рассматривает историю как единый процесс.

Все, что говорилось выше, является качественным описанием эволюционного процесса. А нельзя ли связать организованность с какой-либо физической величиной? В.И. Вернадский отвечает на этот вопрос следующим образом: «Природные процессы живого вещества в их отражении в биосфере увеличивают ее свободную энергию (т.е. уменьшают ее энтропию). В результате этого процесса свободная энергия биосферы увеличивается, выражая этим основное значение живого вещества в структуре биосферы – и тем самым планеты» [Вернадский, 1980, с. 74].

Энтропия характеризует степень упорядоченности молекулярного движения. Согласно второму закону термодинамики в замкнутой системе энтропия с течением времени возрастает – происходит переход к термодинамическому равновесию. Поэтому в классической термодинамике эволюция понимается как возрастание энтропии, эквивалентное непрерывной дезорганизации или разрушению изначально заданной структуры. Так, тепло перетекает от нагретого тела к холодному, в результате чего образуется система с телами одинаковой температуры. При смешивании двух жидкостей возникает диффузия с прогрессирующим "забыванием" системой ее начальных условий. Все это типичные примеры увеличения энтропии. То есть в закрытой системе, согласно второму закону термодинамики

$$dS / dt \geq 0 \qquad (1)$$

где S – энтропия системы; t – время.

Организованность – есть величина, обратная энтропии. С ростом энтропии организованность уменьшается и, наоборот, с убыванием – увеличивается.

Для биосферы в целом, организованность которой возрастает со временем, имеем

$$dS / dt < 0 \qquad (2)$$

Это выражение не противоречит второму закону термодинамики, так как суммарное изменение энтропии dS открытой системы (согласно основному уравнению неравновесной термодинамики) складывается из двух слагаемых [Гленсдорф, Пригожин ,1973]:

$$dS = d_eS + d_iS. \qquad (3)$$

Первый член уравнения обозначает изменение энтропии, обусловленное влиянием внешней среды (для биосферы воздействием потока солнечного излучения). Это изменение в принципе может быть как положительным, так и отрицательным. Для потока солнечного излучения эта величина отрицательна, то есть $d_eS < 0$.

Второй член представляет собой изменение энтропии вследствие внутренних необратимых процессов. Согласно второму закону термодинамики оно должно быть положительным $d_iS \geq 0$.

Человек в процессе хозяйственной деятельности создает разнообразные структуры, например, механизмы, здания, то есть увеличивает организованность системы, называемой мировым хозяйством. Очевидно, что в соответствии со вторым законом термодинамики для их образования необходим отрицательный поток энтропии или приток свободной энергии. В биосферу эта энергия приносится солнечным излучением, а человек необходимую энергию получает в основном за счет сжигания органического топлива, то есть разрушая природные структуры, аккумулировавшие энергию Солнца.

Выражение, характеризующее баланс энтропии для мирового хозяйства, может быть записано следующим образом:

$$d_x S = d_{ex} S + d_{bx} S + d_{ix} S \qquad (4)$$

где $d_{ex} S$ – изменение энтропии благодаря поступлению солнечной радиации (эта величина при современной структуре энергетики имеет значение лишь для сельского хозяйства, для промышленного производства она практически равна нулю);

$d_{bx} S$ – отрицательный поток из биосферы за счет разрушения ее структуры;

$d_{ix} S$ – приращение энтропии за счет внутренних необратимых процессов в системе «мировое хозяйство» (согласно второму закону термодинамики $d_{ix} S \geq 0$).

Уравнение баланса энтропии для биосферы запишется теперь в отличие от (3) следующим образом:

$$d_b S = d_{eb} S + d_{bx} S + d_{ib} S \qquad (5)$$

где $d_{eb} S$ – отрицательный поток энтропии от Солнца ($d_{eb} S < 0$);

$d_{bx} S$ – положительный поток энтропии из мирового хозяйства в биосферу ($d_{bx} S > 0$);

$d_{ib} S$ – приращение энтропии за счет внутренних необратимых процессов в биосфере (согласно второму закону термодинамики $d_{ib} S \geq 0$).

Реально увеличение энтропии $d_{bx}S$ проявляется в загрязнении окружающей среды в связи с рассеянием химических элементов, повышением концентрации

серного и сернистого газов в воздухе, цветных металлов в воде и т.д., а также в увеличении производства тепла, приводящего пока к локальному изменению климата.

Таким образом, промышленное производство в его современном виде, как следует из второго закона термодинамики, не может не наносить ущерба биосфере. Это касается и сельскохозяйственного производства, так как энергия, используемая для изготовления удобрений и сельскохозяйственной техники, берется из того же источника, что и в промышленности.

В течение миллиардов лет на Земле происходила вначале химическая [Кальвин, 1971], а затем биологическая эволюция [Опарин, 1963, 1977], то есть шло увеличение организованности или уменьшение энтропии в верхней оболочке Земли (рис. 1). В настоящее время в связи с интенсивным воздействием хозяйственной деятельности человека на биосферу энтропия верхней оболочки Земли стала возрастать.

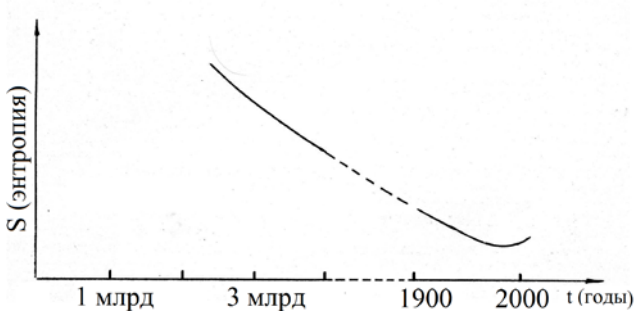


Рис. 1. Изменение энтропии верхней оболочки Земли

Совершенно очевидно, что такая тенденция не может удовлетворить человечество. Источники энергии должны обеспечивать уменьшение энтропии верхней оболочки Земли (системы: биосфера + мировое хозяйство), то есть возрастание ее организованности. Этого условия ископаемое органическое топливо не обеспечивает. Причем неприятности начинаются значительно раньше, чем будут израсходованы все запасы: при полном их сжигании концентрация углекислого газа в атмосфере возрастет до 3%, а его концентрация 0,5%, уже губительна для человека. Еще раньше начнется катастрофическое изменение климата и т.д.

В настоящее время термодинамика и статистическая физика неравновесных систем развиты недостаточно, чтобы иметь критерии эволюции открытых систем. Однако в данном разделе физики за последние 20 лет получены значительные успехи [Зубарев, 1971; Николис, Пригожин, 1979].

Теперь можно ответить на вопрос о перспективности того или иного источника энергии с точки зрения охраны окружающей среды. Солнечная радиация является перспективным источником. Об этом свидетельствует прогрессивная эволюция биосферы. Ядерная и термоядерная энергетика тоже могут быть перспективны для долговременного использования, если удастся так изолировать соответствующие энергосистемы, чтобы возрастание энтропии внутри этих систем не приводило бы к соответствующему увеличению энтропии в биосфере.

Можно помещать атомные электростанции в районах, где нет населения, например на необитаемых островах, и превращать генерируемую ими энергию в химическую (разлагать воду, а водород в жидком виде использовать как топливо) [Капица, 1977]. Необходимо также решить задачу изоляции радиоактивных шлаков.Известно, что существует пропорциональность между валовым продуктом, приходящимся на человека, и энергоресурсами страны. Статистика показывает, что в развитых странах на одного человека приходится примерно 10 т у.т./год, однако большое количество населения потребляет 0,2 т у.т./год на одного человека. В среднем по земному шару добывается на одного человека 2 т у.т./год. В 1975 г. было добыто 8700 млн т у.т. (1 кг у.т. при сжигании дает 7000 ккал тепла (калорийность 1 кг угля – 7000 ккал, нефти – 12 000 ккал), что составляет более 0,01% энергии, падающей на Землю от Солнца. Если считать, что в будущем количество населения стабилизируется на уровне 10 млрд человек и потребность в энергии на человека будет такова, как в настоящее время в развитых странах, то мировая потребность в энергии возрастет в 10 раз. По-видимому, это - нижняя граница энергопотребностей.

Запасы минерального сырья, необходимого для промышленности, истощаются, что приводит к необходимости использования более бедных руд, требующих на единицу веса больших энергозатрат. Например, много энергии в будущем должно затрачиваться на опреснение воды. Поэтому следует ожидать, что энергопотребности в будущем превысят современное энергопотребление не в 10, а в 100- 200 раз и будут составлять 1-2% от солнечной энергии.

Эта величина находится на пределе допустимого, так как 1% дополнительного тепла к энергии, падающей на Землю от Солнца, приведет к увеличению средней температуры поверхности нашей планеты на 1-2°С. Поэтому повышение КПД электростанций и использования энергии с глобальной точки зрения является антропогенными источниками тепла. Совершенно очевидно, что производство тепла на атомных и термоядерных системах не может быть больше 1-2% солнечной энергии, падающей на Землю, а с учетом КПД преобразователей количество полезной энергии может достигать не более 0,3-0,6% от энергии, приходящей на Землю от Солнца. Теоретически 95% солнечной энергии, падающей на Землю, может быть превращено в полезную работу. Поэтому в принципе солнечное излучение как источник может обеспечить большие потребности в энергии. Однако даже многие энтузиасты солнечной энергетики считают, что длительное время эта энергия будет удовлетворять только относительно небольшие энергетические потребности местного значения. Это объясняется тем, что для эффективного использования энергии ее поток должен обладать достаточной плотностью. Солнечная энергия обладает низкой плотностью (средняя плотность, достигающая поверхности Земли, равна 160 Вт/м^2), и поэтому необходима ее концентрация.

Известно много физических способов концентрации и преобразования солнечной энергии. Например, с помощью зеркал и дальнейшим преобразованием тепловой энергии в механическую и электрическую с помощью парогенераторов или сконцентрированной световой энергии – в электрическую с помощью полупроводниковых преобразователей. Возможно также преобразование солнечного излучения в электроэнергию с помощью термопар, термоионных или магнитогидродинамических и других преобразователей. Пока современные физические преобразователи обеспечивают КПД не более 20%. Но главное не в этом. Трудности

их использования определяются тем, что энергетические затраты на создание и эксплуатацию преобразователей не оправдываются получаемой энергией [Солнечная энергетика, 1979].

В настоящее время ядерная энергетика на расщепляющемся топливе рассматривается как серьезная альтернатива». Все существующие в настоящее время атомные электростанции (АЭС) основаны на делении U^{235} и очень малом (около 1%) попутном использовании U^{238}. Однако изотоп U^{235} составляет всего 0,7% природного урана. Запасы природного урана оцениваются от 2 до 5 млн т. Это значит, что эти ресурсы будут исчерпаны в течение ближайших 20-30 лет и что, таким образом, атомная энергетика в том виде, в каком она была первоначально задумана, не является панацеей, способной избавить человечество от топливной недостаточности [Александров, 1978]. Когда речь идет о практически неисчерпаемых энергоресурсах ядерного горючего, имеется в виду возможность получения вторичного горючего-плутония, который образуется из U^{238} при его бомбардировке быстрыми нейтронами. Реакторы на быстрых нейтронах должны удваивать количество вложенного в них плутония за 5-7 лет (реакторы-размножители позволяют увеличить количество топливных ресурсов по сравнению с запасами угля примерно в 10^5 раз). Широкое развитие атомной энергетики ставит много сложных проблем (например, длительное и безопасное хранение радиоактивных отходов). Но задачи эти разрешимы, хотя и трудны в инженерном смысле [Александров, 1978]. Отметим, что использование термоядерных реакций, о которых в настоящее время идет речь: $d + t \rightarrow {}_4He + n$, позволяет увеличить количество топливных ресурсов по сравнению с запасами угля также примерно в 10^5 раз.

Что в альтернативе можно ожидать от солнечной биоэнергетики? Мы являемся свидетелями использования энергии, накопленной растениями в процессе фотосинтеза. Например, в Бразилии действует программа перевода автотранспорта на этиловый спирт, получаемый из сахарного тростника. На бензоколонках автомашины заправляются смесью бензина и этанола. Программы получения биомассы для целей энергетики начали реализовываться с конца семидесятых годов прошлого столетия в США, Ирландии и других странах [Energy Community, 1978; Science, 1978]. Однако использование биомассы высших растений для целей энергетики ограничено площадью пригодных для культивации земель, которые необходимы также и для сельского хозяйства.

Наряду с использованием высших растений имеются предложения выращивать одноклеточные водоросли для целей энергетики. Например, способ использования микроводорослей для получения концентрированной солнечной энергии [Бринкворт, 1976]. Водоросли выращивают в резервуарах, через которые протекают сточные воды, богатые биогенными элементами, затем водоросли выделяют из суспензии центрифугированием и высушивают. Полученный порошок может быть использован в качестве топлива». Вместо сушки водоросли могут быть подвергнуты разложению бактериями, живущими в бескислородной среде. Этот способ широко применяется при обработке сточных вод. В результате получается горючий газ и богатый нитратами и фосфатами водный раствор. В специальном разделителе раствор концентрируется и может быть использован в качестве удобрения. В приведенном выше примере производство топлива являлось побочным продуктом станции биологической очистки воды. Однако небольшая модификация

позволяет преобразовать систему так, что аккумуляция солнечной энергии будет ее основной функцией.

Рассмотрим схему производства газа. Система, назовем ее биологическим генератором, или для краткости «Биосоляр» (рис. 2), является замкнутой по всем биогенным элементам, кроме С, О и Н. Она является по существу одной из замкнутых экосистем, теория которых достаточно хорошо разработана [Человек и биосфера, 1976; Алексеев, 1976]. Имеются также обширные экспериментальные исследования, которые в основном проводились с целью создания систем жизнеобеспечения космических станций [Проблемы космической биологии, 1975]. Помещение светосборников, которые представляют собой плоские поплавки, выполненные из армированной полиэтиленовой пленки, на поверхности водоема позволяет экономно решать вопросы, связанные с перемешиванием суспензии водорослей. Концентрированный питательный раствор подается внутрь культиватора и там разбавляется водой из водоема до нужной концентрации. Происходит интенсивное перемешивание раствора в культиваторе. Уровень раствора в культиваторе может изменяться от сантиметров до нескольких десятков сантиметров и определяться параметрами волнения и ветра, характерными для данного конкретного водоема.

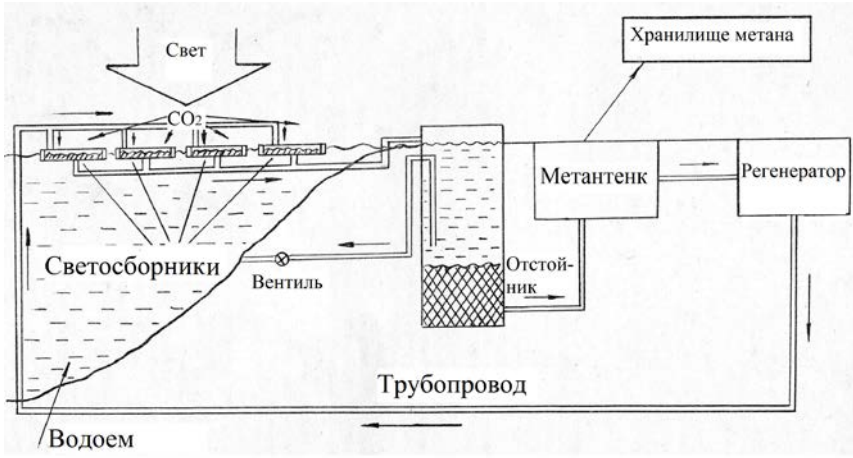


Рис. 2. Схема установки Биосоляр

Большинство опытов по выращиванию водорослей проводилось с целью получения из них пищевых продуктов. Было показано, что отношение энергии, которую можно выделить из высушенных водорослей, к количеству энергии, падающей на резервуары где они выращиваются, приближается к 8%, то есть КПД такой системы имеет величину, близкую к максимальной для фотосинтеза, в лабораторных условиях достигнут КПД, превышающий 20% от фотосинтетически активной падающей радиации [Белягин, 1980]. Конвертирование энергии из водорослей в метан идет с КПД, равным 80%. Поэтому суммарный коэффициент полезного действия системы «Биосоляр» составляет примерно 6%.

Таблица 1. Сводные данные по массовому культивированию микроводорослей

Местоположение	Виды	Площадь, $м^2$	Урожай, $г/м^2$ в сутки	
			максимальный	средний
Кембридж, США, Массачусетс	Chlorella	50	11	2
Токио, Япония	Scenedesmus	148	14	8,6
Дортмунд, Германия	Scenedesmus	320	28	10
Требон, Чехия	Scenedesmus	900	19	12
Файрбо, США, Калифорния	Scenedesmus	1000	35	10
Мехико, Мексика	Spirulina	200000	20	10
Бангкок, Таиланд	Scenedesmus	600	35	15
Бангкок, Таиланд	Spirulina	600	18	15
Тайвань	Chlorella	180000	35	18

Система «Биосоляр» имеет, по крайне мере, несколько преимуществ перед другими солнечными преобразователями, например, перед электростанциями башенного типа, где концентрация энергии достигается с помощью зеркал. Эти системы громоздки, стоимость зеркал и приспособлений к ним составляет 3/4 общей стоимости электростанции. Необходимо дополнительно решать проблему хранения и транспортировки энергии. Отметим, что растения преобразуют как прямую, так к рассеянную радиацию, которая в средних широтах даже при безоблачном небе составляет 25% от прямого солнечного излучения (например, на широте 45^o). Системы с зеркальными концентраторами используют только прямую радиацию. В средних широтах, где общее количество падающей радиации составляет для чистой атмосферы 1900 $кВт·ч/м^2$ в год (южные районы европейской часта России или район Аральского моря) с учетом типичной облачности, в течение года можно получать при указанном выше коэффициент полезного действия с площади в 70 $м^2$ 1 т у.т. То есть с площади Аральского моря можно получить за год 1 млрд т у.т. или 1/9 величины, примерно равной количеству топлива, производимого в СССР.

Согласно многочисленным исследованиям по массовому культивированию водорослей, результаты которых систематизированы в табл. 1 [Goldman, 1979], уже получены результаты, приближающиеся к указанной выше величине (1 т у.т. в год с площади в 70 $м^2$, или 40 $г/м^2$ сухой хлореллы в сутки). Впоследствии в Узбекистане на площади в 300 $м^2$ было получено в среднем 27 $г/м^2$ сухого вещества хлореллы в сутки (максимальные значение составляли 60 $г/м^2$ в сутки) [Муззафаров, 1984]. Большой опыт массового культивирования водорослей накоплен в Биологическом институте Ленинградского государственного университета. В 1962-1965 гг. на широте г. Ленинграда специалистами этого института в течение летних месяцев получены устойчивые урожаи – 10-20 $г/м^2$ в сутки сухого вещества хлореллы с площади примерно в 300 $м^2$ [Верзилин, 1966].Высокой эффективности процессов фотосинтеза, протекающих в микроводорослях, в значительной степени способствуют сравнительное постоянство температурных условий в водной среде и отсутствие у водорослей энергетических затрат на испарение воды, относительно малые расходы на дыхание, обеспеченность питательными элементами, высокие темпы обновления фотосинтетического аппарата клеток, а также

характерная для водорослей адаптационная пластичность [Справочник по водоснабжению и канализации, 1960].

Оценим ориентировочно стоимость получаемого таким образом топлива при крупном производстве. Чтобы произвести 1 млн т у.т. в год, требуется площадь, равная 70 км^2. Стоимость 1 м^2 полиэтиленовой армированной пленки составляет 25 коп. Для преобразования биомассы потребуется около 100 метантенков, емкостью 1000 м^3 и стоимостью 168 тыс. руб. каждый [Яковлев С.В. и др., 1975]. В системе будет циркулировать 1500 т различных биогенных элементов – солей фосфора, калия, азота и т.д. с учетом стоимости арматуры, труб и их монтажа капитальные затраты должны составлять 100-150 млн руб. Считая срок службы системы 10 лет, получаем, что капитальные затраты на 1 т у.т. составляют 10-15 руб., то есть примерно столько же, сколько при добыче нефти .

Так как системы очистки бытовых сточных вод и Биосоляры похожи по конструкции, можно оценить себестоимость 1 т у.т., получаемого из биомассы. То есть мы можем предполагать, что затраты на очистку 1 м^3 воды такие же, как на создание 1 м^3 водяной суспензии биомассы с последующей ее переработкой. Чтобы биогенератор работал с КПД преобразования солнечной энергии, равным 6%, средняя плотность должна быть равна 0,5 кг/м^3 воды. Для станции производительностью 200 тыс. м^3/сутки стоимость очистки и отведения воды составляет 2,2 коп. [Яковлев С.В. и др., 1975]. Отсюда себестоимость 1 т у.т. составит 44 руб. (эта цифра завышена, так как Биосоляр на 1 млн т у.т. эквивалентен по объему обрабатываемой воды 60 станциям, мощностью 200 тыс. м^3/сутки, а при увеличении масштабов производства стоимость единицы продукции, как известно, снижается).

Одним из важнейших показателей является оценка энергоотдачи различных источников энергии (в общем виде энергоотдача системы определяется как отношение количества энергии. выработанной системой за срок службы, к количеству энергии, затраченной на ее создание и эксплуатацию).

В этом отношении довольно подробная информация имеется по АЭС. Регенерация топлива и захоронение радиоактивных отходов обычно не учитываются. Поскольку большая часть добываемых руд имеет низкое качество, представляет интерес рассмотрение данных для руд не только с высоким, но и с низким содержанием урана.

При использовании богатых руд (0,3%) энергоотдача АЭС составляет 13±3, а для бедных руд этот показатель снижается до 6. Для нефти расчет энергоотдачи дает значение, превышающее 20. Для нефтеносного сланца и процесса газификации угля энергоотдача составляет более 15. Для систем с использованием биомассы энергоотдача сопоставима с показателем для тепловых электростанций, работающих на обычном топливе, то есть оказывается равной 20.

Представляет интерес сравнение территорий, используемых для производства топлива с помощью Биосоляра, а также при добыче угля или урана. Для солнечных биопреобразователей при КПД, равном 6%, и среднем потоке солнечной энергии мощностью 240 Вт/м^2 (юг европейской части СССР с учетом характерной облачности) количество произведенной энергии составит 15 МВт/км^2. В то время как площади, использованные при добыче угля, дают до 30 МВт/км^2, то есть оказываются только в 2 раза меньше. То же касается и атомной энергетики. Так как богатые руды образуют лишь небольшую часть залежей урана и поскольку из 1 т руды с концентрацией около 0,01% можно получить то же количество энергии, что и из

1 т угля, то площади, занятые под добычу этих ископаемых, будут примерно одинаковы [Солнечная энергетика, 1979].

При достаточном количестве биогенов скорость фотосинтеза определяется интенсивностью радиации и температурой. При оптимальной интенсивности света скорость фотосинтеза в интервале температур от 7 до 28°С изменяется по закону Аррениуса $v = Ae^{kt}$, где A и k - положительные постоянные; t - температура, °С.

Чтобы оптимально использовать весенний и осенний периоды в средних широтах, целесообразным является создание гибридных систем «АЭС или ТЭС + Биосоляр». При этом сбросного в водоем-охладитель тепла АЭС мощностью 1 млн кВт достаточно для создания оптимальных температур в слое 10-20 см на площади 30 км^2, с которой можно дополнительно получить около 0,5 млн т у.т. в виде газа, что эквивалентно увеличению суммарной мощности станции (с учетом КПД преобразования энергии газа в электроэнергию) примерно на 20% при увеличении общей стоимости станции на 5-7%.

Литература

Александров А.П. Атомная энергетика и научно-технический прогресс. М.: Наука, 1978.
Алексеев В.В. Биофизика сообществ живых организмов // Успехи физических наук. 1976. Т.120. Вып.4. С.648-676.
Алексеев В.В. Динамические модели водных биогеоценозов. в сб. «Человек и биосфера». М.: МГУ. 1976. Вып.1. С.3-137.
Белягин В.Н., Сидько Ф.Я., Тренкеншу А.П. Энергетика фотосинтезирующей культуры микроводорослей. – Новосибнрск: Наука, 1980.
Бринкворт Б.Дж. Солнечная энергия для человека. М.: Мир, 1976.
Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. – Л.: Гидрометиздат, 1980.
Верзилин Н.Н., Пиневич В.В., Михайлов А.А. Массовое культивирование хлореллы в условиях Северо-Запада СССР. – В сб.: Материалы 4-го координационного собрания и научного симпозиума по теме VI.5.5 СЭВ 14-18 III (Краков, июль, 1966). 1966, с. 21-44.
Вернадский В.И. Проблемы биогеохимии. Труда биогеохимической лаборатории. М.: Наука, 1980, т. 16.
Вернадский В.И. Размышления натуралиста. Научная мысль как планетное явление. М.: Наука, 1977.
Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973.
Зубарев Д.Н. Неравновесная статистическая термодинамика. М.: Наука, 1971.
Кальвин М. Химическая эволюция. М.: Мир, 1971.
Капица П.Л. Глобальные проблемы и энергия – Успехи физических наук /АН СССР, 1977, т. 122, вып. 2, . 327-337.
Мировая энергетика. Прогноз развития до 2020 года. М.: Энергия, 1980.
Муззафаров А.М., Таубаев Т.Т. Культивирование и применение микроводорослей. – Ташкент: Фан, 1984. 185 с.
Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. - М.: Мир, 1979.
Опарин А.И. Жизнь, ее природа, происхождение и развитие. М.: Наука, 1963.

Опарин А.И. Материя - жизнь - интеллект. М.: Наука, 1977.
Проблемы космической биологии. М.: Наука, 1975, т. 28.
Солнечная энергетика. - Тр. Международной конференции по солнечной энергии (1-5 марта 1976 г., Тулуза). М.: Наука, 1979.
Справочник по водоснабжению и канализации. / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Н.Ф. Федорова. М.: Госстройиздат, 1960.
Яковлев С.В., Карелин Я.А., Жуков А.И., Колобанов С.К. Канализация. – М.: Стройиздат, 1975.
Goldman J.C. Out-door algal mass cultures // Application water Research. – Pergamon Press. 1979. v.13. P. 1-19.
Meadows D.H., Meadows D.L., Randers I., Behrens W. The limits to growth. – Apotomak association book, 1974.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ И БИОКНВЕРСИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

В.В.АЛЕКСЕЕВ

Великий перелом в развитии человечества начался около 10 тыс. лет назад, когда впервые наряду с добычей пищи возникло ее производство. Возникновение производящей экономики принципиально изменило характер взаимодействия человека и природы. Процесс взаимодействия даров природы сменился процессом активного воздействия человека на природу с целенаправленным изменением ее явлений, искусственным умножением и совершенствованием ее ресурсов. Эти тенденции коснулись всех сторон жизни человечества. Искусственное распространение культивируемых сельскохозяйственных растений из областей их обитания на вновь осваемые земли, а также увеличение их продуктивности требовало дополнительных затрат энергии. Эффективность земледелия увеличилось не только благодаря лучшему использованию вновь осваиваемых земель, увеличению знаний о процессе фотосинтеза, но прежде всего за счет интенсивного использования дополнительной энергии. Сельское хозяйство при первобытной технологии не потребляло никакой энергии, кроме мускульной энергии человека и животных. Отличительной чертой современного сельскохозяйственного производства является резкое увеличение энергозатрат на единицу производной сельскохозяйственной продукции [Алексеев, 1981].

На рис. 1 показано изменение относительной энергетической продуктивности различных сельскохозяйственных культур в зависимости от количества дополнительной израсходованной энергии. Из данных табл. 1 и рис. 1 видно, что в выращенной биомассе овощей на Новой Гвинее и риса на Филиппинах содержится в 16-17 раз больше, чем энергии затраченной на ее выращивание. В тоже время энергия, содержащаяся в орошаемом рисе, который производятся в штате Луизиана (США), лишь немного превосходят количество энергии, затраченное на ее выращивание.

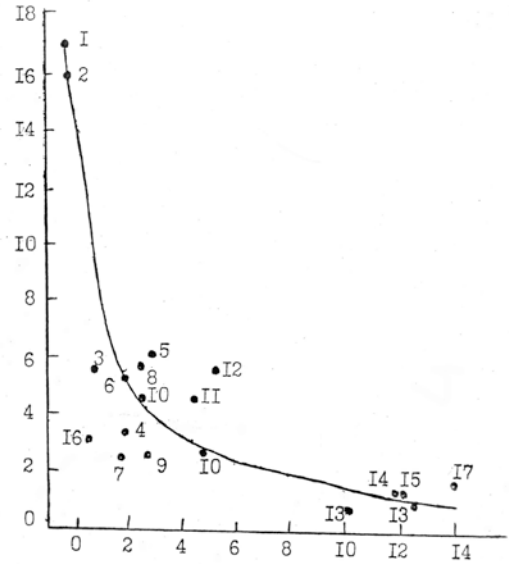


Рис. 1. Изменение относительной энергетической продуктивности различных сельскохозяйственных культур в зависимости от количества дополнительной израсходованной энергии (механической, химической и человека) или уровень индустриализации сельского хозяйства (Гкал в год на акр).

При переходе к механизированному сельскому хозяйству резко снизились затраты времени на производстве продукции с одного гектара. Однако, параллельно с ростом индустриализации сельского хозяйства шел процесс разрыва экологических циклов. В результате при производстве продуктов питания замкнутая по веществу система превратилась в проточную, которая постоянно пожирает огромное количество минеральных удобрений и выбрасывает богатые энергией органические отходы, содержащие необходимые для сельского хозяйства биогенные элемента. Эти отходы в свою очередь создают проблемы, связанные с ухудшением окружающей среды: деградация почв, эвтрофикация водоемов и т.д. Без преувеличения можно сказать, что основу совершенного сельского хозяйства составляют но только почва, но и нефть и ее производные. При таких условиях возникает опасность, что неизбежное истощение классических источников энергии в дальнейшем послужат непреодолимым препятствием для увеличения и даже сохранения на достигнутом уровне мирового производства продуктов питания. Если предположить, что нефть – единственный источник расходуемой в сельском хозяйстве энергии, и что разведанные запасы нефти пойдут только на удовлетворение пищевых потребностей населения Земли, то по североамериканским нормам вся нефть будет израсходована примерно за 60 лет [Белянин и др., 1980].

Для общемирового объема производства азотных удобрений требуется в настоящее враля $3 \cdot 10^5$ т нефти в день. В настоящее время при узкой специализация сельского хозяйства, развивающегося при отсутствии рециркуляции вещества, лю-

бое увеличение сельскохозяйственной продукции немыслимо без широкого использования минеральных удобрений. Беспокойство вызывают, прежде всего, фосфаты и нитраты. Эмпирическое изучение связи между достигнутой продуктивностью сельского хозяйства и количеством фосфатных удобрении показывает, что потребление фосфатных удобрений увеличивается в 2,7 раза быстрее чем продуктивность. Если скорость прироста населения Земли не изменится, то разведанные запасы фосфатов будут исчерпаны за 90 лет. На изготовление азотных удобрений затрачивается около 1/3 всех энергетических затрат при производстве зерновых культур, поэтому одним из важнейших факторов, ограничивают рост потребления нитратов, является будущая стоимость анергии. За период 1971-1974 гг. стоимость 1 т минеральных удобрений на международном рынке возросла в 3 раза.

Таблица 1. Энергетическая продуктивность и энергозатраты при выращивании сельскохозяйственных культур

Уровень индустриализации с/х	Культура	Район	Год	Номер точки на рис. 1
I	Овощи	Новая Гвинея	1962	2
II	Орошаемый рис	Филиппины	1970	1
III	Кукуруза зерновая	Айова	1915	3
	- ″ -	Пенсильвания	1915	4
	Кукуруза фуражная	Айова	1915	5
IV	Люцерна	Миссури	1970	6
	Ячмень	Миннесота	1970	7
	Сорго	Канзас	1970	8
	Соя	Миссури	1970	9
	Сахарный тростник	Гавайи	1970	10
	Кукуруза (зерно)	Иллинойс	1969	11
	Кукуруза (силос)	Айова	1969	12
V	Сахарная свекла	Калифорния	1970	13
	Арахис	Сев. Каролина	1970	14
	Орошаемый рис	Луизиана	1970	15
	Озимые	Монтана	1970	16
	Картофель	Мэн	1963	17

Глобальное повышение цен на минеральные удобрения приводит к необходимости развития технологий, которые включили бы в себя рециркуляцию минеральных удобрений, оставшихся в агропромышленных отходах с помощью установок по производству биогаза, а такие увеличения энергопроизводства путем фотосинтеза и совершенствования традиционных методов сельскохозяйственного производства. При современном создавшемся энергетическим кризисе во всем мире растет интерес к проблеме энергетического использования анаэробных микробиологических процессов. Существующее с давних пор прямое сжигание, а не биотермическое аэробное окисление органических отходов производства, исполь-

зует лишь незначительную часть заключенной в них энергии. При этом удобрительная ценность снижается, вступает в противоречие с земледелием. Значительная часть заимствованных растений веществ после возвращения в землю нарушает естественный круговорот органических минеральных удобрений, и их многократное использование.

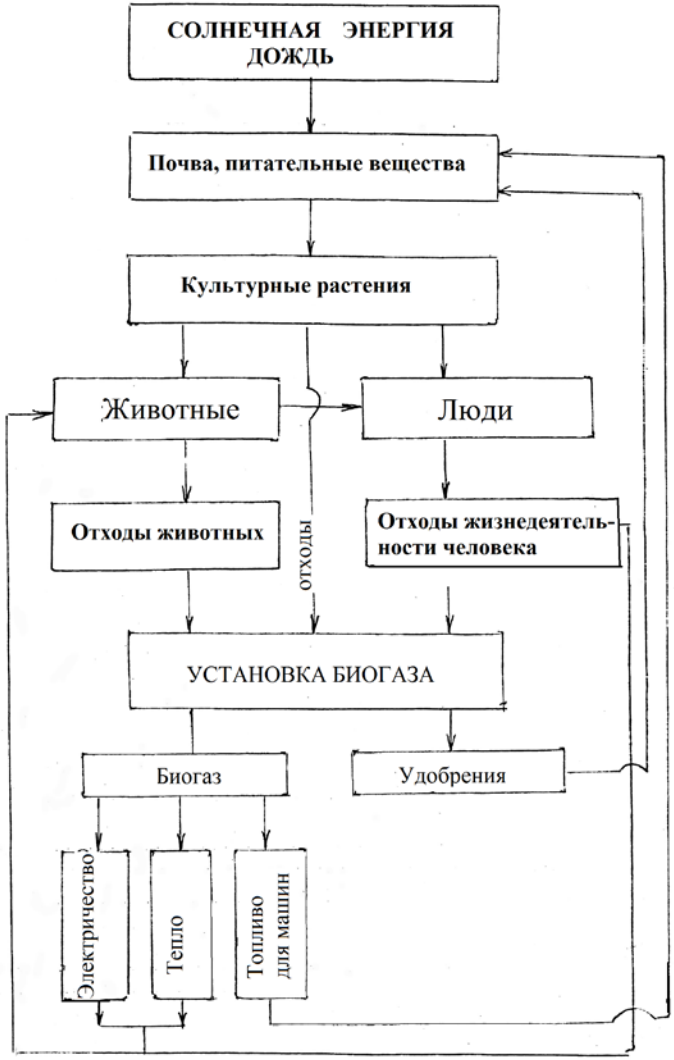


Рис. 2. Идеальный цикл сельского хозяйства с использованием биогазовых установок.

На рис. 2 приведена схема идеального сельскохозяйственного цикла, при котором органические отхода перерабатывайся в метантанках, в результате чего получается биогаз, который используется для производства электроэнергии, обогрева ферм и жилья, а также как транспортное топливо. Отметим, что после перебраживания в растворе остаются все важнейшие биогенные элементы: азот, калия я т.д. Таким образом, установка по производству биогаза одновременно производит высококачественные удобрения. При этом анаэробное брожение имеет значительные преимущества перед аэробным гниением, которое широко использовалось в доиндустриальном сельскохозяйственном производстве для подготовки навоза к внесению в почву. В ходе аэробного гниения или аэробного брожения содержание окиси калия или фосфатной кислоты почти не меняется, в то время как азотистые соединения претерпевают изменения, что сопровождается потерями. Общие потери азота при гниении с учетом уноса летучих форм (прежде всего аммиака) с выделяемым теплом достигает 50%. В результате из 37 кг азота, в среднем содержащихся в 1 т навоза, после гниения возвращается в землю фактически 12-15 кг, а после метанового брожения 36 кг. Потери азота в навозной жиже примерно вдвое больше, чем в навозе.

Изучение взаимодействия энергии и материи в экосистеме – основная задача эколога. В самом деле, односторонний приток энергии и циркуляция элементов есть два фундаментальных фактора, характерных как для окружающей среды, так и для отдельного организма. При этом хотелось бы подчеркнуть исключительно важную роль в экологии живого вещества, которое было введено В.И.Вернадским и которое представляет собой совокупность организмов. При этом отдельный организм, на который направлено внимание биолога, отходят на второй план. На первое место выходит миграция химических элементов, отвечающая живому веществу биосферы. Изучение законов этой миграции, безусловно, принадлежит к фундаментальным областям нашего знания и составляет основу для прикладной экологии. Нет сомнения, что биологическую эволюцию нельзя понять без биогеохимического подхода в биосфере, так же как невозможно управление искусственными экосистемами без хорошей теоретической и экспериментальной биохимии. Сложная динамика биомассы сообщества микроводорослей в природных условиях имеет характер близкий к стохастическому. Траектории роста сложны и сильно расходятся от места к месту. Поэтому экологический прогноз является нетривиальной задачей и труден в расчетах.

Природный газ как высококачественный энергоноситель и ценнейшее химическое сырье стал мощным фактором ускорения технического прогресса. В условиях обострения кризиса во всей мире все большее внимание привлекают различные альтернативные источники энергии. Среди этих источников все большую и большую роль начинает играть использование биомассы для целей энергетики. Программы получения биомассы для целей энергетики существуют во многих странах. Это связано с тем, что биомасса – это возобновляемый источник энергии, который может быть переработан в удобный вид топлива: жидкое (этанол, метанол, липиды) или газообразное (метан и т.д.) [Крепис,1979]. В принципе биоконверсия солнечной энергии в метан является чрезвычайно перспективным способом преобразования солнечной энергия. Этот способ позволяет решить проблему снабжения человечества неиссякаемой энергией, долевой и экологически безопасной. Однако, имеется ряд научно-технических задач, чтобы это стало реальностью.

Количество бросовой биомассы ограничено и поэтому она не может обеспечить энергетические потребности человечества. Специальное выращивание наземных растений потребует отторжения значительных площадей от сельского хозяйства. Например, при КПД фотосинтеза – 2% для производства 10 млрд т у.т. потребуется почти 3 млн км² хороших земель, в то время как агроэкосистемы занимают общую площадь 14 млн км². Уменьшение площадей, которые требуются для энергетических посадок, связано с повышением КПД фотосинтеза, что требует значительного количества удобрений, для производства которых необходимы дополнительные энергетические затраты. Например, известно, что при высокопродуктивном сельской хозяйстве непрерывно уменьшается энергетическая продуктивность в отлично от урожайности. Например, в настоящее время энергетические затраты, идущие на производство кукурузы, составлял 20-25% от заключенной в ней энергии. Это ограничение может быть снято, если для выращивания биомассы использовать поверхность водоемов (озер, водохранилищ, морей и океанов). При этом использование микроводорослей в качество фотосинтезирующего агента позволяет довести эффективный КПД фотосинтеза до 8-11%. В средних широтах, где общее количество падающей радиации составляет для чистой атмосферы 1900 кВт·ч/м² в год (южные районы европейской части России) с учетом типично облачности, в течение года можно получить при указанном выше КПД – 8% с площади 70 м² 1 т у.т. КПД фотосинтеза отдельной клетки зависит от энергии падающей радиации. Эта зависимость имеет четко выраженный максимум, а убывание КПД фотосинтеза с ростом ФАР связано с насыщением фотосинтезирующего аппарата клетки. Если производить стробоскопическое освещение, го КПД фотосинтеза по отношению к энергии падающего света возрастает. В плотной суспензии водорослей каждая клетка при создании оптимальных условий перемешивания находится в условиях стробоскопического освещения. Теоретически это позволит достичь КПД = 17% от падающего солнечного света [Верзилин, 1966]. Проблема лишь состоит в том, чтобы найти оптимальный режим вертикального перемешивания суспензии водорослей.

Благоприятные районы Мирового океана для использования биоэнергетических установок типа «БИОСОЛЯР» составляют 22 млн км². С учетом приходящей солнечной радиации, в этих районах можно получать около 300 млрд т у.т.

Литература

Алексеев В.В. Эволюция биосферы. Перспективы использования солнечной энергии. // Природные ресурсы и окружающая среда. 1981. № 7. С.53-62.

Белянин В.Н., Сидько Ф.Я., Тренкещу А.П. Энергетика фотосинтезирующей культуры микроводорослей. – Новосибирск: Наука, 1980.

Букин В.Н., Быховский В.Я., Панцхава Е.С. Биохимические и микробиологические основы промышленного получения витамина B_{12} методом термофильного титанового брожения. Витамин B_{12} и его применение в животноводстве. М.: Наука, 1971. С.9-24.

Верзилин Н.Н., Пиневич В.В., Михайлов А.Л. Массовое культивирование хлореллы в условиях Северо-Запада СССР / В сб. Материалы 4-го координационного совещания и научного симпозиума по теме 415.5. СЭВ. 14-18. III. – Краков, 1966. С.21-44.

Крепис П.Б. Возможности и перспективы получения энергии с помощью метанового брожения // Изв. АН СССР. Сер. биология №1, 1979, с. 103-111.
Овсянникова М.Н., Раппорт Н.А. Солеустойчивые мутанты хлореллы // Доклады АН СССР, 1983, т.269, №4, с. 963-966.
Романд Ф. Основы прикладной экологии. – Гидрометиздат: Л, 1981.
Успенская В.Л. Экология и физиология питания пресноводных водорослей. – М: Изд-во МГУ, 1966.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЗИС ПРИРОДЫ И ОБЩЕСТВА И ЕСТЕСТВЕННАЯ НАЛОГОВАЯ ПОЛИТИКА

В.В. АЛЕКСЕЕВ

Связь между уровнем цивилизованной жизни и энергообеспечением людей хорошо известна. Однако, использование этого факта, его количественная сторона, к сожалению, до сих пор не нашли соответствующего места. Существующие финансовые системы никоим образом не используют того факта, что потоки энергии в конечном итоге определяют реальные стоимости товаров и услуг. Нарушения в экономике, связанные с неустойчивостью денежного масштаба, заставляют экономистов искать выход. Это приводит к непрекращающимся попыткам связать количество денег в обращении с естественными физическими показателями: количеством золота, валовым национальным продуктом и т.д. Однако, скорость производства товаров и услуг не совпадает со скоростью возрастания общего количества золота. Валовой национальный продукт в качестве основы для выбора эквивалента денежного масштаба неудобен, т.к. сам измеряется в денежном выражении.

Например, Мильтон Фридман – глава чикагской монетаристской школы предлагает следующий способ стабилизации цен: среднегодовой прирост денежной массы может составлять 4-5%. Он учитывает при этом среднегодовое увеличение реального ВНП (примерно на 3%) и незначительное снижение скорости обращения денег. Эти размышления легли в основу «денежного правила», признанного сегодня с теми или иными дополнениями, центробанками большинства стран [Friedman, 1959].

Другой лауреат нобелевской премии по экономике – основатель австрийской экономической школы Фридрих А. Хайек предлагает довольно экстравагантную модель стабилизации, основанную на конкуренции валют, выпускаемых частными банками. Он предлагает лишить государство права на выпуск денег. Вот что он пишет в предисловии к своей книге «Частные деньги», где излагается этот подход: «…потеряв надежду найти политически осуществимое решение элементарнейшей в техническом смысле задачи – прекращения инфляции, я, отчаявшись, выдвинул в одной из своих лекций несколько необычное предложение, последующее размышление над которым открыло совершенно неожиданные новые горизонты. Я не смог удержаться от дальнейшей разработки этой идеи, поскольку задача предотвращения инфляции всегда представлялась мне чрезвычайно важной, и не только из-за ущерба и страданий, причиняемой высокой инфляцией, но и потому, что я считал и считаю, что даже умеренная инфляция порождает в конечном счете повторяющиеся периоды депрессии и безработицы, которые стали весомым

аргументом против системы свободного предпринимательства и которые в интересах выживания свободного общества должны быть предотвращены.

Мое предложение состояло в том, что правительство следует лишить монополии на эмиссию денег» [Hayek, 1976].

Между тем и в природе и в обществе существует естественный фактор, определяющий динамику развития - это потоки свободной энергии, той энергии, которая может производить работу. Свободная энергия выражается в естественных физических единицах: киловатт-часах, джоулях и т.д., легко и строго измеряется. Сумма, используемой в народном хозяйстве свободной энергии, складывается из используемой электроэнергии и механической энергии, получаемой при сжигании моторного топлива. Меняя потоки энергии в процессе своей экономической деятельности, мы воздействуем на природные энергетические потоки и изменяем окружающую среду. Количество произведенного продукта пропорционально объему использованной свободной энергии, что может быть выражено формулой:

«Использованная в течение года электроэнергия плюс моторное топливо, умноженное на теплотворную способность и кпд (коэффициент полезного действия), эквивалентны стоимости наличных и безналичных денег, умноженных на оборачиваемость их в течение года».

Таким образом, может быть определена жесткая связь между денежными и энергетическими единицами. Мониторинг за отпуском свободной энергии позволяет легко контролировать интегральную величину производимой продукции, а значит и денежную эмиссию.

Для производства определенного количества свободной энергии необходимо затратить и электроэнергию и моторное топливо. Чтобы произвести электроэнергию на ТЭС, необходимо добыть топливо, построить станцию, а также затрачивать определенное количество энергии на самой станции для обеспечения работы ее агрегатов в России, чтобы произвести 1 кВт·час надо затратить 0.2 кВт·часа [Алексеев, Синюгин, 1992]. Поэтому общее количество электроэнергии, которое может быть получено на электростанции за срок ее службы, естественным образом распадается на две части:

$E_{полн} = E_{затр} + E_{нетто}$,

где $E_{полн}$ – общее количество электроэнергии, выработанное электростанцией; $E_{затр}$ – энергия, затраченная на собственные нужды энергокомплекса, в том числе и в сопряженных отраслях промышленности (машиностроении, металлургии сельском хозяйстве и т.д.); $E_{нетто}$ – та энергия, которая используется в производстве товаров и услуг. Собственно ради этой энергии и существуют энергосистемы.

Совершенно очевидно, что $E_{нетто}$ должна быть больше нуля, иначе существование данного конкретного энергообъекта оказывается бессмысленным. Отношение $E_{полн}$ к $E_{затр}$ носит название энергоотдачи и должно быть больше 1:

$e = E_{полн}/E_{затр} > 1$.

Используя показатель энергоотдачи, нетрудно получить связь между $E_{полн}$ и $E_{нетто}$:

$E_{полн} = E_{нетто} \cdot e/(e-1)$.

Отсюда следует, что чем меньше энергоотдача, чем ближе она к 1, тем больше требуется произвести энергии для обеспечения необходимого количества энергии-нетто [Алексеев, 1995]. Энергоотдача наряду с валовым производством энергоре-

сурсов показывает интенсивность давления топливно-энергетического комплекса на окружающую среду.

Если использованную свободную энергию определить довольно просто для каждой электростанции по счетчику, то затраченную определить значительно сложнее, т.к. при этом должны быть учтены все расходы энергии не только в энергопроизводственном цикле, но и во всех сопряженных производствах. Это может быть сделано наиболее эффективно с помощью метода межотраслевого баланса, который также называется методом «затраты-выпуск» и который наиболее подробно был разработан лауреатом Нобелевской премии В.В.Леонтьевым [Leontief, 1986]. Чтобы использовать данный метод анализа энергопотоков в хозяйственных системах, необходимо соответствующие матрицы межотраслевого баланса перевести из натуральных или денежных показателей в энергетические единицы. При этом живой труд учитывается с помощью энергетических трат на соответствующую потребительскую корзину, характерную для отрасли.

Любая открытая система, в частности экономическая, создается и функционирует только при наличии потоков свободной энергии. Под свободной энергией мы понимаем соответствующий термодинамический потенциал Гиббса [Gibbs, 1928]. В условиях равновесия системы с окружающей средой свободная энергия системы равна нулю. В технической термодинамике свободная энергия Гиббса называется также эксергией. Эксергия термодинамической системы – это та максимальная работа, которую система производит при обратимом переходе в состояние полного равновесия с окружающей средой [Бродянский и др., 1988].

Вещества, находящиеся в неравновесном состоянии с атмосферой, могут служить источниками эксергии – это всем известные ископаемые топлива (нефть, уголь, газ). Разные энергоносители обладают различным эксергическим содержанием, которое определяется степенью неравновесности вещества в данном состоянии. Такие виды энергии, как электроэнергия и механическая энергия являются 100% эксергией. Поэтому эксергию можно измерять в кВт·часах. В существующей статистике по энергоресурсам величины добычи и потребления различных видов топлив приводятся к единому стандарту, единицам условного топлива. 7000 ккал/кг. При этом в рамках общеэкономической статистики пересчет натуральных единиц в условное топливо производится по усредненным показателям, учитывающим качество добываемых и используемых энергоресурсов. Так в СССР в 1986 г. 1 тонна нефти была эквивалентна 1.43 тоннам условного топлива (т.у.т), 1000 м^3 природного газа – 1.15 т у.т., 1 тонна угля – 0.606 т у.т., одна тонна сланцев – 0.32 т у.т. Для существующих технологий использования ископаемых энергоресурсов и преобразования энергии в народном хозяйстве определяется электротопливный коэффициент, показывающий какое количество условного топлива необходимо сжечь на тепловой электростанции, чтобы получить 1 кВт·час электроэнергии (табл. 1).

Таблица 1. Динамика электротопливного коэффициента России (по [Народное хозяйство СССР, 1988; Энергетика СССР, 1987])

Годы	*1965*	*1970*	*1975*	*1985*
электротопливный коэффициент грамм у.т./квт-час	415	367	340	326

Используя электротопливный коэффициент мы можем подсчитать эксергическое содержание различных энергоресурсов и определить общие потоки свободной энергии между отраслями (табл. 2). Зная электротопливный коэффициент и расходы энергии на единицу продукции по отраслям, мы можем привести данную таблицу к энергетическим единицам.

Существует взаимно однозначное соответствие между вектором строкой распределения k-ого энергоресурса Xk в стоимостной форме и вектором-столбцом Zk распределения k-ого энергоресурса в натуральной форме. Для пересчета энергоресурса используемого в отрасли из натуральных в денежные единицы мы используем средние тарифы на энергоресурс по отраслям bkj. При этом вектор Zk (Zkj, j = 1,....n) определяется по формуле: Zkj=Xkj/bkj, j = 1.....n.

Энергия содержащаяся в к-ом энергоресурсе расходуется на производство и воплощается в продукции, производимой по отраслям Zki (i=1...n). таким образом валовому выпуску отрасли Xi соответствует поставка к-ого энергоресурса Zki [Алексеев, Синюгин, 1996].

Предположим, что в каждой отрасли энергозатраты Zki распределяются равномерно. В этом случае можно определить матрицу межотраслевых потоков каждого энергоресурса воплощенных в в продукции отраслей. Перебирая все множество энергопроизводящих отраслей мы получим для каждого энергоресурса баланс потоков энергоресурсов (на рис. 1 в показаны связи ядерной энергетики с сопряженными отраслями промышленности).

Для получения общей матрицы межотраслевых потоков энергии необходимо произвести суммирование по всем видам энергоресурсов. При этом необходимо учесть энергосодержание каждого энергоресурса. По второму закону термодинамики в любой макроскопической системе происходят процессы, приводящие ее в равновесие с окружающей средой: основные фонды изнашиваются и стареют, что выражается в категории амортизации.

Для функционирования экономики необходим также постоянный приток свободной энергии в виде эксплуатационных затрат. Непроизводственное потребление людей происходит в форме непосредственного потребления эксэргии, содержащейся в продуктах питания, а также в форме потребления других товаров и услуг, в которых воплощена эксергия экономической системы.

Свойство свободной энергии таково, что если мы проследим цепочку по изготовлению того или иного продукта, то легко увидим как по мере его изготовления растет количество воплощенной в продукте свободной энергии (электроэнергии и моторного топлива). Эта величина достигает максимума, дойдя до потребителя.

Осуществление связи между финансовой и энергетической системами позволяет предложить очень простую схему сбора налогов, учитывающую естественное свойство свободной энергии использоваться только один раз и поэтому позволяющую легко уйти от возникающих проблем повторного счета.

В предлагаемой схеме цена электроэнергии и моторного топлива (носителей свободной энергии) должна складываться из двух величин Езатр умноженной на денежный эквивалент, плюс налог. Средства, полученные в результате сбора налога на свободную энергию, далее используются на оборону, науку, образование, культуру и другие государственные нужды.

Таблица 2. Межотраслевой баланс народного хозяйства СССР на 1985 г. (в неденоминированных млрд руб. 1985 г.)

Отрасли	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*
1. Электроэнергия	0.27	1.77	0.54	0.024	1.93	1.46	3.72	4.06	0.89	1.49	0.86	0.93	0.63
2. Нефть и газ	9.90	17.32	0.06	0.03	1.63	0.64	3.03	2.7	0.92	2.18	0.26	1.37	0.29
3. Уголь	3.91	0.00	6.31	0.03	4.03	0.09	0.06	0.26	0.15	0.34	0.06	0.2	0.05
4. Другие топливные отрасли	0.23	0.00	0.001	0.001	0.001	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03	0.4	0.001	0.001
5. Черная металлургия	0.08	0.11	0.1	0.16	19.63	0.74	1.17	20.43	0.45	2.35	0.12	0.36	0.13
6. Цветная металлургия	0.19	0.01	0.002	0.01	1.74	14.85	1.11	12.17	0.05	0.14	0.04	0.16	0.72
7. Химия и нефтехимия	0.14	0.48	0.25	0.001	0.5	0.6	10.69	9.96	1.55	1.1	5.57	0.85	0.87
8. Машиностроение	1.15	0.41	0.78	0.03	2.09	0.8	3.19	80.22	1.54	1.2	0.72	1.26	0.31
9. Деревообрабатывающая промышленность	0.03	0.03	0.35	0.007	0.16	0.16	1.45	3.25	12.86	0.73	0.49	1.93	0.83
10. Строительные материалы	0.03	0.01	0.06	0.003	0.09	0.09	0.34	1.35	0.4	7.26	0.06	0.51	0.11
11. Легкая промть	0.05	0.04	0.08	0.005	0.21	0.11	1.76	2.55	1.25	0.33	71.62	1.2	1.09
12. Пищевая пром-ть	0.02	0.04	0.008	0.000	0.05	0.05	1.33	0.45	0.08	0.09	0.71	47.21	1.99
13. Другие отрасли пром-ти	0.27	0.03	0.07	0.002	0.08	0.04	0.3	1.04	0.12	0.16	0.16	0.72	2.61
Подитог	**16.27**	**20.25**	**8.61**	**0.30**	**32.14**	**19.63**	**28.16**	**138.5**	**20.27**	**17.40**	**81.07**	**56.70**	**9.63**
Сельскохозяйственная и лесная	0.002	0.006	0.00	0.00	0.008	0.001	0.05	0.02	0.4	0.002	16.29	106.9	0.26
Транспорт и связь	0.11	16.11	3.23	0.04	4.09	1.27	3.41	7.91	4.16	11.55	1.12	4.43	0.92
Прочее	0.02	0.02	0.01	0.001	0.59	0.18	6.16	6.38	9.12	0.11	0.02	0.24	0.14
Износ	6.17	6.11	2.57	0.17	5	2.56	6.25	19.6	3.3	3.92	2.27	4.92	1.77
Итого	**22.57**	**42.50**	**14.42**	**0.52**	**41.83**	**23.64**	**44.03**	**172.4**	**37.25**	**32.98**	**100.8**	**173.2**	**12.72**

Рис.1. Связи ядерной энергетики с сопряженными отраслями промышленности

Таким образом издержки производителя будут определяться суммарной использованной свободной энергией и налогом на нее. Естественно, что реальная рыночная цена будет колебаться вокруг этой величины. При этом предполагается отменить все остальные налоги: на прибыль, добавленную стоимость и т.д. Очевидно, что стремление сократить издержки приведут к экономии затрачиваемой свободной энергии на единицу продукции и соответственно к уменьшению энергии-нетто, а значит и давления на окружающую среду.

Мы можем оценить, какую величину составит налог на энергию от стоимости производимой продукции. В первом квартале 1992 г. В России валовой внутренний продукт составлял 1402 млрд руб., налоги за вычетом трансферных составляли 365 – 128 = 237 млрд руб., что дает 17% валового внутреннего продукта. Таким образом, общее количество использованной свободной энергии естественным образом распадается на три части:

$$E_{полн} = 0.20\ E_{полн} + 0.17\ E_{полн} + 0.63\ E_{полн} \quad (5)$$

Введение налога на свободную энергию позволяет отменить налоги на прибыль, добавленную стоимость и т.д., за исключением так называемых трансферных налогов, которые приводят к перераспределению личных доходов между группами населения.

Здесь мы должны отметить следующее обстоятельство, которое забывается, когда говорят о финансовых потоках. Как мы видели выше, деньги фактически являются чеками на использование определенного количества свободной энергии в данный момент времени. Однако, жизнь устроена таким образом, что происходит смена поколений: ныне активное поколение должно содержать тех, кто ушел на пенсию, детей и больных, то есть существует естественное запаздывание в расхо-

довании средств, накопленное в виде денег пенсионное обеспечение становится пустой бумагой, если дает сбой экономическая система. В настоящее время вопрос о формировании пенсионного фонда решается за счет налога на зарплату на предприятии и подоходного налога. Когда предприятия государственные, такая процедура сбора налогов естественна. Однако, с переходом к рынку возникают трудности, поэтому более естественно связать трансфертный налог с расходами, с налогами на покупку и отменить подоходный налог и налог на зарплату. Широко известным вариантом налога на покупку был налог, связанный с водочной монополией. Совершенно очевидно, что предметы первой необходимости, входящие в потребительскую корзину таким налогом облагаться не должны. Подчеркнем еще раз, что при внедрении налога на покупку должны быть отменены подоходный налог, налог на зарплату, взносы в пенсионный фонд и т.д.Имеется еще два налога, которые относятся к трансфертной группе это налоги, связанные с рентой, и пошлина на ввоз товара другой страны. Экономическая система в целом обладает избирательностью по отношению к используемым в производстве природным ресурсам, т.к. природные ресурсы вовлекаемые в производство, различаются по качеству. Такая дифференциация столь же обширна, как и природные условия на Земле. Естественно, что наиболее предпочтительно использование высококачественных ресурсов, хорошо перерабатывающихся современными технологиями. Однако, таких ресурсов недостаточно для удовлетворения всех потребностей. Таким образом мы сталкиваемся с естественным ограничением по ресурсам, поэтому приходится разрабатывать менее эффективные ресурсы. Отсюда появляется распределение природных ресурсов по эффективности их использования в экономике.

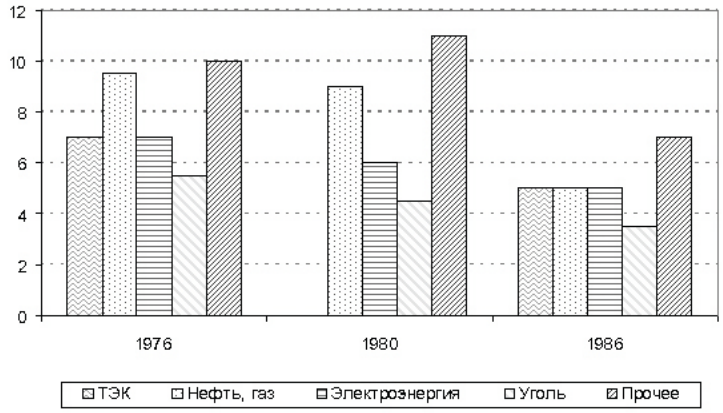


Рис. 2. Распределение энергетических источников в РФ в зависимости от энергоотдачи.

В экономических науках хорошо разработан тезис о том, что использование любого ограниченного ресурса приносит дифференциальный доход. В отраслях, эксплуатирующих природные ресурсы, такой устойчивый дифференциальный доход производителя от использования в экономической системе ограниченного природного ресурса называется дифференциальной рентой. При наличии собст-

венности на природные ресурсы и в условиях товарно-денежных отношений рентный эффект может получить денежное выражение в виде рентных доходов и платежей. Использование энергетического подхода позволяет оценить разницу которая возникает между различными энергетическими источниками за счет естественных различий ресурсов и правильно оценить возможный рентный эффект и рассчитать необходимые платежи.

Для энергетических систем мы можем рассчитать энергоотдачу, например, двух электростанций, работающих на угле и газе и сравнить их. Если мы не сможем обойтись без обоих источников, то рентный платеж более эффективного источника менее эффективному позволяет уравнять шансы обоих предприятий в рыночной системе. Здесь мы еще раз подчеркнем, что рентный эффект, как фактор разно качественности ресурсов может быть оценен в терминах энергетических единиц, то есть по существу это не экономический, а естественнонаучный фактор. На рис. 2 показано, как распределены энергетические источники в Российской Федерации в зависимости от энергоотдачи. Введение пошлины является аналогом рентного эффекта в международных экономических связях, т.к. имеет цель уравнять в возможностях отечественные и заграничные предприятия.

Итак, естественная налоговая система должна состоять всего из четырех видов налогов:

– налога на свободную энергию (электроэнергию и моторное топливо);
– налогов на покупку;
– ренты;
– пошлины на ввоз товаров из другой страны.

В заключение отметим два обстоятельства, которые не учитываются современными экономистами, особенно это касается приверженцев монетаристского подхода, которые часто путают цену со стоимостью. Как мы видели выше стоимость продукта определяется всеми затратами свободной энергии по пути к потребителю. Эта величина может быть строго подсчитана, если мы знаем межотраслевой баланс и технологическую цепочку, включая доставку товара к потребителю. Цена продукта, однако, определяется не одним, а двумя факторами: стоимостью и полезностью. Последняя величина не может быть формализована, а определяется рынком, который выявляет вкусы покупателей и их желания.

Легко привести пример, когда предмет имеет цену, но не имеет стоимости и наоборот. Если мы случайно нашли кусок самородного золота, то на его добычу не было затрачено свободной энергии, поэтому стоимость его равна нулю, а цена определяется рыночной ценой данного металла. В свою очередь стоимость машины, которая никому не нужна, может быть достаточно высокой, а цена равна нулю.

Нетрудно сообразить, что сумма стоимостей всех продуктов, выпущенных в течение года должна быть больше суммы всех цен, после реализации этих продуктов, в качестве товаров: здесь убытки, возникающие в результате естественных потерь и потерь за счет морального старения. Возникает естественная величина - отношение суммы всех цен реализованных продуктов к их суммарной стоимости. Эта величина может быть названа эффективностью экономики. Очевидно она всегда меньше единицы. Надежды, связанные с плановой экономикой, которая позволила бы ее сделать равной единице не оправдались. Это опять же связано с глубинными процессами производства и распределения, которые аналогичны по сво-

ей сути с физическими процессами, лежащими в основе законов термодинамики, отвергнуть которые еще никому не удавалось.

Энергетическая расточительность - отличительная особенность хозяйственных систем по сравнению с сообществами живых организмов. По замечанию академика В.А. Легасова, высказанного в журнале «Плановое хозяйство» в июне 1986 года «даже у лучших западных технологий показатель расхода энергии превышает теоретический: для алюминия – в 6 раз, стали – в 4 раза, цемента – в 5, нефти – в 9, бумаги – в 125 раз».

Энергетика является отраслью хозяйства, которая наиболее интенсивно влияет на окружающую среду. Здесь достаточно назвать проблемы, возникающие в связи с парниковым эффектом или кислыми дождями. Тревога международной научной общественности в связи с этими проблемами неоднократно выражалась в заявлениях конференций метеорологов, океанологов и других областей географических наук [Odum H.T., Odum E.C., 1976].

В настоящее время энергию получают в основном путем сжигания органического топлива, т.е. разрушая природные структуры, аккумулировавшие энергию солнца. Потребляя энергию нефти, газа, угля, человек вносит хаос в биосферу, уничтожая ту упорядоченность, которая сформировалась благодаря потоку свободной энергии солнечного излучения. Происходит как бы омолаживание биосферы, т.е. она скачком начинает возвращаться в состояние, которое было миллионы лет назад. Рост концентрации углекислого газа в атмосфере земли на 25% в течение последнего столетия определяется только антропогенными причинами. Введение энерговалюты, которая обеспечивает тесную связь банковской и энергетической систем, позволило бы эффективно решать и экологические проблемы, так как экономия денежных средств в процессе производства автоматически приводила бы к экономии используемой свободной энергии, а значит и к меньшему давлению на окружающую среду. Энерговалюта может быть введена по аналогии с золотым паритетом, когда фиксируется законом содержание чистого золота в национальной денежной единице. В данном случае денежная единица была бы эквивалентна определенному количеству электроэнергии, вырабатываемой на эталонной системе электростанций. Например. 1 рубль может быть эквивалентен 20 кВт/час электроэнергии, вырабатываемой, например, на Ленинградской АЭС или эквивалентен 20 кВт/час электроэнергии, вырабатываемой на группе типичных электростанций. Инерционность энергетической системы будет создавать очень медленные колебания валюты, делая ее практически постоянной, создавая устойчивость банковской системы и благоприятные условия для инвестиций в долговременные проекты, в частности эффективное кредитование сельского хозяйства.

Энергетический подход к анализу экономики позволяет разрабатывать более эффективную энергетическую политику. Как мы показали выше это дает возможность правильно учитывать рентные эффекты. Другой аспект касается внедрения новых технологий, в частности возобновляемых источников энергии. В обоих случаях чисто рыночные механизмы регуляции не дают возможность проводить правильную долговременную политику, т.к. они эффективно отслеживают только нынешнюю ситуацию. Бытует широко распространенное мнение о том, что возобновляемые источники энергии являются экономически неэффективными и не могут внести существенный вклад в энергообеспечение в обозримом будущем. Однако уже достигнутый технологический прогресс опровергает эту точку зрения. На-

пример для биомассы, как энергетического источника, мы получили: для энергетических плантаций быстрорастущих деревьев таких как тополь значение равное 3. Напомним, что для АЭС эта величина равна 4-4.5. Нами был выполнен анализ энергетической эффективности в условиях экономики США для фотоэлектрических систем. Мы использовали межотраслевой баланс США за 1988 г. Значение для ФЭС получилось достаточно высоким и оказалось равным 3.8. Этот показатель выше, чем на угольных станциях закрытой разработки, где он равен 3. Еще более впечатляющим оказывается значение энергоотдачи для станций с параболоцилиндрическими концентраторами (станции типа «ЛУЗ»). Анализ показал, что на протяжении почти 20-ти летней эксплуатации таких систем в пустыне Мохаве /Калифорния/.энергоотдача составляла 5-5.5, что превышает энергоотдачу ТЭС на мазуте (4.5) и для АЭС (4-5). Отметим, что в тропической зоне, в частности в Индии эффективность систем типа «ЛУЗ» должна быть еще выше [Алексеев, Синюгин, 1997].

Другим важным возобновляемым источником энергии является ветроэнергетика, которая имеет достаточно высокое значение энергоотдачи равное примерно 4 целого ряда регионов с хорошими ветровыми ресурсами. К таким районам на земном шаре относится в частности Индия. Общий потенциал ветро энергоресурсов Индии оценивается величиной более 20 000 МВт, в том числе три штата Тамилиад, Гуджарат и Анхра-Прадеш имеют суммарный потенциал около 10 000 МВт. Используя показатель энергоотдачи можно очень аккуратно подсчитать имеющийся ветровой энергоресурс, что необходимо для планирования развития данной отрасли энергетического хозяйства [Алексеев, Нефедова, 1998].

Литература

Алексеев В.В. Энергетический базис экономики // Вестник Московского университета. Серия 5. География – №2, 1995. С.10-16.

Алексеев В.В., Нефедова Л.В. Этапы развития и перспективы ветроэнергетики в Индии // Вестник Московского университета. Серия 5. География – №2. 1998. С. 45-49.

Алексеев В.В., Синюгин О.А. Определение коэффициента энергоотдачи в ядерной энергетике // Тр. ин-та экспериментальной метеорологии. – М: Гидрометиздат. Вып. 19 (152), 1992. С.173-183.

Алексеев В.В., Синюгин О.А. Технико-экономическая оценка традиционной, атомной и альтернативной энергетики // Российский химический журнал. т. 41, вып. 6, 1997. С.120-125.

Алексеев В.В., Синюгин О.А. Энергетическая оценка экологического ущерба, наносимого топливно-энергетическим комплексом // Обозрение прикладной и промышленной математики. 1996. Т.3. №3. С.331-345.

Алексеев В.В., Синюгин О.А. Энергетический анализ межотраслевых связей и энергоотдача // Сб. тр. ВНИИ системных исследований. 1992. №3. С.23-30.

Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергический метод и его приложения / Под ред. В.М.Бродянского. – М: Энергоатомиздат, 1988. – 288с.

Народное хозяйство СССР. Статистический ежегодник. – М., Финансы и статистика. 1988 г.

Энергетика СССР в 1985-1990 гг. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 350 с.

Friedman M. A Program for Monetary Stability. – N.Y. Fordham University Press, 1959.
Gibbs J.W. The collected works of: In two volumes. – N.Y. Longmans, Green and Co., 1928.
Hayek Frederick A. Denationalisation of Money. – London. The Institute of Economic Affairs, 1976.
Leontief W. Input-output Economics. – Oxford University Press, Inc.1986.
Odum H.T., Odum E.C. Energy basis for man and nature. N.Y. MC Graw-Hill book company. 1976.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОТДАЧИ НА ОСНОВЕ МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА

В.В.АЛЕКСЕЕВ, О.А.СИНЮГИН

Эра дешевой энергии закончилась с началом первого нефтяного кризиса в 1973-1975 гг. В настоящее время с новой силой встал вопрос об эффективной энергетике и ее месте в народном хозяйств. Энергия — наиболее универсальный продукт производственного использования. Ее потоки прямо определяют структуру и объем всей «пирамиды» народного хозяйства, начиная от добывающих отраслей и кончая отраслями с новейшей наукоемкой технологией. Количество потребляемой энергии непосредственно влияет на величину национального продукта (рис. 1). Этот интегральный показатель хорошо отражает благосостояние страны.

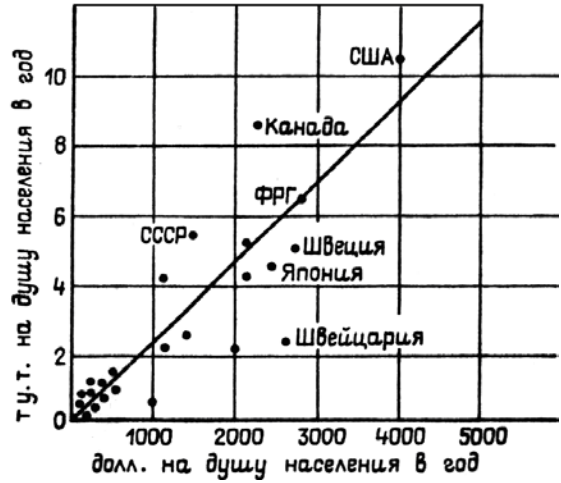


Рис. 1. Потребление энергии и валовой национальный продукт на душу населения по странам, 1983 г.

По сравнению с любой другой производственной продукцией использование энергии имеет значительно менее концентрированный характер, поэтому прямые расходы энергии на производство продукции не отражают всю полноту взаимосвязи отраслей и дают неполную картину энергопотоков. Косвенные затраты энергии существенны и мои значительно превосходить прямые. При учете косвенных затрат определяются как потоки самой энергии, так и потоки энергии, воплощенной в продукции отраслей, осуществляющих межотраслевые поставки. В этом смысле межотраслевой баланс прямых и опосредованных энергопотоков дает адекватную картину производства и потребления энергии в народном хозяйстве, причем сам баланс выражает закон сохранения энергии. Качественные попытки построения такой всеобъемлющей схемы и ее применения при решении частных вопросов содержатся в монографии Г.Одума, появление которой относится ко времени начала энергетического кризиса [Одум, 1978].

Таблица 1. Структура межотраслевого стоимостного баланса

Материальные затраты по отраслям	Производственное потребление по отраслям 1... *j*... *n*	Итого по промышленности	Конечный продукт	Валовый продукт
1	x_{11} x_{1n}	$\sum_j x_{1j}$	y_1	x_1
i	x_{ij}	$\sum_j x_{ij}$	y_i	x_i
n	x_{n1} x_{nn}	$\sum_j x_{nj}$	y_n	x_n
Амортизация и чистая продукция	V_1 V_j	V_n $\sum_j V_j$		
Всего затрат	$x_{\cdot 1}$ x_j	x_n $\sum_j x_j$		

Строгий количественный анализ возможен при применении метода межотраслевого баланса. В данной работе мы попытаемся проанализировать уже сложившуюся структуру народного хозяйства с энергетических позиций. Для этой цели будем пользоваться отчетными сводно-материальными межотраслевыми балансами производства и распределения продукции в стоимостном выражении (МОБ) и не будем касаться вопросов составления плановых МОБ и оптимизации [Аганбегян, 1968]. При таком подходе мы определим полные энергозатраты на производство различных видов продукции при существующей структуре экономики. Эти показатели усреднены по каждой из отраслей классификации МОБ и являются ба-

зовыми для энергетического анализа отдельных объектов или при анализе ситуации с рыночными отношениями в экономике. Необходимые полные энергозатраты более предпочтительны, чем стоимостные показатели при долгосрочном прогнозировании [Мелентьев, 1979].

Между показателями межотраслевого баланса (МОБ) в стоимостной форме (x_{ij}), схема которого представлена в табл. 1, и показателями энергетического баланса (x_{ij}), приведенными в табл. 2, существует однозначное соответствие, определяемое системой оптовых цен [Аганбегян, 1968]. На основании вектора энергопотребления в отраслях классификации МОБ можно построить межотраслевой баланс производства и распределения продукции в энергетических единицах. В нем произведенная продукция отражает не в стоимостной форме, а в межотраслевых потоках реальной и воплощенной энергии. Следует отметить, что в классификации отчетов МОБ производство энергоресурсов представлено несколькими отраслями. Мы будем отдельно анализировать потоки электроэнергии (ее производит одна отрасль в классификации МОБ) и потоки первичных энергоресурсов (нефть, газ, уголь и прочие), которые производят несколько отраслей по принятой классификации. При этом не надо забывать о взаимосвязи этих потоков. Показатели энерго- и электроемкости продукции имеют различное значение и различную динамику [Вартазарова, 1988].

Таблица 2. Структура межотраслевых потоков энергии

Отрасли	*1... J ...n*	Итого по промышленности	Непроизводственное потребление	Капитальные вложения	Поставка энергии
1 ... *i* ... *n*	z_{ij}	$\sum_i z_{ij}$	zy_i	zk_i	z_i
Итого: затраты в промышленности	$\sum_i z_{ij}$	$z_{\text{пр}}$	zy	zk	$z_{\text{сум}}$
Амортизация					$\alpha \cdot zk$
Сельское хозяйство					za
Транспорт					zt
Персонал					$zy+(1—\alpha)zk$
Итого: затраты энергии	z_j				

Покажем на примере электроэнергетики алгоритм определения матрицы межотраслевых потоков электроэнергии (обычно в классификации отчетных МОБ эта отрасль имеет индекс 1). Первая строка исходного отчетного МОБ характеризует производственное потребления электроэнергии в стоимостной форме: x_{ij}, $j = 1,..,n$. Обозначим это потребление в натуральных единицах: z_i, i = l,..,n, [кВт·ч].

Между этими показателями существует определенная взаимосвязь: $x_{i=j} \leftrightarrow z_i$, при $i = j$. Распределение электроэнергии в натуральных единицах можно определить или непосредственно (из статистических данных [Троицкий, 1987.]), или через средние тарифы по отраслям b_j [руб/кВт·ч]. При этом z_i определяется по формуле: $z_{(i=j)} = x_{1j} / b_j$. Энергия z_i , поставляемая в отрасли (i =1,..., n), расходуется на производство и воплощается в произведенной отраслями продукции. Эту связь можно пояснить конкретной схемой (табл. 3).

При предположении о равномерности распределения энергозатрат по отрасли можно определить матрицу межотраслевых потоков энергии (z_{ij}) , воплощенной в продукции отраслей: $z_{(i=j)l} = z_{(i=j)} . (x_{(i=j)l} / x_{(i=j)})$, где z_{il} — матрица межотраслевых потоков энергии в [кВт-ч], i=j; матрица МОБ в стоимостной форме, $x_{(i=j)}$, $x_{(i=j)}$ — производство продукции отраслью i, $i = j$; $z_{(i=j)}$ — поставка электроэнергии в отрасль i, i = 1, …, n; i = 1, …, n.

Аналогично можно рассмотреть и потоки других энергоресурсов. При этом мы получим матрицы $z_{ij}{}^k$ где k — индекс отрасли, производящей энергоресурс (нефть, уголь, газ и прочее):

$$z^k{}_{(i=j)l} = z^k{}_{(i=j)} \cdot (x_{(i=j)l} / x_{(i=j)})$$

Таблица 3. Энергозатраты в отрасли i (i=f)

Отрасль	Производственное Потребление	Итого по отрасли	Поставка энергии в отрасли
$i,(i = j)$	$x_{(i=j)}1$, …, $x_{(i=j)}e$ … $x_{(i=j)}n$	$x_{(i=j)} \leftrightarrow z_{(i=j)}$	

Таким образом, мы получим «k» матриц энергопотоков, где «пробегает» все отрасли (в классификации МОБ), производящие энергоресурсы. Матрицы $z_{ij}{}^1$ отражает потоки электроэнергии, а сумма матриц $\sum_{k\neq1} z_{ij}{}^k$ представляет собой межотраслевые потоки $z_{ij}{}^k$ в натуральных единицах (т у.т.). Все аналитические операции с межотраслевым балансом в стоимостном выражении имеют смысл с МОБ в энергетических единицах. Например, можно определить прямые нормы расхода электроэнергии

$$a_{ij} = z_{ij}{}^1 / z_j;\ k = 1.$$

и уравнение энергетического МОБ:

$$z_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} z_j + zy_i + zk_i;\ k=1,\ i=1\ \ldots,\ n$$

Здесь конечная продукция разделена на непроизводственное потребление zy_i и капитальные вложения zk_i.

Коэффициенты полных норм расхода для выпуска единицы конечной продукции $B(\beta_{ij})$ определяются из матрицы прямых норм расхода $A(\alpha_{ij})$:

$$B = (E - A)^{-1}$$

Все затраты энергии (прямые и косвенные), связанные с выпуском продукции отраслей, описываются матрицей $C(\sigma_{ij})$:

$$C = B - E = (E - A)^{-1} - E$$

При этом показатели $\sigma_j = \sum_{f=1}^{n} \sigma_{ij} = \beta_j - 1$ можно интерпретировать как коэффициенты полной энергоемкости единицы конечной продукция *j*-й отрасли. Коэффициенты полных затрат β_j и косвенных затрат σ_j определяют стоимость общественного продукта в энергетических единицах и характеризуют эффективность использования энергии в отраслях.

Таблица 4. Матрица межотраслевых потоков электроэнергии в СССР в 1986 г., млрд кВт·ч

Отрасли	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Итого по пр-сти	zy_i	zk_i	z_i
1.Электроэнергетика	7,7	5,8	1,7	0,01	6,3	9,4	12,3	13,4	2,9	4,9	2,8	3,1	2,0	72,8	29,1	8,0	110,0
2. Нефтегазовая промышленность	12,0	20,9	0,07	0,03	1,9	0,7	3,6	3,2	1,1	2,6	0,3	1,6	0,3	48,7	9,9	29,8	88,5
3. Угольная промышленность	5,4	0,01	24,0	0,01	5,7	0,11	0,1	0,4	0,2	0,4	0,08	0,3	0,1	22,0	2,8	2,1	27,0
4. Прочая топливная промышленность	0,3	0,01	0,01	0,25	0,01	0,01	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,74	0,1	0,3	1,2
5. Черная металлургия	0,1	0,1	0,2	0,02	32,2	1,2	1,93	33,5	0,7	3,8	0,1	0,5	0,1	75,0	2,1	19,4	96,5
6. Цветная металлургия	0,7	0,04	0,01	0,01	7,3	62,1	4,6	5,09	0,2	0,6	0,1	0,6	3,0	130,0	3,7	9,1	143,0
7. Химия и нефтехимия	0,3	1,1	0,5	0,07	1,3	1,4	46,9	24,9	3,7	2,7	13,9	2,1	2,1	101,0	31,0	53,2	186,0
8. Машино-строение	0,8	0,3	0,5	0,02	1,4	0,06	2,1	54,6	1,2	0,8	0,5	0,8	0,2	63,7	25,3	113,0	203,0
9. Лесная промышленность	0,03	0,03	0,3	0,01	0,1	0,1	0,1	3,1	12,0	0,6	0,4	1,7	0,8	21,2	10,2	13,0	44,5
10. Пром-ть строительных материалов	0,04	0,01	0,1	0,01	0,14	0,14	0,5	2,1	0,6	11,4	0,1	0,8	0,1	16,2	6,0	52,2	74,5
11. Легкая промышленность	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,03	0,4	0,6	0,3	0,08	17,5	0,3	0,2	19,6	21,0	1,8	42,5
12. Пищевая промышленность	0,01	0,01	0,01	0.01	0,01	0,01	0,3	0,01	0,02	0,02	0,2	11,0	0,4	11,7	33,0	1,5	46,5
13. Прочие отрасли промышленности	0,25	0,07	0,06	0,01	0,07	0,04	0,2	0,9	0,11	0,14	0,1	0,6	2,3	5,2	10,3	15,9	31,5
Итого: затраты по промышленности	28,0	28,6	28,0	0,4	56,7	75,6	73,3	187,0	24,0	28,5	36,4	21,0	12,0	600,0	185,0	320,0	1094,0
Амортизация	15,0	15,2	6,4	0,4	12,5	6,4	15,6	49,0	8,2	9,8	5,6	12,0	4,4	162,0	—	—	—
Сельское хоз-во	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,8	65,0	5,6	80,7	71,2	—	—
Транспорт	0,2	29,9	6,0	0,1	7,5	2,3	6,3	14,7	7,6	21,5	3,2	8,1	1,6	109,0	18,1	—	—
Персонал	5,1	2,2	7,5	0,6	8,1	4,6	17,5	96,6	9,9	13,4	29,8	18,0	1,2	224,0	—	—	—
Итого: затраты электроэнергии	49,0	76,1	48,0	1,6	85,0	89,0	112,3	348,0	49,0	73,3	85,0	123	25,0	1167,0	—	—	—

В данной работе используется статическая схема отчетного МОБ. Она представляет собой как бы «мгновенный снимок» экономики. Мы также будем рассматривать экономику с простым воспроизводством, считая такой подход первым приближением к адекватному описанию расширенного воспроизводства в динамической модели МОБ с временными лагами [Гершензон, 1983; Кононов, 1988]. В этом случае производственные капитальные вложения равны амортизации основных фондов $\alpha \cdot zk$ (табл. 2), где α — доля производственных капитальных вложений в их общем объеме (α≈0,4 в СССР в 1980-х гг.).

Для полноты анализа отдельными строками учитываются энергозатраты в сельском хозяйстве, на транспорте и энергозатраты на работающих в отраслях промышленности, состоящие из энергии, расходуемой на непроизводственное потребление и капитальное строительство в непроизводственной сфере: $zy+(1-\alpha)\cdot zk$. Полные затраты энергии z_j в промышленных отраслях по классификации МОБ определяются следующим образом:

$$z_j = \sum_{i=1}^{n} z_{ij} + za + zt + zy + zk$$

С применением описанного выше подхода была рассчитана матрица межотраслевых потоков электроэнергии за 1986 г. (табл. 4). Исходная матрица МОБ в стоимостном выражении была получена в результате обработки межотраслевого баланса СССР за 1973 г. [Народное хозяйство ..., 1974] путем его агрегирования (до 13 отраслей) и пересчетом полученных показателей на 1986 г. с учетом темпов роста производства в каждой из укрупненных отраслей.

На основе матрицы межотраслевых потоков электроэнергии z_{ijk} и матриц потоков других энергоресурсов z_{ijk} (k — номера отраслей в классификации агрегированного МОБ, производящие нефть, газ, уголь и прочие энергоресурсы, k = 2, 3, 4) были рассчитаны полные энергоемкости $\sigma_{эн}$. [кг у. т./руб] и электроемкости $\sigma_{эл}$ [кВтч/руб] по формулам: $\sigma_{jk} = z_{jk} / x_{(i=j)}$ где j = 1, …, 13; k=1, 2, 3, 4; $x_{(i=j)}$ — выпуск продукции отрасли i, $i=j$ в стоимостной форме, z_{jk} — полный расход k-го энергоресурса в отрасли j (табл. 5).

Таблица 5. Энергоемкость по отраслям промышленности СССР, 1986 г.

Показатели	Отрасли													в сред. по промсти
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Энергоемкость $\sigma_{эн}$ (кг у. т/руб)	5,26	2,62	4,48	3,31	3,05	2,23	2,21	1,36	1,34	2,06	0,46	0,45	0,78	1,49

Рассчитанные показатели имеют смысл коэффициентов пересчета межотраслевых потоков в стоимостной форме в потоки энергии, воплощенной продукции. Эти показатели отражают действующую систему оптовых цен, что является неравномерным при энергетическом анализе производства. Это также приводит к известным трудностям при управлении процессами в экономике. Учитывая объемы про-

изводства отраслей x_i, можно построить зависимость энергопотоков E_i от электроемкости, производимой продукции $\sigma_{эл}$ (рис. 2).

В странах с рыночной экономикой система оптовых цен в большей степени сбалансирована с полными энергозатратами, что хорошо иллюстрируется данными по Великобритании [Wright ,1975.], основанными на межотраслевом национальном балансе (рис. 3).

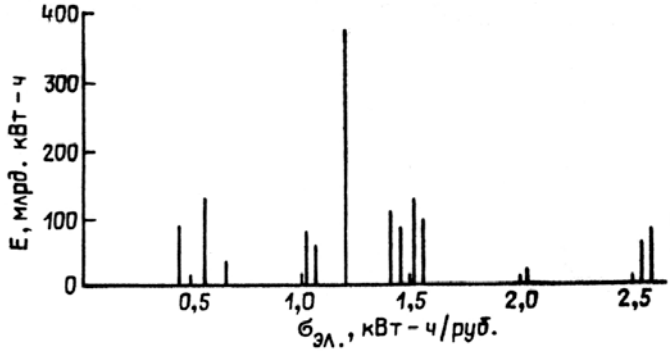


Рис. 2. Распределение энергопотоков по электроемкости продукции $E(\sigma_{эл})$, СССР, 1986.

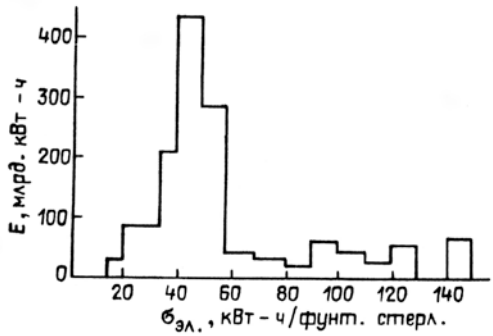


Рис. 3. Распределение энергопотоков по электроемкости продукции $E(\sigma_{эл})$, Великобритания, 1975 г.

Распределение товарной массы имеет хорошо выраженный пик с дисперсией ≈10% от среднего значения, что свидетельствует об адекватном отражении полных энергозатрат в рыночной системе цен. Дисперсия распределения $E(\sigma)$ для СССР составляет 50% от среднего значения. Различный вид гистограмм распределения (рис. 2 и рис. 3) объясняет различным числом отраслей классификации, выбранным для анализа (100 и 13, соответственно).

Большой интерес представляет применение метода определения полных энергозатрат в отраслях энергетики. Различные способы производства энергии могут быть оценены с единой позиции энергетической эффективности данного способа. Если W_1 — полные затраты энергии создание и функционирование энергообъекта,

а W_2— энергия, производимая энергообъектом в течение всего срока его службы, то безразмерный коэффициент энергоотдачи объекта можно представить в виде соотношения: $\eta = W_2/W_1$

Приведенное соотношение проиллюстрировано на рис. 4.

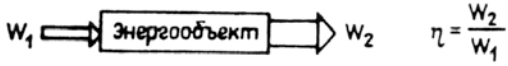


Рис. 4. Коэффициент энергоотдачи

Чем больше η, тем эффективнее производство энергии в отрасли, или на отдельном энергообъекте. При $\eta = 1$ полезная энергия не производится.

Применение метода межотраслевого баланса гарантирует учет всех производственных связей энергетических отраслей. При таком подходе вычисляются полные энергозатраты, средние по отрасли. В МОБ укрупненной классификацией возникает проблема дезагрегирования укрупненной отрасли электроэнергетики по способам производства на ТЭС, ГЭС, АЭС. Для каждого способа производства электроэнергии существуют как свои специфические, так и общие (для различных типов электростанций) нормы затрат, что необходимо учитывать при определении коэффициента энергоотдачи η для каждого способа производства.

При подробной классификации МОБ с разделением энергопроизводящих отраслей на основные типы производства энергоресурсов эта проблема решается автоматически. Полученные данные по полным энергозатратам и коэффициенту энергоотдачи являются базовыми при анализе эффективности отдельной конкретной электростанции. Такого безразмерный интегральный показатель, как коэффициент энергоотдачи η, является хорошим критерием для оценки сравнительной эффективности электростанций и способов производства энергии, а также при долгосрочном прогнозировании.

С помощью описанного выше метода был определен коэффициент энергоотдачи для тепловых электростанций (ТЭС), представляющий базовую технологию электроэнергетики СССР. Схема энергопотоков ТЭС представлена на рис. 5, данные относятся к 1986 г. На схеме представлен «единовременный срез» работы отрасли. Коэффициент энергоотдачи $\eta \approx 5$ в среднем по ТЭС (без разделения на используемые виды топлива).

Из приведенной схемы видно, что энергетически более эффективными должны быть системы, не имеющие громоздкий топливный цикл. Это солнечные электростанции (СЭС) и ГЭС, использующие возобновляемые энергоресурсы. Второе направление повышения энергоотдачи переход от централизованного принципа производства энергии к обеспечению потребностей в энергии посредством «мягких» децентрализованных энергосистем малой и средней мощности [Lovins, 1977], которые значительно уменьшают потери и наиболее эффективно решают экологические проблемы.

В работе [Алексеев, Синюгин, 1990] был определен коэффициент энергоотдачи для ядерных энергоблоков ВВЭР-1000 и РБМК-1000 ($\eta \approx 4$ для обоих блоков). При анализе учитывались затраты на топливный цикл, специфические для ядерной энергетики. Топливный цикл в расчетах был разомкнут, срок службы энергоблока — 30 лет, последующий демонтаж и захоронение отходов не учитывалось, коэффициент использования мощности $\varphi = 0{,}7$. Как известно, такие энергоблоки в ядер-

ной энергетике СССР являются базовыми и составляют более 90% ее установленной мощности. Более низкий коэффициент энергоотдачи (η≈4) ядерных блоков по сравнению с традиционными ТЭС (η≈5) свидетельствует о меньшей энергетической эффективности ядерного топливного цикла по сравнению с топливным циклом ТЭС. При интенсивном развитии ядерной энергетики и при постоянном вводе новых мощностей коэффициент энергоотдачи снижается по сравнению с максимальным значением для отдельного энергоблока за 30 лет работы (η≈4). С учетом ввода новых мощностей в работе [Алексеев, Синюгин, 1990] был предвычислен коэффициент энергоотдачи ядерно-энергетического комплекса СССР на 1990 г. Он примерно равен двум, это означает, что 50% электроэнергий, выработанной этим комплексом к 1990 г., пошло на собственные нужды, а остальные 50% — потребителям, не связанным с комплексом.

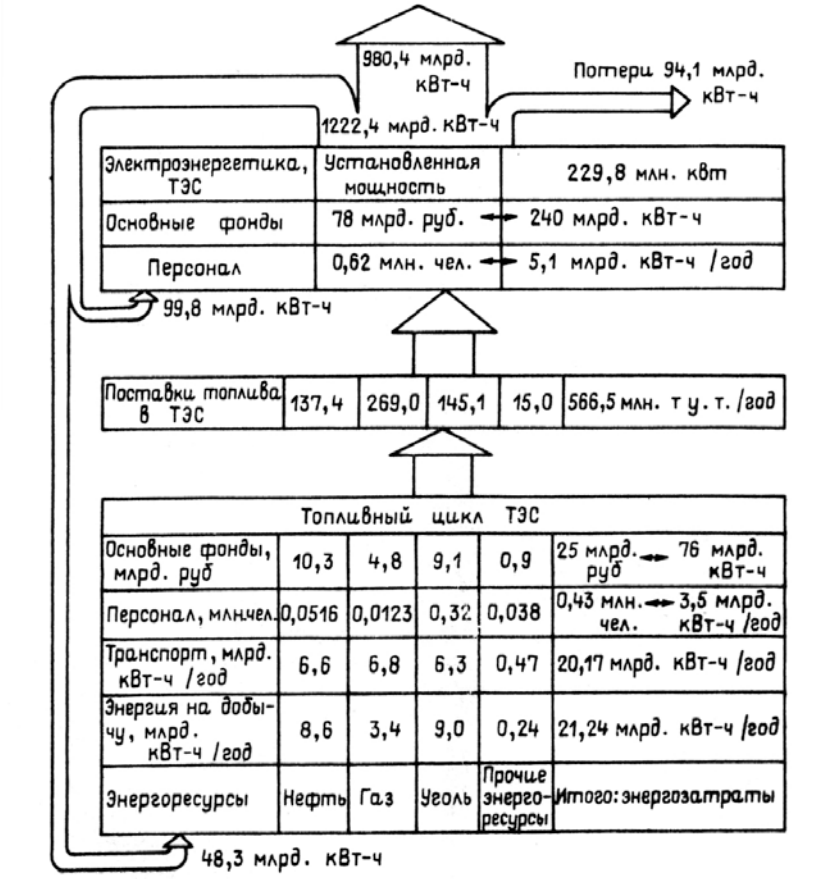


Рис. 5. Схема энергопотоков в отрасли «Электроэнергетика» (ТЭС), 1986 г.

В заключение отметим, что составление энергетических балансов и энергетический анализ являются эффективным средством исследования экономики. И поэтому нельзя не согласиться с мнением президента Римского клуба Александра Кинга: «…экономика должна координироваться энергетическими, а не денежными величинами, деньги — понятие относительное и преходящее, энергия же фундаментальна и вечна» [http://www.apocalyptism.ru/Club-of-Rome.htm].

Литература

Аганбегян А.Г., Гранберг А.Г. Экономико-математический анализ межотраслевого баланса СССР. М.: Мысль, 1968.

Алексеев В.В., Синюгин О.А. Об экономических аспектах ядерной энергетики / Труды 1-й Всесоюзной конференции Ядерного общества СССР. – Обнинск, 1990.

Вартазарова Л.С., Васильев В.И., Иванилов Ю.П., Никифоров Л.Г. Экономика СССР 1960-1985 гг.: эконометрический анализ. – М СССР, 1988.

Гершензон М. А. Моделирование динамики межотраслевых связей энергетики. М.: Наука, 1983.

Кононов Ю.Д., Корнеев А.Г., Ткаченко В.З. Сроки реализации крупных энергетических программ (методические подходы к оценке инерционности). – СЭИ АН СССР, 1988.

Мелентьев Л.Л. Системные исследования в энергетике. М.: Наука, 1983.

Народное хозяйство СССР в 1973 г. – М: Стат. ежегодник ЦСУ СССР, 1974.

Одум Г., Одум Е. Энергетический базис человека и природы. М.: 1978.

Троицкий А.А. Энергетика и электрификация СССР за 70 лет: обзорная информация. М.: Информэнерго, 1987.

Lovins A.B. Soft energy path: toward a durable peace. – Harmondsworth, Penguin, 1977.

Mesarovic M. and Pestel E. Mankind at the Turning Point: The Second Report to the Club of Rome. New-York: E. P. Dutton and Co. Inc., 1974.

Wright P.J. The natural resource requirements of commodities // Applie mics. – 1975 – № 7 – P. 31—39.

Опубликовано в сборнике Трудов ВНИИ системных исследований. 1992. №3. С.23-30.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ

В.В.АЛЕКСЕЕВ, О.А.СИНЮГИН

Топливно-энергетический комплекс (ТЭК) является необходимым и важнейшим элементом экономики любого государства. Как известно, слово *«evepyela»* в переводе с древнегреческого означает деятельность любого рода. Для того чтобы такая деятельность была возможна во всех секторах экономической системы, базовая подсистема экономики — ТЭК — производит и поставляет потребителям высококалорийное топливо с низкой энтропией *S*. Приток энергии в экономику служит для установления и поддержания упорядоченности существующего материального мира. Потребляемая энергия идет на производство высококалорийных материалов и на создание высокоэнергетических структур, при этом, в силу II закона термодинамики, происходит деградация качественных энергоресурсов, повышение их энтропии *S* и выброс образующихся отходов в окружающую среду. Таким образом, любые процессы в экономической системе и в окружающей среде обладают своей энергетикой. Анализ антропогенных и биосферных энергопотоков в их единстве и взаимосвязи дает возможность универсального подхода к многочисленным экологическим проблемам.

В России ТЭК является наиболее «массивным» сектором экономики. Производство первичных энергоресурсов в бывшем СССР дается в следующей табл. 1. Итого, было произведено 2214.0 млн т. у. т. топливных энергоресурсов и 222 млрд кВт ч первичной электроэнергии. Доля Российской Федерации в ТЭК бывшего СССР превышала 80%. В конце 80-х гг. добыча угля в бывшем СССР составляла 16%, нефти — 21%, газа — 38% от мировой добычи, при том, что валовой национальный продукт не превышал, по-видимому, 6-7%. Эти цифры наглядно характеризуют масштабы развития ТЭК бывшего СССР и России.

Таблица 1. Производство первичных энергоресурсов в бывшем СССР в 1990 г.

	млн т у.т.		млн т у.т.		млрд кВт·ч
Уголь	425.5	Сланцы	8.6	Гидроэлектро энергия	122
Нефть	816.2	Торф	3.7		
Газ	941.1	Дрова	18.9	Атомная энергия	110

Подъем советской экономики в докризисный период был возможен только на базе опережающего развития топливно-энергетического комплекса страны. В 80-е гг. удельный вес основных производственных фондов ТЭК в народном хозяйстве составлял 13-14%, в промышленности — 27-29%. Доля капитальных вложений была выше — 19% от вложений в народное хозяйство страны в целом, и 45-47% от вложений в промышленность. В то же самое время на внутреннем рынке удельный вес товарной продукции ТЭК в конце 80-х гг. был на уровне 10-12% в общем объеме промышленной продукции. Такая недооценка энергоресурсов в системе национальной экономики приводила к огромным неоправданным затратам невозобновимого ресурса — свободной энергии — и к неэффективному, экстенсивному развитию всех секторов экономики. На этом пути были сильно истощены запасы

высококачественных энергоресурсов, значительная часть которых пошла на экспорт. Доля экспорта энергоресурсов в общем экспорте в денежном выражении в 1985 г. по бывшему СССР составляла 52.6%, а в 1990 г. упала до 41.4% (сказалось снижение мировых цен на нефть). За счет распродажи невосполнимых ресурсов можно было сохранять нездоровую структуру экономики. Такое положение во многом имеет место и в настоящее время в экономике Российской Федерации.

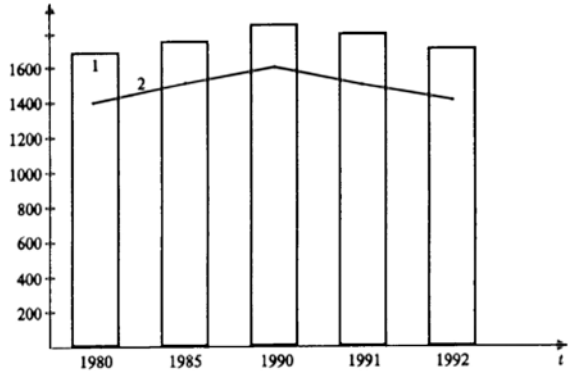


Рис. 1. Производство и потребление топливно-энергетических ресурсов в России, млн т у.т.; 1 — производство, 2 — потребление

Однако такое положение не может продолжаться долго, и после 20- 30 лет разработки наиболее выгодных месторождений угля, нефти и газа экономическая эффективность ТЭК начала снижаться. Себестоимость продукции в целом по комплексу в 1990 г. по сравнению с 1985 г. выросла в 1.3 раза, капиталоемкость — в 1.4 раза, фондоотдача снизилась на 23%. А с 1990 г. происходит снижение и производства и потребления топливно-энергетических ресурсов в России, о чем дают представление рис. 1 и рис. 2.

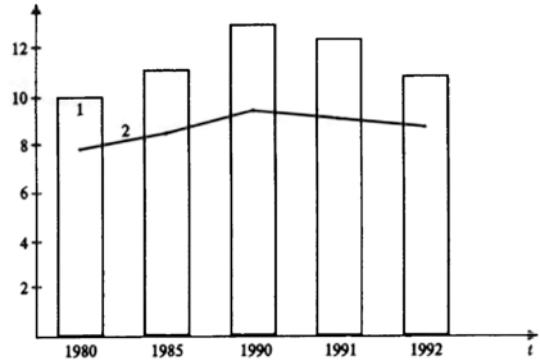


Рис. 2. Производство и потребление топливно-энергетических ресурсов на душу населении в России, т. у. т./чел.; 1 — производство, 2 — потребление

Такая политика активного освоения наиболее легкодоступных ресурсов и валового производства ТЭР привела к тому, что ТЭК РФ стал самым сильным источником антропогенного воздействия на окружающую среду. С ним связано более 70% вредных выбросов в атмосферу, 20% потребления воды и около 40% всех поступающих в водоемы загрязненных вод, а также 70% ежегодно нарушаемых горными работами земель. В табл. 2 дается более детализированная картина воздействия ТЭК на окружающую среду и ее динамика в 80-х гг. В абсолютных величинах, для ТЭК бывшего СССР в 1990 г., это — 6.35 млн т. золы, 8.87 млн т. окислов серы, 2.40 млн т. окислов азота и 700 млн т. окиси углерода. Помимо этого, в окружающую среду выброшено порядка $4 \cdot 10^{10}$ ГДж низкопотенциального тепла при среднем коэффициенте полезного использования топлив 37% и израсходовано до 3 млрд т. кислорода атмосферы. Эти цифры характеризуют только наиболее очевидный экологический ущерб, наносимый ТЭК.

Полный спектр воздействия ТЭК на окружающую среду очень широк. Так, предприятия комплекса вызывают электромагнитное, звуковое, тепловое, механическое и химическое загрязнение атмосферы, потребляют кислород и способствуют изменению свойств микроклимата и климата в целом. Они используют значительное количество чистой воды гидросферы и загрязняют ее тепловым, механическим и химическим путем. Влияние ТЭК на литосферу включает в себя: отторжение земель, химическое загрязнение и деградацию почв. По многим показателям такого негативного влияния в настоящее время даже не существует надежных данных.

Итак, для крупномасштабной современной энергетики характерна незамкнутость производственных циклов добычи и использования топлив. Выбросы энергетических систем, в принципе, могут быть включены в хозяйственный оборот в виде сырья для других производств, но пока что примеры такого рода единичны.

Таблица 2. Экологическая характеристика работы ТЭК бывшего СССР

Годы	Выбросы				Водоотведение	
	твердые вещества	сернистый газ	окислы азота	окись углерода	нормативно очищенных	загрязненных
ТЭК в целом в % от всего народного хозяйства						
1980	41.7	56.7	61.3	8.8	10.8	7.5
1985	40.7	49.3	65.0	9.8	10.1	4.2
1990	36.5	46.3	68.3	16.7	14.7	10.1

Положение в топливно-энергетическом комплексе России, а, впрочем, и всего мира, можно описать одним словом, как растрату ценнейших невозобновляемых природных ресурсов в течение короткого периода времени. Так, к 1989 г. в мире было потреблено порядка 76 млрд т. сырой нефти, более 44 трлн. $м^3$ природного газа. В том числе, за последние 30 лет потребление нефти составило 66млрдт., газа — 34 трлн.$м^3$. Угля за последние 100 лет добыто более 150 млрд т., причем 98 млрд т. — за последние 30 лет.

Можно указать примерные сроки истощения используемых традиционных энергоресурсов. Разведанные запасы угля, оцениваемые в 7000 млрд т., при современных тенденциях в энергопотреблении истощатся к 2500 г., разведанные запасы нефти, оцениваемые в 800 млрд т., — к 2100 г., запасы природного газа (150000 млрд $м^3$) — к 2070 г., запасы урана (0.8 млн т.) — к 2050 г. (без учета реакторов-размножителей).

Традиционная энергетика уничтожает ценнейшее сырье для химического синтеза. Еще 110 лет назад выдающийся русский химик Д. И. Менделеев в цикле статей «По нефтяным целям» так говорил об этом: «... я против того учения, что наша нефть есть истинный и выгодный заменитель каменного угля. Можно топить и ассигнациями.» Однако, несмотря на очевидные преимущества применения нефти как сырья для химической промышленности органического синтеза, с этой целью расходуется только одна десятая часть (400 млн т.) добываемой ежегодно в мире нефти. Остальные девять десятых идут на удовлетворение энергетических нужд человечества. Точно такое же положение и с природным газом — более 90% от всей его добычи расходуется как топливо на тепловых электростанциях, промышленных предприятиях и в быту.

Бездумной растрате углеводородного сырья в нашей стране способствовали заниженные цены на продукцию ТЭК. Наращивание валовой добычи — это основной принцип производства в 1950-1980-х гг. в ТЭК бывшего СССР и России. Нужно ли говорить, что цены на энергоресурсы никогда не учитывали затраты на охрану окружающей среды, на восстановление качества среды, которое постоянно ухудшается в результате деятельности комплекса. Одной из основных причин недоучета экологической составляющей в технико-экономических показателях ТЭК является тот факт, что стоимостные меры не являются внутренне присущими характеристиками биосферы и окружающей среды. Исследователи сталкиваются со значительными трудностями при формулировке биосферных и экологических проблем в стоимостных единицах.

С нашей точки зрения и экономика, и окружающая среда являются открытыми системами, которые существуют и развиваются только при наличии притока свободной энергии. Например, основная масса национального богатства — основные фонды — представляет собой свободную энергию, воплощенную в средствах производства. Они находятся в неравновесном состоянии с окружающей средой. По II закону термодинамики в системе происходят процессы, приводящие ее в равновесие с окружающей средой — происходит амортизация основных фондов. Для функционирования экономики необходим также постоянный приток свободной энергии в виде эксплуатационных затрат. Непроизводственное потребление людей происходит в форме непосредственного потребления энергоресурсов, энергии, содержащейся в продуктах питания, а также в форме потребления других товаров и услуг, в которые воплощена энергия экономической системы.

Все эти процессы связаны с состоянием окружающей среды, и масштабы их влияния нарастают, так как человечество располагает все большим количеством свободной энергии. Поэтому одним из основных инструментов анализа экономики и ее воздействия на окружающую среду является анализ их энергетики, т. е. аккумуляции и диссипации свободной энергии, сопровождающие процессы в экономических и природных системах. Эта мысль не нова, здесь мы хотели бы еще рал ее подчеркнуть и развить.

Нашим великим соотечественником, академиком В. И. Вернадским в 1928 г. была поставлена проблема энергетического выражения естественных производительных сил, их количественного учета в энергетических единицах измерения: «Мы не имеем еще общей единицы для количественного сравнения всех естественных производительных сил, или, вернее, мы не умеем все их свести к этой единой единице, не можем одной единицей, например, выразить добычу металлов и горючего. А между тем необходимо и возможно свести к единой единице все; только при этом условии можно подойти к полному количественному учету той потенциальной энергии страны, которая может дать удобное для жизни представление о пределах заключающегося в данной стране богатства. Только при этом условии можно подойти к энергетической картине окружающей человека природы, с точки зрения потребностей его жизни» [Вернадский, 1928].

В отличие от времени, когда В. И. Вернадский ставил подобные задачи, в настоящий момент существуют достаточно хорошо развитые системы эконометрической и экологической статистики. И энергетический анализ может быть эффективно применен при решении экологических проблем, плохо формализуемых по причине разнородности характеристик природных и созданных человеком объектов. Анализ энергопотоков в природных и экономических системах, а также связанных с ними изменений энтропии S позволяет количественно измерять антропогенные воздействия на окружающую среду.

В топливно-энергетическом комплексе энергетические единицы являются естественными натуральными измерителями его продукции. Продукцией ТЭК является свободная энергия — та часть общей энергии, содержащейся в энергоресурсе, которая может быть направлена на совершение полезной работы или превращена в другие формы энергии. При этом, свободная энергия — это невозобновимый ресурс, она может быть использована только один раз — это прямое следствие II закона термодинамики. Общая же энергия, в соответствии с I законом термодинамики, не создается и не уничтожается. В конечном итоге источниками свободной энергии для Земли служат: 1) солнечное излучение (в малой степени также космические излучения), 2) гравитационное взаимодействие с телами Солнечной системы, 3) радиоактивные элементы земных недр.

В технической термодинамике свободную энергию называют также ***эксергией*** ***ε.*** Эксэргия термодинамической системы — это максимальная работа, которую система производит при обратимом переходе в состояние полного равновесия с окружающей средой. Для замкнутой системы она имеет следующее выражение [Бэр, 1977]:

$$\varepsilon = H - H_0 - T_0 (S - S_0) \qquad (1)$$

где $H = U + pV$ — энтальпия системы (U — внутренняя энергия, p — давление, V — объем) при начальных параметрах, H_0 — энтальпия системы при параметрах окружающей среды, S, S_0 — энтропия системы, соответственно, при начальных параметрах и параметрах окружающей среды, T_0 — температура среды. Можно сказать, что эксэргия — это неограниченно превратимая энергия. Тепло и внутренняя энергия системы — это ограниченно превратимая энергия, их преобразование в эксэргию ограничивается II началом термодинамики. Окружающая среда обладает энергией, но эта энергия непревратима в другие виды, — эксэргия окружающей среды равна нулю.

Вещества, находящиеся в неравновесном состоянии с атмосферой, могут служить источниками эксергии — это ископаемые топлива (нефть, газ, уголь, уран). Различные энергоресурсы приводятся к одному количественному измерению по их относительной работоспособности (эксергии). Разные энергоносители обладают различным эксергетическим содержанием, которое определяется степенью неравновесности вещества в данном состоянии. Эксергетическое содержание топлив примерно равно их низшей теплоте сгорания. Такие виды энергии, как электроэнергия и механическая энергия, являются 100% эксэргией. Поэтому эксэргию можно измерять, например, в [кВт·ч] электроэнергии. Эта единица очень удобна и наглядна в экономических системах.

Таким образом, мы видим, что продукция ТЭК 1) универсальна, так как она поступает и потребляется во всех секторах народного хозяйства и без нее невозможно их существование, 2) однородна — измерима в одних единицах, например, [кВт·ч], [Дж]. Эти же единицы измерения характерны для всех без исключения природных процессов.

При измерении результатов и затрат в ТЭК в энергетических единицах можно определить интегральный показатель энергетической эффективности способа производства энергии или объекта, производящего энергию — коэффициент энергоотдачи η. Коэффициент энергоотдачи η — это отношение произведенной энергообъектом свободной энергии W_2 к полным затратам свободной энергии на его создание и функционирование W_1:

$$\eta = W_2 / W_1. \qquad (2)$$

Этот коэффициент является безразмерным. Разность $W_2 - W_1 = W_{net}$ представляет собой энергию-нетто, ради которой существует и работает топливно-энергетический комплекс. Показательной является зависимость между полной произведенной энергией и энергией-нетто:

$$W_2 = W_{net} \cdot \eta / \eta - 1 \qquad (3)$$

Чем ближе η к единице, тем больше энергозатраты для получения одного и того же количества энергии-нетто и тем больше суммарное давление энергокомплекса на окружающую среду.

Определение величины W_2 не вызывает затруднений. Основная трудность состоит в определении полных энергозатрат W_1. Затраты ТЭК относятся ко многим отраслям экономики. Для полного учета связей ТЭК, как подсистемы народного хозяйства, с остальными секторами экономики в работах авторов [3], [4] было предложено использовать такую модель макроэкономической статистики, как межотраслевой баланс производства и распределения продукции народного хозяйства страны (МОБ). Отчетные МОБ обычно составляются в стоимостных единицах. Но для определения затрат W_1 в энергетических мерах необходимо перейти от стоимостных к энергетическим единицам в МОБ и построить межотраслевой баланс потоков энергии. Межотраслевой баланс потоков энергии в народном хозяйстве страны представляет собой систему показателей межотраслевого обмена потоками энергии, воплощенной в продукции отраслей по принятой классификации. Методы построения и энергетического анализа такого МОБ были даны в работах [Алексеев, Синюгин, 1991; Синюгин 1994].

В этих работах использовались отчетные МОБ бывшего СССР за период с 1980 г. по 1990 г. в укрупненной классификации из 17 отраслей. Они представлены матрицей межотраслевых потоков $X(x_{ij})$, составляющей I квадрант МОБ (производст-

венный оборот), векторами, конкретизирующими использование конечной продукции $Y(y_{ij})$, (II квадрант МОБ), векторами амортизации и чистой продукции, отражающими добавленную стоимость $V(v_j)$, (III квадрант МОБ), и IV квадрант показывает перераспределение ресурсов в непроизводственной сфере (табл. 3).

Основное уравнение МОБ выражает связь и общий баланс его показателей:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} X_j + y_i = X_i \ (i = 1,...,n), \qquad (4)$$

где $a_{ij} = x_{ij} / X_j$, $(i,j = 1, \ldots, n)$ – коэффициенты прямых затрат отрасли $\boldsymbol{i}$ на производство единицы продукции отрасли $\boldsymbol{j}$, X_i — валовая продукция отрасли i.

В принятой классификации ТЭК был представлен четырьмя укрупненными отраслями: 1) электроэнергетика, 2) нефтегазовая промышленность, 3) угольная промышленность, 4) прочая топливная промышленность (торф, сланцы). После построения МОБ потоков энергии Zij определялись полные энергозатраты W_1 в этих отраслях, которые равны сумме энергетических эквивалентов полной материалоемкости, полной трудоемкости и полной фондоемкости продукции отраслей ТЭК. При этом подсчитывались не только прямые, но и все косвенные затраты других отраслей народного хозяйства. Возможность такого учета дает сама схема МОБ.

При разрешении уравнения (4) относительно вектора валового выпуска $\vec{X}$: $\vec{X} = (\boldsymbol{E} - A)^{-1} \vec{Y}$, возникает матрица коэффициентов полных затрат $\boldsymbol{B} = (\boldsymbol{E} - A)^{-1} = (b_1 ij)$, продукции отрасли i на производство единицы продукции отрасли $\boldsymbol{j}$. Так как $\|A\| < 1$ ($\|A\|$ — норма матрицы A) [Аганбегян, Гранберг, 1968], то мы можем наглядно представить схему формирования полных затрат следующим разложением в ряд:

$$B = \underbrace{E + A}_{\text{прямые затрат}} + \underbrace{A^2 + A^3 + \ldots + A^m + \ldots}_{\text{косвенные затраты}} \qquad (5)$$

Таблица 3. Схема межотраслевого баланса в стоимостной форме

Отрасли	1 . . . ***j***. . . n	Конечный продукт	Валовой продукт
1 : ***i*** : ***n***	I X_{ij}	II Y_i	X_i
Добавленная стоимость	III V_j	IV	
Валовой продукт	X_j		

На рис. 3-6 представлены результаты энергетического анализа отраслей ТЭК бывшего СССР в 1980-1990 гг.

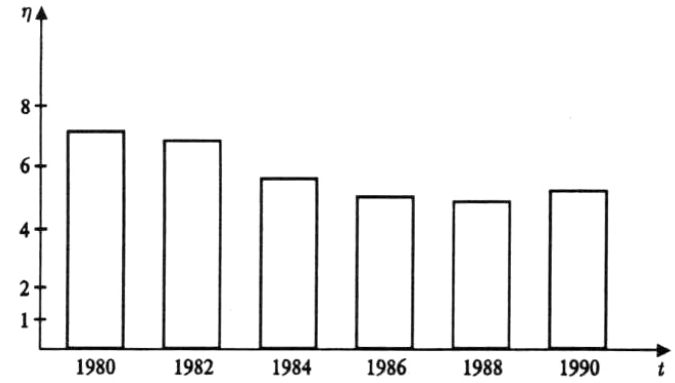


Рис. 3. Динамика коэффициента энергоотдачи η в электроэнергетике СССР в 1980-1990 гг.

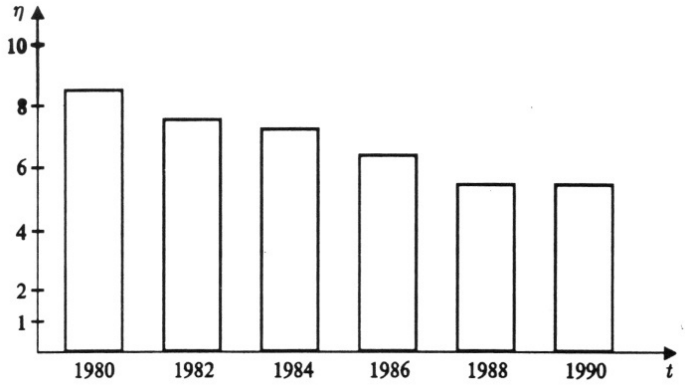


Рис. 4. Динамика коэффициента энергоотдачи η в нефтегазовой промышленности бывшего СССР в 1980-1990 гг.

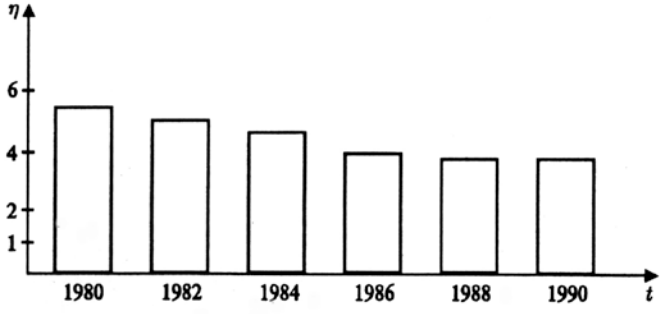


Рис. 5. Динамика коэффициента энергоотдачи η в угольной промышленности бывшего СССР в 1980-1990 гг.

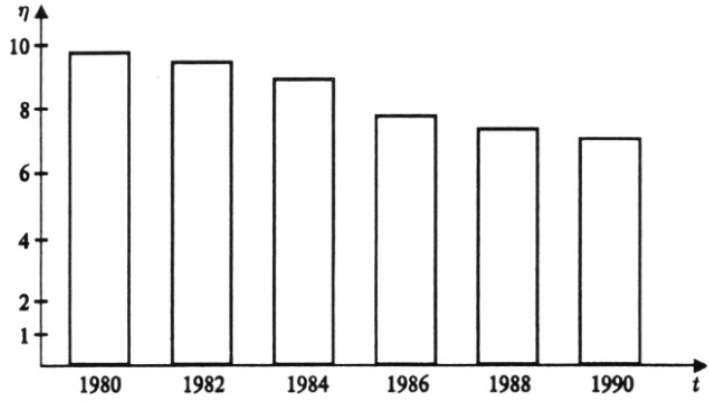


Рис. 6. Динамика коэффициента энергоотдачи η в прочей топливной промышленности бывшего СССР в 1980-1990 гг.

По этим результатам видно, что эффективность использования убывает по всем основным используемым ТЭК традиционным энергоресурсам. В связи с таким положением возникает вопрос — что же можно считать энергоресурсом и насколько он является эффективным с точки зрения существующей структуры экономики? В работе [Синюгин, 1994] предлагается следующее определение энергоресурса: «Энергоресурс — это вещество или процесс, которые при использовании их для производства свободной энергии в технологических условиях данной экономики обладают коэффициентом энергоотдачи $\eta > 1$».

Чем большим коэффициентом энергоотдачи обладают энергоресурсы, тем более эффективно их использование в топливно-энергетическом комплексе. В этом случае они содержат в себе значительную свободную энергию и находятся в сильно неравновесном состоянии по отношению к окружающей среде. Мерой такого неравновесия в данных экономических условиях и является энергоотдача. И вообще, ресурсы, используемые в экономике, должны максимально отличаться по своим характеристикам от окружающей среды, иначе их разработка невыгодна с точки зрения энергетики процессов. Энергоресурсы с большим значением коэффициента энергоотдачи называются высококачественными.

Описанный выше подход был реализован не только на макроэкономическом уровне укрупненных отраслей ТЭК, но и на микроэкономическом уровне отдельных предприятий энергетики. Авторами были получены значения коэффициентов энергоотдачи η для типичных гидро-, тепло- и атомных электростанций в условиях экономики СССР конца 1980-х гг. Эти данные представлены в табл. 4.

Основой для расчета этих показателей являлись сметы прямых затрат на исследуемые объекты (Pi) в стоимостном выражении по действующим оптовым ценам. Сметы затрат содержат капитальные и эксплутационные затраты. Индексом i обозначаются позиции сметы затрат по номенклатуре, соответствующей классификации отраслей используемого энергетического МОБ. В смете затрат на ГЭС не учтены убытки, связанные с затоплением земель, что объясняется неопределенностью оценок такого рода и индивидуальным характером проектов ГЭС. Для АЭС

не учтены затраты на захоронение радиоактивных отходов и демонтаж, также ввиду неопределенности стоимостных оценок такого рода.

Важность проведения оценок энергоотдачи можно проиллюстрировать на примере добычи нефти. Без специальных мероприятий из скважин удается извлечь не более 25% запасов нефти. Для увеличения отдачи нефти из пласта и повышения коэффициента нефтеотдачи применяют способ закачки воды в пласт. В процессе эксплуатации месторождений растет обводненность скважин, увеличивается отношение воды к нефти в выкачиваемой из недр жидкости, а значит, и воздействие на окружающую среду. В табл. 5 приведена зависимость энергоотдачи в зависимости от обводненности нефтяных скважин.

Таблица 4. Коэффициенты энергоотдачи ГЭС, АЭС, ТЭС СССР, 1988 г.

Тип электростанции	ГЭС	АЭС	ТЭС			
			на газе	на мазуте	на угле	
					открытой добычи	закрытой добычи
Коэффициент энергоотдачи, η	16-20	4-5	7.0	4.5	7.2	3.0

Таблица 5. Зависимость энергоотдачи от обводненности скважин, СССР, 1980-е.

Обводненность скважин (%)	50	80	90	95
Энергоотдача η	5.4	2.7	2.1	1.0

Полученные показатели энергоотдачи не содержат в явном виде величину экологического ущерба, наносимого объектами ТЭК. Это объясняется тем, что в используемые отчетные МОБ не входят данные о качестве окружающей среды и об использовании природных ресурсов.

С помощью метода межотраслевого баланса (МОБ) можно описать процесс загрязнения окружающей среды, который является неизбежным следствием любого производства. В 1970 г. нобелевский лауреат по экономике В. Леонтьев предложил модифицированную схему МОБ [Leontief, 1986]. В эту схему включаются потоки загрязняющих веществ различных типов, возникающие в отраслях по классификации МОБ, и они связываются с традиционной схемой. Это как бы пассивная констатация загрязнения среды. Необходимо также учитывать деятельность по уничтожению отходов производств и улучшению качества среды, т.е. включать охрану природы в экономическую статистику. Это — активный подход к охране окружающей среды. В этом направлении представляется возможным отразить состояние окружающей среды и использование ее как экономически значимого ресурса.

Методика МОБ позволяет произвести анализ прямого и косвенного воздействия отраслей и объектов топливно-энергетического комплекса на окружающую среду. Для этого необходимо располагать достаточно полным банком данных по выбросам всех отраслей народного хозяйства, т.е. знать матрицу A_{21}. При этом необязательно доскональное знание статистики по выбросам, минимальная инфор-

мация о загрязнениях, производимых отраслью, позволяет получать содержательные результаты.

Анализ затрат, связанных с капиталовложениями в природоохранные мероприятия, основывается на статистических данных о продукции фондосоздающих отраслей в классификации МОБ. Известно, что в конце 80-х гг. в Российской Федерации из общей суммы капиталовложений примерно 1% шел на охрану природы. В то же самое время в США этот показатель составлял 3%, а в развитых европейских странах был еще выше.

Капиталовложения K относятся к долгосрочным затратам и входят в конечное потребление по статистике МОБ (II квадрант). С течением времени основные фонды амортизируют свою стоимость и эти амортизационные отчисления входят в стоимость продукции. В МОБ они показаны в III квадранте вектором $A\ M_j\ (j = 1,..., n)$ для различных отраслей. Учитывая долю природоохранных расходов по этой статье ($\alpha = 0.01$), можно оценить абсолютные величины амортизационных расходов, связанных с охраной окружающей среды, — $\alpha \cdot A\ M_j$. Однако это — только прямые расходы.

Чтобы получить величину полных расходов $A \cdot M_i^*$, воспользуемся понятием коэффициентов полных затрат в модели МОБ. В этом случае справедлива формула полных затрат для ресурса, не входящего в производственный оборот (основных фондов, используемых в природоохранных мероприятиях):

$$AM_i^* = \sum_j AM_j (E - A_{11})^{-1}, \qquad (10)$$

где A_{11} — матрица коэффициентов прямых затрат в производственном обороте.

Таким образом, мы получили величину полных амортизационных затрат, связанных с охраной окружающей среды в отраслях по классификации МОБ.

Прямое воздействие топливно-энергетического комплекса на среду достаточно полно исследуется, в то время как косвенное влияние обычно не рассматривается. Например, часто повторяются утверждения, что возобновляемая энергетика, использующая энергию Солнца, ветра, земных недр, — это экологически чистое производство. Однако таких производств в чистом виде не бывает. Косвенные воздействия на окружающую среду, могут быть сравнимы по величине и даже превышать прямые. Поэтому очевидна необходимость полного учета всех факторов с помощью изложенной выше методики. Причем для модифицированного МОБ, так же как и для традиционной схемы, остаются справедливыми методы энергетического анализа баланса потоков энергии. На этом пути можно получить оценки энергоотдачи объектов ТЭК, включающие показатели экологического ущерба, производимого его предприятиями.

Литература

Аганбегян А.Г., Гранберг А.Г. Математический анализ межотраслевого баланса СССР. М.: Наука, 1968.

Алексеев В.В., Синюгин О.А. Энергетический анализ межотраслевых связей и энергоотдача / в сб. «Альтернативные стратегии обеспечения и использования минерального и топливно-энергетического сырья». – М.: ВНИИСИ, 1991. Вып.5. С.22-30.

Бэр Г.Д. Техническая термодинамика: теоретические основы и технические приложения. – М.: Мир, 1977.
Вернадский В.И. О задачах и организации прикладной научной работы Академии Наук СССР. – Л.: Изд-во АН СССР, 1928.
Синюгин О.А. Метод энергетического анализа в управлении отраслями и объектами топливно-энергетического комплекса. Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. эконом, наук. – М.: ИСА РАН, 1994.
Leontief W. Input-Output Economics. New York-Oxford: Oxford Univ. Press, 1986.

Опубликовано в журнале «Обозрение прикладной и промышленной математики». 1996. Т.3. №3. С.331-345.

ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В МОСКОВСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

А.А.СОЛОВЬЕВ

Рубеж 1980-х гг. ознаменовался возрождением интереса к сфере использования возобновляемых ресурсов энергии. Этому способствовали различные причины: рост потребления ископаемых энергетических ресурсов и численности населения; возрастание антропогенной нагрузки неблагоприятной для окружающей среды; развитие неустойчивости в климате; катастрофические результаты непредсказуемого использования ядерной энергии.

Сложившаяся ситуация обеспокоенности за будущее, не оставила в стороне научную общественность. Все больше внимание стали уделять разработкам экологически приемлемых источников энергии, основанных на неисчерпаемых и постоянно обновляемых природных ресурсах. В университетах и исследовательских научных центрах развитых стран начались работы по разработке методов рационального использования возобновляемых энергетических ресурсов на основе объединения знаний физики, математики, географии, биологии, химии, гуманитарных наук. В Московском университете на ряде факультетов возникали группы неформального объединения молодых ученых с постановкой инициативных проектов в области солнечной энергетики, экологии, рационального природопользования. Становилось очевидным, что нарождающиеся перемены в приоритетах научных исследований выдвигали необходимость проведения всестороннего изучения энергоносителей альтернативных традиционным источникам энергии. Атомная энергетика, продолжая технологическое совершенствование, тем не менее, под натиском нарастающих экологических требований начала сдавать сбой в темпах освоения и внедрения. Ископаемые топливные ресурсы в виде угля, нефти и газа сохраняли лидирующее положение в общем энергетическом балансе, хотя их репутация в соблюдении экологических требований, касающихся снижения выбросов двуокиси углерода, одного из источников парникового эффекта, значительно подпортилась. Гидроэнергетические ресурсы, относящиеся к неисчерпаемым природным запасам, достигли своего предельного уровня использования и оказались да-

леко не идеальными по неблагоприятным воздействиям на окружающую среду. Оставались перспективными для инновационного освоения исторически забытые, но требующие обновления требованием временем источники возобновляемой энергии в виде солнца, ветра, морских волн, геотермального тепла и биомассы.

Первые шаги в реализации новых направлений развития солнечной энергетики в нашей стране были предприняты на физическом факультете МГУ В.В. Алексеевым с коллегами, студентами и аспирантами биолого-почвенного, географического, химического факультета. Основой научных работ по расширенному применению преобразования солнечной энергии являлись, выполняемые в университете начиная с 1980 г. по межфакультетской теме исследования эффективных способов культивирования микроводорослей и переработки выращенной биомассы в газообразное топливо. В рамках реализации утвержденной государственной программы использования нетрадиционных источников энергии Государственному Комитету по науке и технике с участием Министерства энергетики поручено разработать план мероприятий по расширенному освоению солнечной энергии и организации работ по биоэнергетике. Подготовленные профильными министерствами предложения по активизации фундаментальных и прикладных исследований нетрадиционных источников энергии содержали рекомендации Правительству по созданию в Московском университете специального научного подразделения. Заместитель председателя Совета Министров СССР Б.Е. Щербина 17 апреля 1987 г. подписал постановление об организации в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова проблемной лаборатории для выполнения научно-исследовательских работ в области возобновляемых источников энергии. В исполнении этого постановления в приказе ректора МГУ академика А.А. Логунова от 6 июля 1987 г. были намечены программные решения и задачи по созданию новой лаборатории. Профессор В.А. Садовничий, в то время проректор МГУ принял активное участие в конкретной работе по организации лаборатории, направленной на решение приоритетных исследований по солнечной биоэнергетики. В МГУ была создана комиссия под руководством чл.-корр. АН СССР Е.Н.Кондратьевой, которая пришла к заключению, что для ускорения работ в биоэнергетическом направлении целесообразно создание в МГУ проблемной лаборатории фотобиотехнологии на основе группы сотрудников во главе с ведущим научным сотрудником В.В. Алексеевым. Отмечена необходимость подготовки предложений по кадровому, финансовому, материально-техническому обеспечению и определению местонахождения лаборатории в системе факультетов и кафедр университета. После завершения затянувшихся дискуссий и споров о факультете в состав, которого должна быть включена новая лаборатория, утверждения штатного расписания, установления лимитов и численности фонда заработной платы и других организационных вопросов, при содействии В.А. Садовничего и поддержке декана географического факультета, профессора Г.И. Рычагова, с 1 июля 1988 г. приказом ректора МГУ имени М.В.Ломоносова академика А.А. Логунова проблемная лаборатория возобновляемых источников энергии начала функционировать на географическом факультете. Лаборатория возобновляемых источников энергии вошла в состав организованной годом ранее на географическом факультете кафедры рационального природопользования, возглавляемой чл.-корр. АН СССР А.П.Капицей. Заведующим проблемной лабораторией возобновляемых источников энергии назначен доктор физико-математических наук В.В.Алексеев. В структуру лаборатории во-

шли три сектора: системного анализа; биоконверсии солнечной энергии и гидродинамики. Штатный состав лаборатории состоял из 25 человек, в основном сотрудников географического, физического и биолого-почвенного факультетов. Для исследовательской работы были предоставлены сооружения, находящиеся в гидрологическом корпусе МГУ. Экспериментальные лотки разных размеров, в том числе волновой канал, которые позволяли изучать режимы взаимодействия плавучих блоков биоэнергетических плантаций с волновыми и ветровыми воздействиями. Термобассейн с нагревателями и охладителями, в лабораторных условиях обеспечивал возможность воспроизведения температурных стратификаций, встречающихся в морях и водохранилищах. Буксировочный канал длиной 50 м позволял решать различные гидродинамические задачи с плавучими биоэнергетическими плантациями.

Первый этап становления исследовательской деятельности лаборатории, охвативший 1990-е гг., является, по сути, поисковым. Исследовательская деятельность лаборатории в этот период была связана с разработкой эффективного преобразования солнечной энергии фотосинтетическими агентами в биогаз. Основанием для этого служил известный факт формирования ресурсов нефти и газа благодаря фотосинтезу водорослей. Проблема состояла в том, чтобы найти способы существенного ускорения процессов искусственного создания углеводородного топлива, как аналога природного, осуществляющегося миллионы лет. В качестве биологического объекта для конверсии солнечной энергии в биомассу и затем в биогаз были выбраны микроводоросли. Для их выращивания предполагалось использовать прибрежные участки морей и водоемов суши с размещением на них плавучих плантаций заполненных суспензией микроводорослей. Разработка технологии крупномасштабного культивирования микроводорослей предусматривала решение ряда задач. Прежде всего, отбор штаммов водорослевых культур пригодных для масштабного культивирования в открытых на атмосферу лотках с хорошей продуктивностью по выращиваемой биомассе и обладающих устойчивостью по отношению к контаминации. Еще одной задачей был подбор питательных сред и режимов освещенности для достижения оптимального фотосинттического преобразования энергии солнечного излучения в энергию произведенной водорослевой биомассы. Эти и ряд других задач рассмотрены в теоретических и экспериментальных работах, в которых были сформулированы и апробированы принципиально значимые решения, определяющие увеличение эффективности микроводорослевых преобразователей солнечной энергии. В их числе, замкнутость системы по элементам питания; перемешивание как фактор интенсификации фотосинтеза; синергетика режима питания и освещенности питательной среды [Алексеев, 1981]. В качестве объекта исследования были выбрана микроводоросль спирулина платенсис, с которой проводились эксперименты по масштабному культивированию, как в фотоблоках, расположенных в закрытых, так и открытых на атмосферу площадках. В итоге была разработана технология крупномасштабного культивирования микроводоросли спирулина платенсис в резервуарах с питательной средой, расположенных в тепличных комплексах и открытых на атмосферу площадках [Соловьев, 2009]. Экспериментальные работы выполнялись в экспедициях на Черное море в Крыму (Кацивели). Для увеличения коэффициента полезного действия фотосинтетического преобразования солнечной энергии спирулиной предложено использовать перемешивание плавучих фотоблоков морским волнением

при условии их устойчивости к опрокидывающим моментам и демпфированием интенсивных волновых и ветровых нагрузок. Для реализации указанных требований был апробирован многосекционный принцип конструкции морской плантации. Созданная плантация плавучих культиваторов была скомплектована из открытых на атмосферу системы гибко соединенных между собой плавучих секций открытого типа (рис. 1). Отдельная модульная ячейка секции имела площадь 25 м^2.

Рис.1 . Фрагмент модульной ячейки фотоблока в Крыму (Кацивели)

Масштабное культивирование спирулины не являлось самоцелью. Биомасса микроводоросли предназначалась для последующей микробиологической переработки в биологическое топливо – газ метан. Биомасса микроводоросли, помещалась в специальные емкости – метантанки, где в результате брожения с использованием метанообразующих бактерий в анаэробных условиях ее энергия конвертировалась в биогаз. По результатам испытаний были подтверждены теоретические расчеты, в соответствии с которыми при интенсивности падающей солнечной радиации 1000 кВт ч/м^2 в течение года с открытой на атмосферу плантации спирулины площадью 100 м^2 может быть достигнут энергетический выход биогаза (метана) в количестве одной тонны условного топлива.

Водорослевый энергетический проект, разработанный в середине 1990-х гг., не нашел практической реализации в части производства биогаза. Дальнейшие работы получили развитие в направлении использования пищевой составляющей энергии водорослевой биомассы. Спирулина платенсис отличалась высоким содержанием белка, фикоцианина и бета каротина, что позволяло создавать условия для повышения качества жизни в нелегких годах перестройки общественных отношений в стране. Было доказано, что небольшие добавки спирулины к пище, позволяют составить приемлемую в экономическом и оздоровляющем отношении схему питания. В результате чего создаются условия для более рационального использования произведенных продуктов питания и экономичного расходования энергетических ресурсов, необходимых для их создания [Соловьев и др., 1997].

В этот же период было положено начало решению широкого спектра задач в области системного анализа энергетических и экологических проблем. На основе обширного фактического материала создана методика оценки эколого-экономических национальных счетов различных стран, например, стран Азиатско-Тихоокеанского региона. Разработана методика расчетов энергетической эффективности нетрадиционных источников энергии с помощью межотраслевого баланса, которая учитывала воздействие энергетики на окружающую среду. Предложены решения по проблеме взаимосвязи денежных потоков и потоков свободной энергии. Установлено, что использование в течение года электроэнергии и моторного топлива, эквивалентны стоимости наличных и безналичных денег, умноженных на оборачиваемость их в течение года. Обосновано предложение к переходу на расчеты в «энергорублях», которое позволяет оптимальным образом объективно решать проблемы взаиморасчета. Выполнены оценки экстернальных издержек энергетического комплекса России.

Второй этап развития (2000-е гг.) знаменателен ростом популярности научной школы в области энерговедения и реализации инновационных идей, связанных с рациональным использованием возобновляемых ресурсов. Научно-исследовательский аспект работы в области биологической конверсии солнечного излучения получил заметный импульс в направлении поиска и изучения новых штаммов микроводоросли Arthrospira platensis (Nordst.) Geitl [Киселева и др., 2006]. Показано, что благодаря их использованию, можно повысить скорость роста культуры и добиться увеличения выхода биомассы на 25% по сравнению с исходной культурой, а также сохранить стабильность морфологии водоросли в процессе длительного культивирования. Методами селекции и нанотехнологии выделены перспективные для промышленной биоконверсии солнечной энергии новые аксеничные штаммы микроводоросли Arthrospira platensis.

Большой объем исследований в эти годы пришелся на создание концепции получения пресной воды из атмосферного воздуха. Под руководством профессора В.В.Алексеева была разработана установка для получения пресной воды из атмосферного воздуха. Создана система получения пресной воды из атмосферного воздуха с эффективной системой очистки от пыли и микроорганизмов и приспособленная к работе в аридных регионах Земли [Алексеев и др., 2005]. Проведены исследования влияния капиллярной структуры поверхности на конденсацию влаги. Изучено влияние на интенсивность и количество конденсирующейся влаги, различных параметров, характеризующих состояние конденсирующей поверхности. Сформулированы основные принципы создания установок для конденсации влаги из влажного воздуха с целью практического использования. Выполнен расчет энергоэффективности установок для получения пресной воды из атмосферного воздуха. Создание систем для получения пресной воды из атмосферного воздуха позволяет решить проблему дефицита воды без отрицательного воздействия на окружающую среду. Изучены физические механизмы конденсации и проведена оценка доли конденсированной влаги в гидрологическом цикле аридных регионов. Определены наиболее эффективные районы применения установки конденсации влаги в условиях южного побережья Крыма.

Главные результаты, полученные в области разработки технологий получения пресной воды при конденсации атмосферной влаги, сводятся к следующему: создана физико-математическая и эколого-географическая модель эффективного

производства пресной воды из атмосферного воздуха. Подготовлена техническая документация на строительство промышленных систем получения воды в тропических регионах. Авторские права на изобретение подтверждены десятью российскими патентами и патентом США, а также публикациями в монографии и статьях в рецензируемых журналах. Совместно с Институтом экспериментальной метеорологии в Обниске была создана опытная пилотная установка «Роса» площадью 40 $м^2$ и высотой 2,8 м. с естественным протоком воздуха без энергопотребления (рис. 2) [Алексеев и др., 2003].

Установка представляла собой систему заполненных известняковым щебнем модулей габионов, которые устанавливались на бетонном фундаменте внутри двух металлических поддонов, предназначенных для сбора и стока конденсированной воды. Проведены испытания технических и эксплуатационных характеристик. Установлена временная динамика изменения влажности и температуры в процессе конденсации. Выявлены условия, обеспечивающие интенсивное конденсационное выделение тепла.

Рис.2. Установка «Роса» в г. Обнинск Московской области

Определена емкость установок по насыщению влагой в зависимости от климатических условий. Выполнены экспериментальные исследования динамических характеристик маломасштабной модели установки «Роса» в климатической камере Института экспериментальной метеорологии. Рассмотрены режимы эффективной конденсации влаги при искусственном охлаждении областей системы. Построена математическая модель конденсации атмосферной влаги на гладкой однородной поверхности. Составлены балансовые уравнения потоков тепла и влажности в разное время суток. Произведена параметризация тепло- и влагообмена для различных метеоусловий, в частности, учитывающих роль ветра и конвекции. Оценена инерционность системы и показано, что распределение тепловых потоков сильно меняется в зависимости от внешних условий. Полученные материалы позволяют сделать вывод о том, что разработанные модели установки для получения воды из атмосферной влаги может быть прототипом систем крупномасштабного производства пресной воды в тропических регионах Земного шара.

В развитии идеи о преимущественной зависимости темпов потребления водных ресурсов от антропогенного фактора было предложено в прогностических

оценках динамики водопотребления вместо численных моделей использовать аналитические уравнения. Эти уравнения основаны на временных балансных соотношениях между скоростью потребления пресной воды и численностью населения Они представляют собой функциональные зависимости, определяющие изменение скорости потребления пресной воды w' населением численности N со временем t: w' = R t N. Параметр R определяется предельным уровнем ресурсов пресной воды и характеризует предельную скорость подушного потребления пресной воды. По данным численности населения и водопотребления на протяжении всего XX в. предельная скорость подушного водопотребления, как оказалось, имеет постоянную величину равную R=(13,5±0,5) мл/год чел. С использованием этого значения параметра R был выполнен расчет прогноза мирового потребления пресной воды, который свидетельствует о возможности достижении водного дефицита к 2100 г при использовании только традиционных гидрологических ресурсов. Переход к водопотреблению на основе ресурсов атмосферной влаги позволяет внести корреляцию в прогностический баланс потребления пресной воды [Соловьев, 2008].

Сформулированы методологические основания возможностей использования парникового эффекта для экологически приемлемого крупномасштабного производства электроэнергии в районах с умеренной солнечной активностью. Разработаны лабораторные макеты двух экспериментальных энергетических установок для изучения эффективности процессов термодинамического преобразования солнечной энергии в кинетическую энергию течений. Показано, что использование вихревого движения с циклическим ускорением конвективного потока, инициированного инфракрасной составляющей солнечного излучения, на порядок повышает коэффициент полезного действия парниковых электростанций. Установлены параметры внешней турбулизации вихревых движений, при которых достигается рост мощности низконапорных конвективных потоков в ускорительных модулях электростанций. В методологическом плане осуществлен анализ результатов физического моделирования когерентных структур в океане и атмосфере применительно к воспроизведению в энергетических системах динамических и термических эффектов интенсификации течений, присущих интенсивным природным вихрям.

Выполнен цикл исследований проблемы энергообеспечение как основного фактора устойчивого развития на примере стран Азиатско-Тихоокеанском региона. Определена степень диверсификации поставок сырой нефти, рассчитана величина региональной премии при импорте нефти стран Среднего Востока и потенциальная емкость Российского сегмента Восточно-Азиатского рынка. Методологически проработаны вопросы определения эффективности проектов по энергосбережению. Выявлены размеры ниши энергосбережения по отношению к поставкам энергии и влияние энергетического ценообразования на экономику проектов энергоэффективности. Обсуждены вопросы и практика реформ газового рынка в странах АТЭС. Показано, что главным направлением реформ является разделение элементов природной монополии и конкурентных секторов, изменение традиционной вертикально-интегрированной структуры газовой индустрии.

Изучена проблема применения возобновляемых источников энергии в энергодефицитных и удаленных районах России, а также на экологически неблагоприятных территориях. Проведены расчеты техногенных энергетических потоков в различных типах северного природопользования с использованием матриц межот-

раслевого баланса. Создана методика описания импактных и фоновых районов Заполярья России, позволившая обосновать представления о метахронности современного потепления. Выполнены эколого-экономические расчеты по оценке стоимости рекреационных ресурсов Мурманской области. Полученные результаты позволяют сопоставить степень техногенной трансформации ландшафтов в различных видах природопользования и проводить количественные оценки природных энергоресурсов. Обоснована возможность перспективного строительства шельфовых ветроэнергетических установок в зависимости от географических условий с учетом решения проблемы энергообеспечения отдаленных районов.

Осуществлен мониторинг отечественных правовых, нормативно-методических документов и справочных изданий энциклопедического характера, определяющих экологическую политику в области природоохранных технологий, переработки и утилизации техногенных образований и отходов. Подготовлено более 1400 основных терминов и пояснений к ним для толкового словаря по мониторингу биосферозагрязнителей в обеспечении экобезопасности, ресурсосбережения и качества жизни. Результаты работы нашли свое отражение в разработке отечественных правовых, нормативно-методических документов.

Третий этап развития научной школы возобновляемых источников энергии относящийся к 2010-м гг., ознаменован переходом к расширенным исследованиям географии возобновляемых энергоресурсов и методологическим основам безопасного их использования. В рамках географии возобновляемых энергоресурсов выполнены исследования физико-географических, социально-экономических, технологических и экологических факторов, обеспечивающих энергетическую и экологическую стабильность развития регионов России при использовании традиционных и возобновляемых источников энергии. Разработаны инновационные технологические решения энергосберегающего культивирования микроводорослей-продуцентов сырья для биотоплива на основе гибридных, солнечных установок. Показана эффективность их функционирования на созданных и апробированных на экспериментальных макетных модульных энергосистемах.

Проведены мониторинговые исследования предложенных в авторских патентах МГУ на изобретение систем испарительного охлаждения электростанций с интенсивным воздухорегулированием тепломассообмена. Установлены критерии тепловой эффективности и экологически безопасной эксплуатации объектов атомной энергетики низкоширотного размещения в экстремальных климатических условиях.

Создана комплексная методика картографирования ресурсов солнечной и ветровой энергии регионального уровня с учетом экологических и социально-экономических факторов, влияющих на размещение объектов возобновляемых источников энергии. Опубликован «Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России», содержащий методику оценки и результаты расчетов природных ресурсов и энергетических потенциалов возобновляемых источников энергии на территории России. Сформулированы рекомендации для организации мониторинга и безопасного функционирования солнечных фотоэлектрических установок в различных климатических условиях России. Предложен алгоритм показателей гарантированности энергопитания потребителя от автономной фотоэлектрической станции с учетом географических условий [Андреенко и др., 2015].

Выполнены расчеты и картографирование валовых энергетических потенциалов отходов сельскохозяйственных производств с анализом территорий размещения станций производства биогаза. Подобраны штаммы из проб Карелии, Камчатки, Валдая, оз. Байкал с высокой скоростью роста и перспективами использования при производстве биотоплива. Осуществлен направленный биосинтез биомассы микроводорослей с повышенным содержанием углерода в форме липидов и пониженным содержанием белка методом двухстадийного культивирования в условиях физиологического стресса. Из биомассы выращенных микроводорослей получена бионефть с применением технологии гидротермального сжижения.

Географическая направленность работ лаборатории последних лет определила разработку оценок ресурсов возобновляемых источников энергии. Предложен перспективный способ анализа возможностей и перспектив использования возобновляемых источников энергии на основе типологии районов с учетом уровня обеспеченности ресурсами, имеющими наибольшее значение для данного региона. Создана количественная методика определения показателя суммарного удельного нормированного потенциала возобновляемых источников энергии [Нефедова, 2003]. Составлена серия карт, отражающих потенциальные ресурсы и состояние использования различных видов возобновляемых источников энергии. При типологии по обеспеченности ресурсами возобновляемых источников энергии было предложено использовать серию различных показателей, в том числе: среднее по территории значение среднегодового прихода суммарной солнечной радиации на единицу площади за сутки; удельный технический потенциал ветроэнергетических ресурсов; удельная мощность перспективных малых гидроэлектростанций; потенциальное количество биогазовых установок. Алгоритм нормирования показателей позволил получить синтетические характеристики оценочного положения территориальных единиц по единой шкале и ранжировать их. Данная методика может служить основой для комплексной оценки обеспеченности территорий ресурсами возобновляемых источников энергии. Методологические исследования возобновляемых источников энергии и технологий рационального их использования в России выполнены на территориях различного пространственного масштаба. Получены массивы данных сумм суммарной солнечной радиации на наклонные поверхности и нагрузки потребителей электрической энергии в зоне децентрализованного энергоснабжения 135 населенных пунктов России. Разработана уточненная методика расчёта валового энергетического потенциала отходов сельскохозяйственных производств, апробированная для муниципальных образований Волгоградской области. Получены оценки потенциала получения энергии на отходах животноводства и растениеводства в Акмолинской области, с анализом территории для выбора оптимальных площадок размещения биогазовых станций.

В экономико-географических исследованиях проанализировано современное состояние инновационной деятельности в мировой энергетике, в которой возобновляемые источники энергии являются высокотехнологичным и быстрорастущим сектором. Установлены основные конкурентные преимущества возобновляемых источников энергии по сравнению с традиционной энергетикой, использующей ископаемые энергоресурсы. Проанализирована динамика инвестиционных потоков в возобновляемой энергетике. Выявлены региональные особенности инвестиций в возобновляемую энергетику. Выполнена типизация территориальной организации систем возобновляемой энергетики, определяющая эффективность использования

возобновляемых источников энергии в сельских районах ряда странах мира. Проанализирована структура электроэнергетики Крыма. Составлена база данных объектов гелио- и ветроэнергетики Крыма с картографическим представлением в геоинформационной системе «Возобновляемые источники энергии России». Обобщены результаты анализа процесса низкоуглеродного развития. Проведены оценки рисков на этапах освоения возобновляемых источников энергии с определением наиболее уязвимых инвестиционных, социальных и технологических рисков.

Выполнен теоретический анализ экологической эффективности технологий выносного испарения в башенных энергосистемах преобразования тепловых ресурсов. Разработаны инновационные способы утилизации солнечной и ветровой и термической энергии, подтвержденные в патентах на изобретения. Составлен перспективный план развития национальной системы стандартов в сфере возобновляемой энергетики, обеспечивающий развитие всех направлений рационального использования возобновляемых источников энергии.

В целом на протяжении всех этапных периодов развития и становления научной школы возобновляемых источников энергии, в лаборатории сложилась система знаний по географии возобновляемой энергетики, отличающаяся подходами в решении научных проблем от общего к частному и воплощенная в многочисленных авторских и коллективных научных трудах. Научные идеи, отраженные в более чем сотнях публикаций стратегически взаимосвязаны и, как правило, расширяют и обобщают научные подходы в области энерговедения. Поставленный перед научным коллективом лаборатории ее основателем круг проблем и задач, составляет основу исследований и по сей день. Ценность определенных профессором В.В.Алексеевым целевых направлений развития возобновляемой энергетики заключается еще и в том, что, несмотря на существенные изменения в мире за последние десятилетия, они остаются актуальными и в значительной степени отражают как многообразие процессов в энерговедении, так и вектор их географических исследований.

Новейший этап в развитии научных исследований лаборатории тесно связан с решением важнейших по значимости задач, сопряженных с предметным междисциплинарным, многоуровневым изучением возобновляемых источников энергии. Особое внимание концентрируется на рассмотрение динамики процессов расширенного использования возобновляемых энергоресурсов с анализом перспектив координации пространственного распределения функциональных возможностей энергоносителей альтернативных и традиционных источников энергии. В числе значимых, стоит вопрос о совершенствовании терминологического аппарата, связанного с уточнением содержания и корректности смыслового выражения существующих понятий и выработке новых, наиболее точно и адекватно отражающих специфику современного энерговедения. Сохраняется важность многих не получивших своего решения традиционно общепринятых задач географии энергетических систем, использующих возобновляемые ресурсы, включая такие вопросы как сбор, систематизацию, анализ информации о различных видах потенциалов источников энергии, географии энергетических установок и характеризующих их параметрах с картографическим представлением большого объема данных в рамках современных геоинформационных технологий. При этом сохраняется актуальность поиска новых направлений исследований, в том числе требующих детального географического изучения процессов глобализации и регионализации энергетики, современных тенденций развития цифрового форматирова-

ния пространственно распределенного энергообеспечения, корпоративной географии возобновляемой энергетики и многие другие.

В завершении следует сказать, что при представлении этапов и проблем исследовательской деятельности научного коллектива с перспективами его дальнейшей творческой работы в рамках современного состояния науки трудно рассчитывать на окончательную однозначность изложения. Но основное, как нам представляется можно констатировать уверенно, лаборатория подтвердила свою жизнеспособность и направленность к самосовершенствованию и динамичному развитию. Вне всякого сомнения, этому способствовали такие достижения коллектива как профессионализм сотрудников, творческий климат, имманентное разделение труда, атмосфера взаимопонимания, потребность в дальнейшем успешном развитии отечественной школы исследований возобновляемых источников энергии географического факультета Московского университета.

Литература

Алексеев В.В. Эволюция биосферы. Перспективы использования солнечной энергии // Природные ресурсы и окружающая среда. 1981. Т.7. Вып.19.

Алексеев В.В., Берёзкин М.Ю., Иванов В.Н. Глобальная проблема нехватки пресной воды и эффективные пути ее решения. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2005. – 91 с.

Алексеев В.В., Рустамов Н.А., Иванов В.Н., Дубовская В.А. Экспериментальное изучение процесса наземной конденсации влаги // Докл. РАН. 2003. Т.393. №1. С. 97-100.

Андреенко Т.И., Габдерахманова Т.С., Данилова О.В., Ермоленко Г.В., Киселева С.В., Колобаев М.А., Коломиец Ю.Г., Медведева Е.А., Нефедова Л.В., Попель О.С., Рафикова Ю.Ю., Фрид С.Е., Шакун В.П., и др. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России М.: Изд-во РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2015. – 160 с.

Киселева С.В., Коробкова, Т.П., Чернова Н.И. Микроводоросль спирулина как объект биотехнологии // Биология. 2006. №13. С. 12-14.

Нефедова Л.В. Региональный анализ ресурсов возобновляемых источников энергии, состояния и перспектив их использования в Индии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр., 2003. № 3. С. 50-56.

Соловьев А.А., Лямин М.Я., Ковешников Л.А., Зайцев С.И., Киселева С.В., Чернова Н.И. Водорослевая энергетика, 1997. – М.: МГУ, 67с.

Соловьев А.А. Инновации в возобновляемой энергетике // Вестник РАЕН. 2009. Т.2. С.223-230

Соловьев А.А. Исследования возобновляемых источников воды // Энергетическая политика. 2008. №3. С. 39-45

В.В.АЛЕКСЕЕВ – ОРГАНИЗАТОР И НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

А.А.СОЛОВЬЕВ

Диалектика развития науки такова, что наступает время, когда необходимость появления новой области знания диктуется требованиями практики, самой жизнью. И находится талантливый исследователь, который берет на себя смелость быть первым и вести за собой других. Таким человеком был, доктор физико- математических наук, профессор, действительный член Российской академии естественных наук, Вячеслав Викторович Алексеев. Он принадлежит к разряду ученых значительно опередивших свое время, и вследствие этого не получивший должного понимания у современников, но взгляды и учения которого по достоинству оцениваются потомками.

В.В. Алексеев родился 17 августа 1940 г. в городе Ульяновске в семье школьных учителей. Его отец Виктор Петрович Алексеев, был учителем математики и директором школы, а мать – Зинаида Васильевна, преподавателем химии и биологии. После переезда родителей в Москву в 1947 г. он поступил в среднюю школу №161. Благодаря влиянию родителей и знаменитого на всю Москву педагога, директора школы А.А.Петрова у него зародился интерес к естественным наукам. Поэтому, завершив школьное обучение, он без колебаний принял решение поступать в Московский университет. И в 1957 г. после успешной сдачи вступительных экзаменов был принят на 1-й курс физического факультета МГУ.

Становление Вячеслава Викторовича как физика совпало со звездным временем физфака прорывными работами в области атомной физики. На третьем курсе В.В. Алексеев распределился на кафедру квантовой электродинамики, где под руководством профессора В.И.Григорьева подготовил и успешно защитил дипломную работу «Роль прицельного расстояния при множественном рождении мезонов», которая была отмечена дипломом Министерства высшего и специального образования СССР. В 1963 г., после окончания физического факультета МГУ, его оставляют в аспирантуре на кафедре квантовой статистике, на которую он окончил в 1966 г. с блестящей защитой кандидатской диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Применение методов S-матриц к системам из N частиц».

В 1967 г., по рекомендации академика В.В. Шулейкина он, физик-теоретик, начал заниматься проблемами физики океана и атмосферы. Его пригласили работать на кафедру физики моря и вод суши физического факультета, где он в течение 20 лет, занимая последовательно должность старшего, а затем ведущего научного сотрудника, выполнил ставшие классическими исследования по оценке роли штормовых зон океана в обмене кислородом и углекислым газом между океаном и атмосферой; развил методы физического моделирования интенсивных атмосферных вихрей; изучил воздействие антропогенных загрязнений на обменные процессы между океаном и атмосферой.

В эти же годы вектор его научных интересов смещается в область экологии. Он организует в университете междисциплинарные исследования водных биогеоценозов, разрабатывает математическую модель замкнутой биоэкосистемы, которую описывает с помощью развитого им метода анализа нелинейных уравнений автостохастических процессов развития биогидроценозов. Результаты этих иссле-

дований отражены в докторской диссертации В.В. Алексеева на тему «Математическое моделирование биогидроценозов», которую он успешно защитил в 1977 г. Результаты этих работ были опубликованы в получивших высокую оценку научной общественности монографиях «Динамические модели водных биогеоценозов», «Человек и биосфера», «Экспериментальная экосистема ЭТЭКОС».

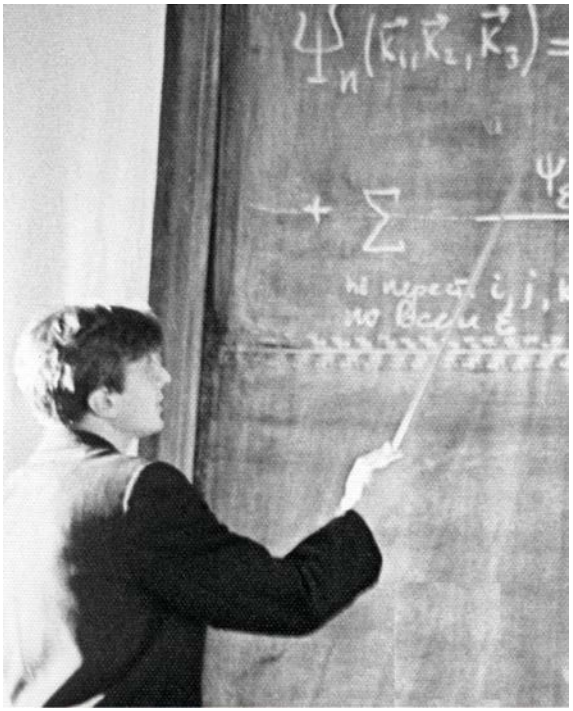


Рис.1. В.В.Алексеев на защите кандидатской диссертации.

Наметившаяся системная перестройка в жизни страны оказался поворотным моментом в творческом пути В.В Алексеева. Сегодня глядя на прошедшие тогда перемены становится понятными масштабность задачи перед которой оказался молодой доктор наук, возглавив в 1988 г., организованное по его инициативе и непосредственном участии новое научное подразделение на географическом факультете – лабораторию возобновляемых источников энергии. Под влиянием интенсивных внешних стимулов способствующих развитие альтернативных видов энергии, в творческом пути Вячеслава Викторовича происходит своеобразный скачок от физики атома, атмосферы и океанов в новое исследовательское поле – физическую и экономическую географию возобновляемых источников энергии. Определив главное направление научно-исследовательской работы лаборатории как изучение эколого-географических проблем возобновляемой энергетики, пространственно-временной структуры природных процессов, определяющих формирование

неисчерпаемых энергетических ресурсов и их рациональное использование, главным направлением его собственных научных устремлений становится задача концептуального обоснования избранного направления науки.

С момента вступления в должность заведующего научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии, научная и педагогическая деятельность В.В. Алексеева становится неразрывно связанной с географическим факультетом. В сфере научных интересов В.В. Алексеева и возглавляемой им лаборатории оказались задачи изучения региональных особенностей изменения возобновляемых энергоресурсов, установления пространственно-временных закономерностей этих изменений, а также создание системы «Биосоляр» – водорослевой конверсии солнечной энергии в биогаз, с разработкой методов концентрирования солнечной, ветровой и других видов возобновляемой энергии. В это же время В.В. Алексеев организует и возглавляет исследования по межотраслевому и межрегиональному анализу воздействия структуры экономики на окружающую среду, энергетическому анализу географических систем, разработке новых технологий возобновляемой энергии и рациональному использованию природных ресурсов. Им начаты разработки методологии комплексной оценки влияния объектов энергетики, в том числе возобновляемой, на окружающую среду, исследования динамики энергоотдачи в отраслях топливно-энергетического комплекса на основе метода межотраслевого баланса с оценкой доли как возобновляемых, так и невозобновляемых источников энергии.

Преподавательская деятельность В.В. Алексеева связана с различными факультетами Московского университета. Он создал и прочитал несколько специальных курсов «Физико-химические свойства морской воды», «Энергетический базис экономики и проблема введения энерговалюты в финансовую систему», «Математическое моделирование географических процессов» «Дополнительные главы геофизической гидродинамики». В 1991 г. ему присвоено звание профессора по специальности «охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов». В последние годы В.В. Алексеев вел семинарские занятия со студентами географического факультета по современным методам океанологии и руководил научным семинаром «Возобновляемые источники энергии». За весь период научно-педагогической деятельности им подготовлено 3 доктора и 18 кандидатов наук.

В.В. Алексеев вел большую общественно-научную деятельность. Он был членом ученого совета географического факультета МГУ и ряда диссертационных советов МГУ, членом Международного общества по солнечной энергии, Комитета Российской Федерации по проблемам использования возобновляемых источников энергии, Ядерного общества России, был организатором и возглавлял оргкомитет Всероссийских научных молодежных школ «Возобновляемые источники энергии», проведенных в 1999–2006 гг. В МГУ приезжала молодежь из различных научных организаций Москвы, регионов и зарубежья. Видные ученые лаборатории МГУ читали лекции по основным проблемам возобновляемой энергетики, а слушатели и гости выступали с докладами по результатам своих первых исследований и достижений. Организовывалось также посещение лабораторий ведущих институтов Москвы. Материалы работы школы публиковались в научных сборниках трудов школы.

Все научное творчество В.В. Алексеева очень гармонично. Именно из стремления к гармонии проистекают такие характерные черты его научного стиля, как мастерское использование феноменологического подхода и изобретение качественно новых теоретических средств решения задач. Замечательный научный путь В.В.Алексеева от теоретической физики и геофизики к физической и экономической географии возобновляемой энергии – яркое доказательство плодотворности междисциплинарных его научных исследований. Научному творчеству В.В. Алексеева были присущи широта научных интересов и глубокое проникновение в суть исследуемых проблем. В.В. Алексеева по праву относят к основоположнику отечественной научной школы географии возобновляемых источников энергии. Он внес неоценимый вклад в развитие экологического природопользования, разработав базовые теоретические концепции и совершенствовав методологические основы учения о возобновляемых источниках энергии.

Вячеслав Викторович был не только выдающимся мыслителем, ученым и педагогом, но и замечательным человеком. В научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии, которую он возглавлял, всегда царила особая творческая атмосфера сотрудничества ученых-единомышленников различных научных специальностей, и в этом – тоже проявилась душевная широта В.В. Алексеева, человека с разносторонними талантами, и обширными научными интересами.

Рис.2. Защита В.В.Алексеевым докторской диссертации

Вячеслав Викторович оставил богатое научное наследство. В его работах географы, физики, математики, биологи, экономисты еще долгие годы будут черпать знания, искать новые мысли, получать ответы на многие вопросы. Многое, из сделанного им будет оценено и понято в связи с дальнейшим развитием науки.

В 1990 г., по инициативе ряда выдающихся ученых России, представлявших академическую, вузовскую и отраслевую науку, была учреждена Российская академия естественных наук. Среди учредителей академии был и Вячеслав Викторович Алексеев – профессор географического факультета МГУ им. Ломоносова, академик РАЕН.

Профессор В.В.Алексеев, в памяти всех его знавших, настоящий труженик, добрый, скромный и отзывчивый человек, оставивший в своих научных трудах

перспективный задел дальнейших исследований в широком поле энерговедения. Направленность поставленных им задач ждет своих исполнителей и новых генераторов идей.

В заключение надо отметить следующее. Среди академиков и профессоров таких ученых, как В.В. Алексеев единицы. Они стоят выше академических званий, хотя при жизни и добивались их. Признавая особое положение таких ученых, мы нисколько не умаляем значение их коллег. Более того, наша причастность к таким людям и то, что мы понимаем и уважаем их особое положение, является залогом дальнейшего развития научных знаний.

Кругозор и научные интересы Вячеслава Викторовича были широки, работал он целеустремленно и увлеченно, отдавая себя целиком науке. Всегда подтянутый, элегантный, он живо интересовался событиями научной жизни, активно откликался на них, с радостью познавая все новое, неизвестное, увлекая своими знаниями и стремлениями сотрудников, формулируя возможные новые направления исследований. В последние годы жизни его сковал тяжелый недуг, но он черпал в науке силы для борьбы с ним. До последних дней 15.09.2007 Вячеслав Викторович Алексеев руководил научной работой коллектива лаборатории, консультировал, редактировал статьи и научные отчеты сотрудников, знакомился с новой специальной литературой. В целом это была жизнь, отданная науке.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ В.В.АЛЕКСЕЕВА

1969

О форме уровня в движущейся области атмосферного давления // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 1969. т.V. № 2. С. 204. (Соавторы – Александров А.А., Лаппо С.С.).

1974

Модель вертикального распределения фито- и зоопланктона в Белом море / в сборнике Математические модели морских экологических систем. – Киев: Наукова думка, 1974. С. 5-7. (Соавтор – Полякова М.С.)

Оценка времени жизни системы хищник-жертва при условии случайной миграции жертв. // Медицина труда и промышленная экология. 1974. № 1. С. 91. (Соавтор – Светлосанов В.А.).

Dynamics of phyto- and zooplankton in the pelagic zone of the White sea // Гидробиологический журнал. 1974. Т.10. №2. С.5. (Соавторы – Gusev A.M., Maksimov V.N., Fedorov V.D.).

1975

Модель вертикального распределения фито и зоопланктона в Белом море // Водные ресурсы. М.: Наука. 1975. № 6. С. 106-116. (Соавторы – Крышев И.И., Полякова М.С.)

Исследование модели двухкомпонентных фитоценозов // Журнал общей биологии. 1975. Т.36. № 6. С. 914.

1976

Биогеоценозы – автогенераторы и триггеры // Журнал общей биологии. 1976. Т.37. № 5. С. 738.

Биофизика сообществ живых организмов // Успехи физических наук. 1976. Т.120. Вып.4. С.648-676.

Динамические модели водных биогеоценозов. / в сборнике «Человек и биосфера». М.: МГУ. 1976. Вып.1. С.3-137.

1978

Простейшая модель начальной стадии олиготрофно-эвтрофной сукцессии в водоемах // Экология. М.: Наука. 1978. № 1. С.5-10. (Соавтор – Полякова М.С.).

Динамика и статистическая механика биогеоценозов с фиксированной массой лимитирующего биогенного элемента / в сборнике «Человек и биосфера». М.: Изд-во Московского университета. 1978. Т.2. С. 56-100. (Соавторы – Крышев И.И., Полякова М.С., Сазыкина Т.Г.).

1979

Экспериментальная экологическая система «ЭТЭКОС» // Биологические науки. М.: Высш. шк., 1979. №7. С. 95-99. (Соавторы – Георгиев А.А., Горбатов Ю.И., Лямин М.Я., Максимов В.Н., Сапожников В.В., Шинкар Г.Г., Широкова Е.Л.).

Свободная конвекция в атмосфере и океане. М.: Изд-во Московского университета. – 139 с. (Соавторы – Блохина Н.С., Гусев А.М., Жданова Е.Ю.).

1980

Экологические эксперименты на установке ЭТЭКОС / в сборнике «Человек и биосфера». М.: Изд-во Московского университета, 1980. Т.47. С. 114-117. (Соавторы – Быкова Н.И., Воробьева Н.А., Горбатов Ю.И., Георгиев А.А., Лямин М.Я., Никитина Э.С., Максимов В.Н., Сапожников В.В., Стрелкова З.Г., Шинкар Г.Г., Широкова Е.Л., Андреев Л.В., Ершова Е.В., Носова В.В.).

1981

Модель конкуренции между водорослями в замкнутом фитоценозе // Журнал общей биологии. 1981. Т.52. № 3. (Соавтор – Сазыкина Т.Г.).

Эволюция биосферы. Перспективы использования солнечной энергии // Природные ресурсы и окружающая среда. 1981. №7. С.53-62.

1982

Моделирование кислородного режима пресного водоема в период летнего прогрева // Водные ресурсы. 1982. Т.9. № 4. С.15-26. (Соавторы – Горбатов Ю.И., Кокорин А.О., Лямин М.Я.).

Модель кислородного режима пресного водоема при летнем прогреве с учетом оседания органического вещества // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 1982. Т.23. №2. С. 57-60. (Соавторы – Горбатов Ю.И., Кокорин А.О.).

Математическая модель влияния пестицидов на биоценоз // Труды Института экспериментальной метеорологии. 1982. №12. С.111-117. (Соавтор – Кокорин А.О.).

1983

Лабораторное моделирование системы главных волн, создаваемых тропическим циклоном // ДАН СССР. 1983. Т.272. №6. С.1348-1350. (Соавторы – Мелешко А.Н., Сугрей В.И.).

Поведение экспериментальной экологической системы в контролируемых условиях / в сборнике «Экологические аспекты исследований водоемов-охладителей АЭС». 1983. С.181-191. (Соавторы – Георгиев А.А., Горбатов Ю.И., Лямин М.Я., Максимов В.Н., Сапожников В.В., Шинкар Г.Г., Широкова Е.Л.).

Свободная конвекция в геофизических процессах // Успехи физических наук. 1983. Т.141. № 2. С. 311. (Соавтор – Гусев А.М.).

1984

Моделирование динамики CO2 в персном водоеме // Водные ресурсы. 1984. Т. 11. № 2. С. 132-135. (Соавторы – Георгиев А.А., Кокорин А.О.).

Влияние пузырьков, образующихся при обрушении волн, на газообмен между океаном и атмосферой // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 7. С. 606-613. (Соавтор – Кокорин А.О.).

Изучение газообмена при конвективном перемешивании верхнего слоя океана // Океанология. 1984. Т. 24. № 1. С. 55-59. (Соавтор – Кокорин А.О.).

Physical model of the aquatic ecosystem // Ecological Modelling. 1984. Т.25. №1-3. С.31-46. (Соавторы – Kokorin A.O., Lyamin M.Ya.).

1985

Проблема повышения концентрации CO2 в атмосфере и возможные пути ее практического решения / в сборнике Технико-экономические и экологические аспекты использования энергии и океана. – Владивосток, 1985. С. 67-76. (Соавторы – Легасов В.А., Кузьмин И.И., Черноплеков А.А., Лямин М.Я., Кокорин А.О.).

Лабораторная модель формирования термического следа тропического циклона / Энергетические ресурсы и энергообмен в океане: Матер, всесоюзн. конф. по энергетике океана. – Владивосток, 1985. С. 71-76. (Соавтор – Баранов П.А.).

Влияние нефтяных загрязнений на интенсивность газооьбмена между океаном и атмосферой // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 1985. Т. 26. № 3. С. 71-74. (Соавторы – Баранов П.А., Кокорин А.О., Шереметьев В.М.).

1986

Физическое моделирование системы главных волн и термического следа тропического циклона / Энергоперенос в вихревых и циркуляционных течениях. – Минск, 1986. С.145-154. (Соавторы – Баранов П.А., Метальников А.А.).

1987

Экспериментальное моделирование вымывания CO2 из атмосферы осаждением // Изв. АН СССР Физика атмосферы и океана. 1987. №10. Т.23. С.1055-1059. (Соавторы – Зайцев С.И., Лямин М.Я., Киселева С.В.).

1988

Вымывание загрязняющих веществ из атмосферы // Метеорология и гидрология. М.: Планета, 1988. № 10. С. 66-71. (Соавторы – Зайцев С.И., Киселева С.В.).

О поглощении океаном углекислого газа в зависимости от его концентрации в атмосфере Земли // Известия АН СССР. Серия физическая (Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics). 1988. Т.24, № 5. С.563-566. (Соавторы – Зайцев С.И., Киселева С.В.).

1990

Физическое моделирование тропического циклона // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т.26. №3. С.177-183. (Соавтор – Метальников А.А.).

Математическая модель пирометаллургического производственного цикла / в сборнике Депонент ВИНИТИ №2146. М.: ВИНИТИ. 1990. С.1-28. (Соавторы – Мелешко Н.А., Синюгин О.А.).

Об экономических аспектах ядерной энергетики / в сборнике Доклады всесоюзной конференции «Ядерная энергия в СССР». – Обнинск, 1990. С.289-292. (Соавтор – Синюгин О.А.).

Солнечная энергетика М.: Знание, 1990. (Соавтор – Чекарев К.В.).

Рост скорости газообмена между атмосферой и океаном при обрушении волн // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, 1990. М.: Наука. Т.26, №3, С.322-325. (Соавтор – Зайцев С.И.).

О поглощении океаном углекислого газа / в сборнике Физические аспекты теории климата. – Л: Гидрометеоиздат, 1990. С.179-184. (Соавтор – Зайцев С.И., Киселева С.В.).

1991

Система цен, полная энергоемкость производственных циклов и охрана окружающей среды / в сборнике Труды Всесоюзной школы-семинара «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования». М.: ВЦ АН СССР, 1991. С.92-97. (Соавтор – Синюгин О.А.).

Энергоотдача различных энергетических технологий и охрана окружающей среды / в сборнике Труды Всесоюзной конференции «Выживание в современной техносфере». – Суздаль: ИБРАЭ, 1991. С.68-71. (Соавтор – Синюгин О.А.).

1992

Надувной концентратор солнечной энергии // Изобретения и полезные модели. 1992. №25. (Соавторы – Лобунец В.Ю., Чекарев К.В.).

Перспективы развития солнечной энергетики // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 1992. № 3. С.16-23. (Соавтор – Нефедова Л.В.).

Определение коэффициента энергоотдачи в ядерной энергетике // Труды института экспериментальной метеорологии. М.: Гидрометеоиздат, 1992. Вып.19(152). С.73-183. (Соавтор – Синюгин О.А.).

Энергетический анализ межотраслевых связей и энергоотдача / в сборнике Трудов ВНИИ системных исследований. М.: Гидрометеоиздат, 1992. №3. С.23-30. (Соавтор – Синюгин О.А.).

Гелиоэнергетика: анализ состояния, перспективы развития, воздействие на окружающую среду. М.: Промысел, 1992. – 92 с. (Соавторы – Рустамов Н.А., Рустамов К.А.).

1994

Водород как аккумулятор энергии в электроэнергетике // Российский химический журнал. 1994. Т.41. № 6. С.112. (Соавтор – Синюгин О.А.).

1995

Энергетический базис экономики // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 1995. №2. С.10-16.

Лес топливного назначения // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 1995. № 4. С. 21-26. (Соавтор – Красовская Т.М.).

1996

Некоторые задачи физического моделирования среднемасштабных процессов взаимодействия атмосферы и океана / сб. Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера-атмосфера, 1996. (Соавтор – Рустамов Н.А.).

Энергетическая оценка экологического ущерба, наносимого топливно-энергетическим комплексом // Обозрение прикладной и промышленной математики. 1996. Т.3. № 3. С.331-345. (Соавтор – Синюгин О.А.).

Получение пресной воды из влажного воздуха // Аридные экосистемы. 1996. Т. 2. № 2-3. С. 111-117. (Соавтор – Чекарев К.В.).

Hybrid Solar Station // Sun World. 1996. v.20, №1. pp.18-19. (Соавторы – Rustamov K.A., Rustamov N.A.).

Modelling of the phyto- and zooplankton marine system / Workshop for the INTAS-94-1154 project, Moscow, 1996. (Соавторы – Рустамов Н.А., Синюгин О.А.).

1997

Энергетика: сравнительный анализ путей развития / Научно-практическая конференция ВИМИ "Проблемы и перспективы использования солнечной энергии", Москва, 1997. (Соавтор – Рустамов Н.А.).

Варианты вступительных экзаменов 1996 г. // Квант. 1997. № 2. (Соавторы – Власов В.К., и др.)

Технико-экономическая оценка традиционной, атомной и альтернативной энергетики // Российский химический журнал. 1997. Т.41. №6. С.46-51 (Соавтор – Синюгин О.А.).

Три пути развития энергетики и их воздействие на окружающую среду // Известия высших учебных заведений. Энергетика. 1997. № 3-4. С.57-60. (Соавтор – Рустамов Н.А.).

Экологически безопасное получение пресной воды из влажного воздуха // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1997. № 4. С.27-28. (Соавтор – Рустамов Н.А.).

Энергетика и экология // Экология и жизнь, 1997. № 2. С.41-46 (Соавтор – Рустамов Н.А.).

Dynamics of marin biota / в сборнике New version of the Moscow Global Biosphere Model. INTAS-94-1154 project report. – Potsdam, 1997. С.443-458 (Соавторы – Rustamov N.A., Sinjugin O.A.).

1998

Эффективные фотосинтетические аккумуляторы солнечной энергии / Международная научно-техническая конференция "Энергосбережение в сельском хозяйстве". – Москва, 1998. (Соавтор – Рустамов Н.А.).

Вода из воздуха // Экология и жизнь. 1998. № 1. С.44-47. (Соавтор – Рустамов Н.А.).

Модель динамики биомассы планктонного сообщества в океане // Журнал общей биологии. 1998. Т.59. № 5. С.498-511. (Соавторы – Рустамов Н.А., Нефедова Е.И.).

Этапы и перспективы ветроэнергетики Индии // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 1998. № 2. С.45-49. (Соавтор – Нефедова Л.В.).

Оценка энергоотдачи биоэнергетических плантаций /в сборнике Доклады международной научно-технической конференции ВИЭСХ. М.: ВИЭСХ, 1998. С.201-206. (Соавтор – Синюгин О.А.).

Пресная вода из атмосферного воздуха // Природа. 1998. № 6. С. 90-96. (Соавтор – Берёзкин М.Ю.).

Пресная вода из атмосферной влаги для аридных территорий // Возобновляемая энергетика. 1998. № 3. С.41-43. (Соавтор – Берёзкин М.Ю.).

Obtaining of fresh water from atmospheric air / Ecological problems of Israel, August 25. – Jerusalem, 1998. (Соавторы – Рустамов Н.А., Коган Б.С.).

1999

Математическое моделирование динамики биомассы фито- и зоопланктона в мировом океане / Сб. науч. трудов «Возобновляемая энергетика». М.: Изд-во МГУ. 1999. С.133-141. (Соавторы – Рустамов Н.А., Матюшкин И.В.).

Ветроэнергетические программы Индии / Сб. науч. трудов «Возобновляемая энергетика». М.: Изд-во МГУ. 1999. С.154-163. (Соавтор – Нефедова Л.В.).

Некоторые задачи физического моделирования среднемасштабных процессов взаимодействия атмосферы и океана / в сборнике Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера-атмосфера (ред. Показеев К.В.). М.: Физический факультет МГУ, 1999. Т.2. С.9-13. (Соавторы – Рустамов Н.А., Баранов П.А.).

Перспективы развития альтернативной энергетики и ее воздействие на окружающую среду. – Москва-Кацивели: НАН Украины, Морской гидрофизический институт. – 152 с. (Соавторы – Рустамов Н.А., Чекарев К.В., Ковешников Л.А.).

Лабораторное моделирование воздействия атмосферного вихря на океан // Природа. 1999. № 4. С. 77.

Рост концентрации CO_2 в атмосфере – всеобщее благо? // Природа. 1999. №9. С.3-13. (Соавторы – Киселева С.В., Чернова Н.И.).

2000

О возможности создания чистой солнечной энергетики // Промышленность России. 2000. № 2(34). С.42-47. (Соавторы – Герценштейн М.Е., Клавдиев В.В., Швилкин Б.Н.).

О путях к экологически чистой солнечной промышленной энергетики в // Наука и технология в России. 2000. № 1-2 (38-39). С.23-24. (Соавторы – Герценштейн М.Е., Клавдиев В.В., Швилкин Б.Н.).

Проблемы безопасной атомной энергетики // Наука и промышленность России. 2000. № 3(35). С.28-34. (Соавторы – Герценштейн М.Е., Клавдиев В.В., Швилкин Б.Н.).

Экологические проблемы атомной энергетики // Наука и технология в России. 2000. № 3(40). С.12-16. (Соавторы – Герценштейн М.Е., Клавдиев В.В., Швилкин Б.Н.).

Первая Всероссийская научная молодежная школа «Возобновляемые источники энергии» // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2000. №4. С.73-74. (Соавтор – Нефедова Л.В.).

2001

Глобальные проблемы экологии и взрывная дейтериевая энергетика // Экологические системы и приборы. 2001. №7. С.50-54. (Соавторы – Герценштейн М.Е., Клавдиев В.В., Швилкин Б.Н.).

Всероссийская Научная молодежная Школа «Возобновляемые источники энергии» // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2001. №4. С.68-69. (Соавторы – Киселева С.В., Чернова Н.И.).

2002

Экологически безопасный метод конденсации влаги из атмосферного воздуха / в сб. Физические проблемы экологии (Экологическая физика) (ред. Показеев К.В.). М.: МАКС Пресс, 2002. Т.10. С.162-169 (Соавтор – Рустамов Н.А.).

Экспериментальное исследование процессов росообразования в средней полосе России / в сб. «Возобновляемые источники энергии». М.: Географический факультет МГУ, 2002. С.320-327. (Соавтор – Рустамов Н.А., Халлак М.Ф.).

Всероссийские молодежные школы «Возобновляемые источники энергии» / в сб. Возобновляемые источники энергии: Лекции ведущих специалистов. М.: Географический ф-т МГУ. 2002. С.3-8. (соавторы – Чернова Н.И., Киселева С.В.).

2003

Экспериментальное исследование процесса наземной конденсации влаги // Доклады Академии наук. 2003. Т.393. №1. С.97-100. (Соавторы – Иванов В.Н., Рустамов Н.А., Дубовская В.А.).

2004

Экспериментальное изучение процесса наземной конденсации влаги для практического использования // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2004. № 1. С.29-33 (Соавтор – Рустамов Н.А.).

Энергетические плантации / в сб. География, общество, окружающая среда. Т.III. Природные ресурсы, их использование и охрана (ред. Добролюбов С.А., Касимов Н.С., Малхазова С.М.). М.: ИД "Городец". 2004. Т.3. С.578-607. (Соавторы – Соловьев А.А., Лямин М.Я., Рустамов Н.А., Чернова Н.И.)

Получение пресной воды из атмосферного воздуха / в сб. География, общество, окружающая среда. Т.III. Природные ресурсы, их использование и охрана (ред. Добролюбов С.А., Касимов Н.С., Малхазова С.М.). М.: ИД "Городец". 2004. Т.3.С. 618-625. (Соавтор – Рустамов Н.А.).

2005

Лабораторные модели физических процессов в атмосфере и океане. М.: Академиздатцентр «Наука», 2005. – 312 с. (Соавторы – Киселева С.В., Лаппо С.С.).

Конденсация – источник влаги // Энергия, экономика, техника, экология. 2005. № 1. С.54-56. (Соавтор – Рустамов Н.А.).

Глобальная проблема нехватки пресной воды и эффективные пути ее решения. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 91 с. (Соавторы – Берёзкин М.Ю., Иванов В.Н.).

2006

Проект «Роса»: извлечение воды из атмосферного воздуха // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2006. № 3. С.212-222. (Соавтор – Берёзкин М.Ю.).

2012

Развитие гидродинамических структур атмосферы и океана, определяющих современные климатические изменения / в сборнике «Современные глобальные изменения природной среды. Факторы глобальных изменений» (под ред. Касимова Н.С., Клиге Р.К.). – М.: Научный мир, 2012. Т.4. С.292-301 (Соавторы – Киселева С.В., Лаппо С.С.).

РАЗДЕЛ 2

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ РОССИИ

ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: ЗАДАЧИ, МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ

С.В.КИСЕЛЕВА, Ю.Ю.РАФИКОВА

Для выявления возможностей использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и развития возобновляемой энергетики на заданной территории необходимо максимально качественно, точно оценить ресурсы различных видов ВИЭ: солнечной, ветровой, гидроэнергии (малых водных потоков), биоэнергии, геотермальной энергии, а также энергии приливов и волн. В настоящей работе акцент будет сделан на проблемах оценки ресурсного потенциала ветровой и солнечной энергии.

При оценке ресурсов солнечной энергии для целей проектирования солнечных фотоэлектрических и водонагревательных станций и установок необходимы исходные данные о приходящей солнечной радиации, причем точность моделирования (проектирования) определяется точностью, а также «скважностью» значений (территориальной и временной частотой или сеткой данных). Как показывает анализ результатов моделирования солнечных установок и история развития инструментов моделирования, необходимыми являются почасовые значения падающей солнечной радиации, учитывающие угол наклона приемной поверхности. В отсутствие таких данных используются среднесуточные (среднедневные), среднемесячные, и – в крайнем случае – среднегодовые значения падающей солнечной радиации. Помимо временного распределения важно рассмотреть проблему пространственного обеспечения данными оценку ресурсов солнечной энергии.

Какие источники данных, в настоящее время используются для оценки ресурсов и проектирования работы установок? Как указывалось ранее в [Атлас ресурсов солнечной энергии, 2010], определить падающую солнечную радиацию в заданной точке можно несколькими методами:

- аналитическим, когда необходимые параметры для конкретной географической точки определяются расчетным путем;
- многолетними наземными измерениями в заданной точке;
- математическим моделированием распространения солнечной энергиии в атмосфере на основе спутникового мониторинга и наземных данных.

В фундаментальных исследованиях [Основы солнечной теплоэнергетики, 2013] приведен широкий спектр методов, позволяющий аналитически оценить величины падающей солнечной радиации. В качестве одного из методов выступает расчет среднего падающего солнечного излучения (энергии) на основе продолжительности солнечного сияния или уровня облачности. В исходное регрессионное уравнение Ангстрема входят эмпирические постоянные, которые определяются типом климата, растительности и т.п., что определяет сложность расчета с одной

стороны, и погрешность результата, с другой. Аналогичная методика была развита для территории СССР в работах [Пивоварова, 1977; Пивоварова, Стадник, 1988]. Продуктивность такого подхода для территории СССР была обоснована тем, что сеть гелиографических станций в 4…5 раз гуще актинометрической. Расчеты на основе радиационных данных (нормы продолжительности солнечного сияния по 1100 станциям [Справочник по климату СССР, 1967]) и эмпирически определенных параметров, входящих в регрессионное уравнение, позволили оценить средние многолетние месячные суммы суммарной солнечной радиации по площади 5-градусных трапеций (144 трапеции к югу от 70°с.ш.), охватывающих всю территорию СССР.

В [Основы солнечной теплоэнергетики, 2013] также изложены и проиллюстрированы полезными примерами аналитические методы оценки различных составляющих суммарной солнечной радиации (прямая, рассеянная) в пределах часов, дней, месяцев, а также падающая радиация на наклонные поверхности при различных типах рассеяния (изотропное, анизотропное). При этом наиболее значимой для целей проектирования представляется методика определения часовых сумм солнечного излучения на основе средних суточных сумм. Метод основан на определении отношения часовой и дневной сумм суммарной солнечной радиации в зависимости от продолжительности дня и момента времени. Для обеспечения расчетов был проведен статистический анализ распределения часовых сумм солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность, в зависимости от их среднемесячных значений для ряда метеостанций. На основе полученных кривых были предложены аналитические зависимости, которые дают наилучшие оценки указанных выше отношений для ясных дней. Безусловно, эти – и в целом все методы аналитических расчетов – имеют значительную погрешность. Однако они дают не только возможность проведения первичных оценок, но предоставляют основу для разработки математических моделей падающей солнечной радиации в различных точках и климатических условиях[1].

Многолетние актинометрические наблюдения являются преимущественными (с точки зрения точности, номенклатуры и длительности рядов) источниками данных о падающей солнечной радиации. Результаты обработки измерений приводятся в печатных изданиях (бюллетени, справочники) и в виде электронных баз данных (БД) с различной степенью доступа (открытые, коммерческие). В настоящее время доступны осредненные данные актинометрических станций СССР за периоды 1930-1980 гг, опубликованные в [Справочник по климату СССР, 1967; Научно-прикладной справочник по климату СССР, 1990] и ряде подобных изданий, в том числе региональных [Справочник эколого-климатологических характеристик г. Москвы, 2003]. Кроме того, результаты актинометрических наблюдений в РФ и других странах аккумулированы в архивах Мирового центра радиационных данных ГГО им. А.И.Воейкова (МЦРД), который предоставляет их в свободном доступе по запросу [Мировой центр радиационных данных]. Ряд электронных баз БД, имеющих выход в Интернет, также предоставляет данные актинометрических

[1] Специалисты приводят, в частности, следующий довод к использованию указанных подходов: хоть аналитические методы лучше всего работают при ясном небе, именно в этих условиях солнечные установки дают наибольшую отдачу.

станций, находящихся на территории бывшего СССР: в открытом [RETScreen International], или в коммерческом доступе [Meteonorm], [3TIER][2].

Итак, наземные актинометрические измерения обеспечивают достоверные данные, по своей номенклатуре достаточные для проведения оценок производительности солнечных установок[3]. Проблемой является незначительное количество актинометрических станций на территории России. В связи с этим помимо использования радиационных данных и аналитических методов оценки приходящей солнечной радиации в заданной точке, можно прибегнуть к методам экстраполяции и интерполяции данных актинометрических станций. Однако, территория страны характеризуется значительной климатической и ландшафтной неоднородностью. В результате на общий широтный характер изменения прихода солнечной радиации накладываются региональные особенности погоды, состояния атмосферы, альбедо поверхности и др. В связи с этим распространение результатов актинометрических наблюдений на значительную территорию сопровождается значительными ошибками. Методы и оценки погрешностей интерполяции/экстраполяции были подробно рассмотрены в работах специалистов ГГО им. А.И. Воейкова [Пивоварова, 1977; Пивоварова, Стадник, 1988]. Показано, что при экстраполяции средних суточных сумм суммарной радиации станции, расположенной на расстоянии 100 км от интересующего потребителя пункта, погрешность суточной суммы составляет:

- зимой и осенью 0,6…0,9 МДж/м^2 за сутки,
- весной и летом 3,2…3,6 МДж/м^2 за сутки.

Для пункта, удаленного на расстояние 200 км от данной станции, погрешность составит соответственно 0,8…1,5 и 4,6…4,8 МДж/м^2 за сутки. Для 300 км эти величины возрастут уже для условий июля до 6,1…6,5 МДж/м^2 за сутки. Экстраполяция осредненных за месяц суточных сумм суммарной радиации на те же расстояния сопровождается меньшими ошибками.

Для решения проблемы недостаточности наземных данных о ресурсах солнечной энергии в последние десятилетия все шире стали использовать методы математического моделирования для восстановление данных (реанализ). В настоящее время как в данных NCEP-реанализа [The NCEP/NCAR Reanalysis Project], так и в ERA-реанализе [ERA Interim reanalysis system] представлены данные о падающей солнечной радиации на сетке с высоким разрешением. Так, в случае ERA за каждый месяц года в интервале (1979 г. – настоящее время) на сетке с шагом 0,25º (последние 20 лет – с шагом 0,125º) доступны среднемесячные значения следующих величин, относящихся к оценкам ресурсов солнечной энергии:

- продолжительность солнечного сияния;
- падающая солнечная радиация на уровне поверхности Земли нетто;
- нисходящая солнечная радиация на уровне поверхности Земли;
- падающая солнечная радиация на верхней границе атмосферы и др.

Открытые архивы NCEP-реанилиза содержат аналогичные данные:

[2] Зачастую источником этих данных является МЦРД, на электронный архив которого делается ссылка.

[3] Важно учитывать, что на актинометрических станциях не проводят, как правило, измерения солнечной радиации на различным образом ориентированные поверхности (угол, равный широте, оптимальный), которые представляют основной интерес для солнечной энергетики.

- нисходящий поток солнечной радиации при ясном небе, среднесуточные и 4-часовые значения;
- нисходящий поток солнечной радиации;
- нисходящие потоки прямой и рассеянной солнечной радиации вблизи инфракрасной области спектра и др.

Широкое использование при прогнозировании и проектировании в солнечной энергетике получила глобальная по охвату база данных NASA POWER (NASA Prediction Of Worldwide Energy Resource) [NASA Prediction Of Worldwide Energy Resource] – ранее NASA SSE, краткая характеристика которой, в том числе верификация данных для территории России, проводилась нами в работах [Атлас ресурсов солнечной энергии, 2010; Попель, Фрид, 2010; Гридасов, Нефедова, 2011]. Следует отметить, что расчеты падающей солнечной радиации и метеорологических величин на сетке (1x1)º в БД NASA POWER проводятся на основе аналитических подходов и многолетних спутниковых наблюдений за состоянием атмосферы (оптически активные составляющие атмосферы – озон, аэрозоли, CO2 и др.), облачного покрова, ландшафтов (альбедо) и др.

Удобство использования БД NASA POWER определяется ее выраженной специализацией: номенклатура характеристик солнечной радиации соответствует потребностям современной солнечной энергетики. В рамках этого проекта в открытом доступе предоставляется среднесуточные значения (включая суммарную солнечную радиацию на верхней границе атмосферы и на уровне Земли, нисходящий поток длинноволновой солнечной радиации, скорость ветра на высоте 10 м) с разрешением (1x1)º для каждого дня (суток) в период с 1983 г. по настоящее время. Таким образом, возникает возможность использовать при оценках ресурсов и проектировании средние суточные величины. Значимость такого источника данных связано с тем, что при детальном математическом моделировании солнечных и гибридных энергоустановок (особенно с аккумулированием энергии) необходимо использовать часовые значения падающей солнечной радиации, которые различными методами генерируются из суточных сумм.

Рассмотрим здесь кратко некоторые методы, используемые для часовых последовательностей поступления солнечной энергии на приемную поверхность, которые весьма разнообразны. Достаточно подробно вопрос моделирования рассмотрен в [Основы солнечной теплоэнергетики, глава 19]. Методами статистического моделирования для целей численного воспроизведения стохастических моделей метеорологических рядов продуктивно занимаются специалисты ГГО имени А.И.Воейкова [Хлебникова, 2008]. В [Hernandes, 2013] обоснованно отмечается, что, методы генерации часовых последовательностей должны учитывать специфику различных территорий (состояние атмосферы, характер рельефа, подстилающей поверхности). При создании и развитии TRNSYS [The Transient System Simulation Program] – широко используемой в настоящее время программной среды моделирования большого спектра энергоустановок на ВИЭ – была использована концепция проектного года, а затем типичного метеорологического года (TMY). Эта концепция предполагает создание временных последовательностей прихода солнечной радиации и других необходимых для моделирования метеорологических величин с заданной детализацией во времени.

Согласно [Основы солнечной теплоэнергетики, 2013], концепция проектного года была реализована на основе восьмилетнего ряда метеорологических данных

метеостанций США, когда «для каждого месяца года выбирался тот месяц (из всех лет наблюдений), для которого сумма солнечного излучения была наиболее близка к средней за восемь лет. Набор выбранных месяцев составлял «проектный год». Концепция TMY является развитием этого подхода и была реализована рядом компаний. Так, электронный ресурс Meteonorm [Meteonorm] на основе базы данных более чем 7000 метеостанций мира предлагает генерацию типичного метеогода в формате месячных, суточных и часовых данных для поверхностей любой ориентации. Программное средство TRNSYS позволяет генерировать часовые последовательности метеоданных на основе среднемесячных и среднесуточных значений, полученных как из многолетних наземных наблюдений, так и из результатов моделирования (например, материалов БД NASA POWER). В результате возможно получать исходный набор метеорологической информации на регулярной, достаточно частой сетке, охватывающей заданный регион исследования. Примеры использования средства TRNSYS для моделирования работы солнечных и гибридных энергоустановок в отечественной практике широко представлены в работах специалистов ОИВТ РАН, в частности, в [Атлас ресурсов солнечной энергии, 2010].

Возвращаясь к специализированным базам данных, которые могут рассматриваться как источники требуемой исходной актинометрической и метеорологической информации для оценки ресурсов и проектирования энергетических установок и станций, мы можем предложить следующий, далеко не исчерпывающий перечень (табл. 1). В таблицу помимо баз данных включены также ГИС-проекты и интерактивные атласы, которые снабжены описанием методики получения исходных данных и ссылками на информационные ресурсы. Рассмотрены преимущественно те источники, которые в той или иной степени охватывают территории России. Следует отметить в качестве концентрированного информационного источника атлас IRENA [Global Atlas for Renewable energy IRENA], где представлена широкая номенклатура интерактивных карт, ссылки на источники фактических данных о ресурсах различных видов ВИЭ, а также в некоторых случаях – данные для выделенных точек о падающей солнечной радиации, скорости ветра и иных составляющих ресурсов ВИЭ. Обращает на себя внимание наличие в атласе IRENA карт с очень высоким разрешением, например, 3 км для падающей солнечной радиации (Мали (Африка), источник данных – Masdar Institute of Science and Technology), 5 км для скорости ветра на высоте 80 м (весь мир, источник данных – 3TIER). Приводятся также ссылки на проведенную верификацию по наземным данным.

Таким образом, проблема недостаточности данных для оценок ресурсов солнечной энергии, проектирования и прогноза производительности солнечных энергоустановок в настоящее время решается путем активного развития методов математического моделирования и использования спутникового мониторинга состояния атмосферы. Усредненные актинометрические данные из этих источников могут быть использованы для генерации суточных и часовых последовательностей, востребованных при проектировании энергоустановок. Ряд БД предоставляют данные реанализа в виде средних суточных или срочных данных о солнечной радиации.

Таблица 1. Перечень источников актинометрических и метеорологических данных, а также готовых оценок ресурсов солнечной, ветровой и других видов ВИЭ.

База данных/ГИС-проект/электронный атлас	Условия доступа	Web - адрес	Охват территории, комментарии
1	2	3	4
Мировой центр радиационных данных (МЦРД)	Открытый доступ	http://wrdc.mgo.rssi.ru	Специализация – актинометрические данные. Всемирная база данных. Представлены данные наземных актинометрических станций
Meteonorm	Коммерческий продукт	http://meteonorm.com/	Специализация – солнечная и ветровая энергия. Охват территории - глобальный.
Climate 1 (The Global Climate Data Atlas)	Коммерческий продукт	www.climate-one.de	Специализация – солнечная энергия. Охват территории - глобальный. Представлены наземные данные более чем 1200 станций.
3TIER	Коммерческий продукт	http://www.3tier.com/en/	Специализация – солнечная, ветровая, гидроэнергетика. Оценка проектов ВИЭ, в том числе экономическая. Охват территории - глобальный.
S@tel - Light (European database of daylight and solar radiation)	Открытый доступ	http://www.satel-light.com/indexgS.htm	Специализация – актинометрические данные. Западная, Центральная Европа, Северная Африка. Представлены данные наземных актинометрических станций и спутниковых снимков.
HelioClim-1 (Databases Solar Radiation Values Derived from Meteosat Satellites)	Часть данных – в открытом доступе	Доступно через портал [SoDa]	Специализация – актинометрические данные. Европа и Африка. Представлены результаты обработки спутниковых снимков Meteosat.
NASA POWER/SSE (Prediction Of Worldwide Energy Resource/Surface meteorology and Solar Energy)	Открытый доступ	https://power.larc.nasa.gov/	Специализация – солнечная и ветровая энергетика. Охват территории - глобальный. Основа – результаты моделирования.

1	2	3	4
The NCEP/NCAR Reanalysis Project of National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA)	Открытый доступ	http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/	Специализация – данные реанализа; широкий спектр метеорологических величин. Охват территории - глобальный.
GIS NREL USA	Открытый доступ	http://www.nrel.gov/analysis/data_resources.html	ГИС-проект Национальной лаборатории возобновляемой энергетики США. Специализация – данные, карты, ГИС по всем видам ВИЭ. Представлены методы получения данных и проведения расчетов.
RetScreen	Открытый доступ	http://www.retscreen.net/	Программный продукт (Канада) для оценки эффективности проектов ВИЭ и когенерации. В качестве базы актинометрических и метеорологических данных используется NASA SSE и данные МЦРД.
SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment)	Открытый доступ	Доступно через портал [SWERA]	Специализация – солнечная и ветровая энергия. Данные и инструменты для развития энергетического рынка в развивающихся странах.
Global Atlas for Renewable energy (IRENA - – International Renewable Energy Agency)	Открытый доступ	http://irena.masdar.ac.ae/#	Представлен широкий спектр интерактивных карт с различным охватом земной поверхности. Представлен перечень и краткое описание источников данных, методик расчета метеорологических и актинометрических величин.

Для территории России возможным является использование в оценках и расчетах такого рода источников информации с проведением тщательной и всесторонней верификации данных на основе наземных актинометрических наблюдений. Значимость точных исходных метеорологических и актинометрических данных возрастает при увеличении доли покрытия нагрузки потребителя за счет использования солнечной фотоэлектрической станции или коллекторов.

Задача получения достоверных входных данных одинаково значима и для солнечной, и для ветровой энергетики ввиду вероятностного характера энергетических потоков от соответствующих источников. Однако проблема качества дан-

ных для адекватной оценки энергетических характеристик ветрового потока является еще более сложной, чем в случае солнечной энергии. Рассмотрим источники данных для оценок ветроэнергетического потенциала и прогноза производительности ветроэнергетических установок (ВЭУ), в качестве которых можно рассматривать:

- результаты многолетних измерений на метеорологических и аэрологических станциях;
- результаты математического моделирования поля ветра, проводимого с использованием наземных данных (реанализ);
- результаты спутниковых наблюдений;
- данные краткосрочного ветромониторинга непосредственно на площадке предполагаемого размещения ВЭУ.

Метеорологические данные с точки зрения ветроэнергетики, обладают рядом несомненных достоинств. Это, во-первых, длительность рядов наблюдений, что является важным для уменьшения статистической ошибки при расчетах. Во-вторых, сеть метеорологических станций, с той или иной степенью покрывает всю территорию Земли. В России имеется разветвленная система метеорологических наблюдений. Регулярная сеть метеостанций сформировалась уже к началу XX века. Однако, когда специалисты в области ветроэнергетики обратились к анализу результатов измерений скорости ветра на метеостанциях, выяснилось, что оценивать энергетические характеристики ветра по этим данным с необходимой достоверностью в большинстве случаев невозможно ввиду:

- непостоянства высоты флюгера (для различных метеостанций она изменялась от 5 до 40 метров);
- затенённости флюгера деревьями, домами, возвышенностями и т.п.;
- срочности наблюдений (один раз в 3 часа);
- несоответствия высоты метеорологических наблюдений потребностям современной ветроэнергетики, когда гондола ВЭУ находится на высоте от 30 до 100-150 м.

В течение XX века предпринимались меры по усовершенствованию измерительного оборудования и процедуры измерений скорости ветра на метеостанциях. До 1936 года измерения скорости ветра осуществлялись три раза в сутки, а с 1936 по 1966 г – 4 раза в сутки. В настоящее время наблюдения над характеристиками климата производятся в единые синхронные сроки 8 раз в сутки в 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 час московского зимнего времени. Под сроком понимается 10–минутный интервал времени, который заканчивается в указанный час. В число измеряемых характеристик ветра входят: средняя скорость ветра в срок; среднее направление ветра в срок; максимальная скорость ветра в срок; максимальная скорость ветра между сроками (максимальный порыв за 3 ч.) Средняя и максимальная скорости ветра за 10-минутный интервал измеряются с точностью 0, 5 м/с.

Вплоть до 1991г. все данные станций (включая даже метеопосты на территории заповедников и агрономические в колхозах и совхозах) собирались региональными центрами и были, вообще говоря, общедоступны на бумажных носителях. После распада СССР эта отлаженная система практически прекратила свое существование. В России сохранилась практика (которая существовала ранее для всей территории СССР) выпуска бюллетеней, отражающих изменение климата за опре-

деленный период. Эти бюллетени готовятся научными учреждениями Росгидромета на основе оперативных наблюдений:

- ежемесячные "Данные мониторинга климата" (выпускаются с 1984г.);
- ежегодные "Изменения климата России" с 1997г. (on-line версия доступна с 1999 г.);
- метеорологический ежемесячник СССР, часть 1 "Ежедневные данные".

Кроме метеостанций государственной гидрометеорологической службы существуют ведомственные станции, из которых наиболее широкая сеть – метеостанции аэропортов. Они практически не прерывали деятельность, но в некоторые периоды качество их данных, предназначенных для узкоспециальных целей обеспечения полетов, снижалось. К настоящему времени в России сохранились лишь 156 станций с непрерывными наблюдениями в течение всего XX в. В ряде регионов страны (Арктика, центральные районы Сибири и Дальнего Востока) плотность метеостанций сократилась в разы и десятки раз.

После 1991 г. было официально объявлено, что метеоданные предоставляются исключительно на коммерческой основе, в значительной мере эта ситуация сохраняется и сейчас. Первым ресурсом в России, обеспечившим свободное предоставление ряда архивных метеоданных, стал сайт Всероссийского научно исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИГМИ) в г. Обнинске, опубликовавший данные по температуре воздуха и осадкам по 223 метеостанциям бывшего СССР с момента основания станций по 31.12.1995 (а впоследствии – до 2006 г.) [ВНИГМИ-МЦД]. В настоящее время сайт работает достаточно неустойчиво и размещение на нем архивных данных метеостанций о скорости ветра по результатам последнего обращения не подтверждено.

Оперативные данные об основных метеорологических показателях (однако, не всегда достоверные) предоставляют ресурсы сети Интернет; на некоторых из метеосайтов можно получить небольшие объемы архивной информации в виде графиков и таблиц и даже данные временных метеопостов. В целом количество Интернет-ресурсов, предоставляющих архивные показатели, стало быстро расти; среди них электронные ресурсы Метеоцентр, Погода России; Погода и климат, Расписание погоды (RP5), Mundomanz, World Weather, National Climatic Data Center.

Идеальными для ветроэнергетических оценок являются временные ряды первичных измерений, имеющие вид «время измерения – результат измерения». Тогда архивные данные позволяют построить диаграммы распределения скорости ветра по градациям, которые необходимы для расчета энергии воздушной струи (на высоте – подчеркнем – флюгерных измерений). С другой стороны, для проведения корреляционного анализа результатов локального ветромониторинга и данных ближайшей метеостанции зачастую достаточно уже осредненных значений. Поэтому помимо архивов источником данных для оценок ветроэнергетических характеристик (на высоте флюгера) могут быть и результаты многолетних рядов наблюдений, представленные в климатических справочниках [Справочник по климату СССР, 1967; Научно-прикладной справочник по климату СССР, 1990], а также в справочниках, содержащих данные за отдельные годы [Климатологический справочник СССР].

Длительность наблюдений, отраженных в справочных изданиях [Справочник по климату СССР, 1967; Научно-прикладной справочник по климату СССР, 1990, 27; Климатологический справочник СССР] позволяет рассматривать метеорологи-

ческие ряды данных как генеральную совокупность, на которой выполняется свойство стабилизации частоты. Следовательно, методы математической статистики позволяют давать на основе этих данных достоверные оценки. Однако большое количество метеостанций по длительности рядов не дает достаточной основы для ветроэнергетических расчетов и проектирования.

Проблемой для ветроэнергетических оценок остается недостаточность высоты проведения измерений ветровых характеристик. Изменение скорости ветра с высотой является закономерным, однако весьма «прихотливым». Это приводит к значительной неопределенности результата при попытках найти параметрические или аналитические зависимости вида V(z). В настоящее время приняты два представления об изменении скорости ветра с высотой: степенной и логарифмический закон. Большой объем исследований был проведен в ГГО им. А.И.Воейкова с позиций метеорологии [Борисенко, 1977], а в [Национальный кадастр вероэнергетических ресурсов, 2007] – с позиций ветроэнергетики. Перечень известных зарубежных и отечественных методов моделирования ветровых параметров в приземном 100-метровом слое атмосферы приведен в табл. 2.

Таблица 2. Аналитические аппроксимации высотного профиля скорости ветра [Национальный кадастр вероэнергетических ресурсов, 2007, с. 227]

п/п	Методика, разработчик	Используемые метеоданные	Аппроксимация высотного профиля	Комментарии
1	Универсальная модель	Соседние гидрометеорологические станции (ГМС)	$V(z)= V_{фл}*(z/h_{фл})^m$ m = 1/7 для суши m = 1/10 для моря	Здесь $V_{фл}$, $h_{фл}$ – значения скорости на высоте флюгера (10-12 м).
2	WASP, RISO, Дания	Соседние ГМС и модель для z_0 (параметра шероховатости)	$V(z)= V_0*\ln(z/z_0)$	Здесь z_0 – параметр шероховатости, V_0 – скорость ветра на уровне шероховатости. Модель двухпараметрическая, и если имеются данные хотя бы на двух уровнях, можно найти V_0 и z_0.
3	1) NASA, NREL, США 2) АО ВИЭН, 2002 г.	1) Модель 2) Соседние ГМС	$V(z)= V_{фл}*(z/h_{фл})^m$	Комментарии - см. выше. Если есть данные на уровне флюгера и на некоторой высоте, то величину m можно определить аналитически.
4	1) ЦАГИ, 1960 2) ГГО, 1989	Соседние ГМС-аналоги	То же	
5	ФЛЮГЕР-5.0, ЦАГИ	Соседние ГМС, данные на высоте 100 м соседней аэрологической станции	$V(z)= V_{фл}*(z/h_{фл})^m$ $m = \ln(V_{100}/V_{фл})/\ln(h_{100}/h_{фл})$	Здесь параметр m определяют из данных аэрологических измерений на высоте 100 м.

Следует отметить, что существует ряд неопределенностей в методиках оценки профилей ветра по предложенным методикам:

– нет обоснования предельной высоты применимости степенного или логарифмического закона в приземном слое; согласно различным представлениям, эта высота составляет 25 … 75 м;

– и степенная, и логарифмическая модель (и, следовательно, точность определения скоростей ветра на высотах 100 м и более) весьма чувствительны к значениям метеоданных на нижнем уровне;

– если измерения проводятся на одном уровне, то, как это видно из перечисленных в таблице методик, возникает вопрос о достоверной оценке параметра шероховатости z_0. Подобные оценки проводились в многочисленных исследованиях и характеризуются значительными вариациями. Например, z_0 для спокойной водной поверхности или гладкого льда по разным оценкам изменяется от 10^{-6} до 10^{-4}; для равнины, луга с травяным покровом до 0.2 м вариации z_0 составляют от 0.01-0.03 до 0.008. Поэтому наиболее оптимальным при проведении ветромониторинга являются измерения скорости ветра на разных высотах, позволяющие определять значения параметров высотного профиля.

Авторы [Национальный кадастр вероэнергетических ресурсов, 2007], в качестве возможного решения указанный проблем, предложили собственную модель «Сэндвич», которая является двухслойной (или трехслойной) и определяет в профили ветра в нескольких горизонтальных слоях. Основой для определения характеристик профилей ветра являются данные наземных гидрометеостанций и сети аэрологических станций, которые в течение длительного времени вели на территории СССР высотные измерения различных метеорологических параметров, в том числе, скорости ветра.

Важным вопросом является вопрос о суточной и годовой изменчивости профиля ветра (т.е., в частности, показателя m в степенной аппроксимации). Важным фактором формирования профилей ветра и его изменчивости является температурная стратификация в нижнем слое атмосферы, а через нее – турбулизация воздуха. В [Борисенко, 1977] выделены наиболее существенные аспекты данной проблемы:

· годовой и суточный ход профилей средних скоростей ветра, т.е. параметра m в степенной зависимости. Основные черты суточного хода показателя m: минимум в суточном ходе в послеполуденные часы, максимум – ночью. Годовой ход параметра m – два минимума (зимой и более слабый в конце весны – начале лета), основной максимум растянут и длится почти весь летне-осенний период года.

· наиболее устойчивым в течение суток вертикальный профиль скорости ветра является в ноябре, декабре и январе. В эти месяцы амплитуда суточного хода параметра m составляет лишь 0.05-0.06. Значительной эта амплитуда является в конце весны и летом, кода она достигает почти 0.3, т.е. практически равна среднему суточному значению самого показателя степени.

· Вертикальные профили средних месячных скоростей изменяются в зависимости от времени суток и сезона года в весьма широких пределах. Пределы изменения m для средних месячных профилей таковы: от 0.15 (июнь, 15 часов) до 0.48 (июль, 3 ч), т.е. даже средние месячные значения m меняются в 3 раза.

Проведенный анализ временной структуры вертикальных профилей ветра, очевидно, полезен для задач оценки репрезентативности данных по ветровым

профилям, полученным из коротких или выборочных рядов наблюдений. Анализ среднегодовых профилей скоростей ветра на высотах 0-600 м в шести регионах России, приведенный в [Национальный кадастр вероэнергетических ресурсов, 2007], показывает, что наиболее существенная особенность всех профилей – быстрое нарастание скорости в приземном 100-150 метровом слое и почти не зависящее от высоты значения скоростей в диапазон высот от 150 м до 600 м. Однако, задача определения ресурсов ветровой энергии, прогноз производительности ВЭУ с учетом профиля ветра – в силу чрезвычайной временной и пространственной изменчивости – требует дальнейших исследований.

Еще один важнейший аспект оценки ветровых ресурсов и определение потенциальной производительности ветроустановок – выбор метода обработки исходных данных. В настоящее время широко принятым является подход, связанный с аппроксимацией функции повторяемости скорости ветра аналитической двухпараметрической функцией Вейбулла. Эта методика заложена практически во всех коммерческих программных средствах обработки данных метеорологических измерений и ветромониторинга. В тоже время, в отечественной практике работами С.Г. Игнатьева обоснован и сформирован иной подход к обработке данных. Основные положения этого подхода изложены в серии статей [Игнатьев, Киселева, 2010; Игнатьев, 2011; Игнатьев, 2013, №12-13 и др.]. Упомянем здесь лишь часть обширного перечня полученных в этих работах результатов, важных для оценки ветропотенциала территории.

В [Игнатьев, Киселева, 2010] проведен подробный анализ двух исторически сложившихся направлений исследований в области оценки ветроэнергетического потенциала: подход метеорологов и ветроэнергетиков. Показано несоответствие методов получения и обработки данных, принятых в метеорологии, потребностям ветроэнергетики. Так, была оценена достоверность величин удельной мощности воздушной струи и годовой производительности ВЭУ на основе принятой в Западной Европе методики аппроксимаций, разработанной национальной лабораторией Дании “Рисо”. Во-первых, на основе обработки многолетних данных о скоростях ветра метеостанций о. Сахалин было показано, что природное разнообразие функций повторяемости ветра невозможно воспроизвести как однопараметрическими аналитическими функциями, так и функцией Вейбулла. Во-вторых, при определении повторяемости скоростей ветра метеорологи во многих случаях большие значения скорости ветра объединяют в один полубесконечный разряд. На основе обработки данных о. Сахалина и г.Оренбурга по традиционной методике (использование аппроксимации функцией Вейбулла) и при непосредственной обработке многолетних данных метеостанций показано, что указанное выше искажение данных при больших значениях скорости ветра приводит к большой погрешности в величине ветроэнергетического потенциала (занижение около 70%).

Были разработаны два алгоритма определения ветроэнергетического потенциала местности: 1) интегрирование полигона, который интерполирует заданные дискретные значения скорости ветра; 2) вычисление интегралов ветроэнергетики в вероятностной форме. Определен и обоснован наиболее достоверный метод - интегрирование полигона. Исследовано влияние на достоверность определения ветропотенциала случайной погрешности измерений скорости ветра. Сформулировано понятие представительности дискретных точек о непрерывной функции $V_\infty(t)$

и показано, что проводимые в настоящее время измерения скорости ветра на метеостанциях дают непредставительные дискретные значения функции $V_\infty(t)$. Дана количественная оценка энергии турбулентной составляющей скорости ветра [Игнатьев, 2013, №1 и №13; Игнатьев, 2014].

Разработаны новые подходы к обработке данных метеостанций, преодолевающие указанные противоречия и основанные на предположении, что измеренные значения скорости ветра представляют случайную функцию $V_\infty(t)$. Указанная методология была апробирована при обработке данных метеостанций о. Сахалин, Краснодарского и Ставропольского краев и использована для изучения свойств годового ветроэнергетического потенциала $Э_p$. Новая методология позволяет определить так же статистику для случайных величин: времени затишья, общего времени работы ветроустановки и времени, когда скорость ветра обеспечивает работу ветроустановок с проектной мощностью. Сформулирован подход к задаче проектирования ветроэнергетических установок и расчета их производительности на основе модели канонической однопараметрической функции плотности вероятности. Обработка статистических данных о величине и свойствах ветроэнергетического потенциала по всей территории России на основе предложенной методики является многообещающим законченным научным результатом.

Однако для ветроэнергетических оценок и проектирования ветроустановок остается существенная проблема отсутствия данных по повторяемости скорости ветра на значимых для ветроэнергетики высотах. В связи с этим важно рассмотреть в качестве источника данных результаты математического моделирования метеорологических величин. В настоящее время в ветроэнергетических расчетах все шире используются данные моделирования (реанализы) [The NCEP/NCAR Reanalysis Project, ERA Interim reanalysis system]. В базе данных NASA POWER с учетом потребностей ветровой энергетики представлены массивы данных для скорости ветра на высотах 10, 50, 100, 150 и 300 м., для высоты 50 м – также значения повторяемости. Эти величины для каждой точки земной поверхности на 1-градусной сетке были получены в рамках проекта Goddard Earth Observing System Model, Version 4 (GEOS-4), который в качестве массива метеорологических данных включал в себя данные реанализа NOAA/NCEP/EMC. Поскольку реанализ дает компоненты скорости ветра на стандартной высоте 10 м (срочные данные с интервалом 3 часа), в рамках проекта GEOS-4 с использованием карт растительности (проект Geosphere and Biosphere Project (IGBP)) были определены отношения скоростей ветра на высотах 10 и 50 м (V10/V50) для 17 типов растительности. Полученные отношения были в дальнейшем использованы для определения показателя степенной зависимости $V=V_0*(H/H_0)^\alpha$ для каждого типа ландшафта и, соответственно, каждой точки земной поверхности. В методике определения величин, входящих в массивы данных NASA POWER [NASA POWER Methodology], указывается, что полученные в результате верификации с наземными метеоизмерениями (по всей территории земного шара) средние отклонения абсолютных значений среднемесячных скоростей ветра составляют ±0,2 м/с, а среднеквадратичное отклонение - 1.3 м/с. Однако опыт проведенной нами верификации заставляет очень осторожно подходить к этим результатам: верификация скоростей ветра при оценках в конкретном регионе обязательна, но процедура верификации является доста-

точно серьезной проблемой. Верификация возможна по данным наземных наблюдений для высот 10 м., а для высот 50м и более требуются данные ветромониторинга, который проводится в России в штучных, причем, в коммерческих проектах. Поэтому доступ к таким данным по понятным причинам затруднен. Имеются, однако, открытые данные для проектов в некоторых, граничащих с РФ странах, выполненных на средства международных организаций (пример – программа создания ветрового атласа Казахстана на средства ПРООН).

Кроме того, при анализе погрешностей результатов моделирования ветрового режима можно рассмотреть результаты ряда исследований, проведенных зарубежными специалистами, для которых такого рода проблемы (отсутствие полных и надежных массивов данных о скоростях ветра на больших высотах) тоже является актуальными. Так, в [Takvor, 2015] проводилась верификация результатов спутниковых наблюдений[4] и моделирования[5] по данным измерений скорости ветра на 4 буях в Эгейском и Ионическом морях (сеть наблюдений POSEIDON, приповерхностные наблюдения на высоте 3 м). Результаты, полученные из указанных трех источников, синхронизировались во времени и в пространстве. Анализ массивов статистических данных проводился методами дисперсионного анализа. В качестве нулевой гипотезы принималось отсутствие отклонение средних значений массивов данных о скорости ветра, полученных тремя указанными выше способами. Значения p-фактора для F-статистики было практически равным нулю, что говорит о невозможности принять эту гипотезу. Линейный регрессионный анализ, примененный для анализа трех множеств случайных величин (значения скорости ветра из различных источников данных) также показал слабую связь между этими множествами. Показано, что моделирование дает систематически заниженные для всех рассматриваемых точек результаты, спутниковые наблюдения – завышенные. При этом погрешность (отклонение) между данными буев и моделированием составляли более 40%, а между данными буев и спутниковыми наблюдениями – 32%. В любом случае такое существенное отклонение не позволяет использовать результаты моделирования и спутниковых измерений для расчетов ветровых потенциалов без проведения серьезной верификации для конкретных территорий в силу кубической зависимости энергии ветра от скорости. Очевидно (и результаты указанной работы это подтверждают), что еще большую неопределенность продемонстрировало сравнение повторяемостей скорости ветра, распределение которых является определяющим при оценке ветропотенциалов. Необходимость анализа (хотя бы и на весьма частном примере) качества данных моделирования и спутниковых

---

[4] Спутниковые наблюдения US NOAA за ветром, высота измерений – 10 м, разрешение 0,25º, периодичность измерений – 6 часов; интервал, охваченный наблюдениями – с 1987 г. до истоящего времени [Zhang H-M, Bates JJ, Reynolds RW. Assessment of composite global sampling: sea surface wind speed. Geophys. Res. Lett. 2006; 33. http://dx.doi.org/10.1029/ 2006GL027086].

[5] Реанализ метеорологических данных (скорости ветра), проводимый в рамках проекта Европейского центра среднесрочных предсказаний European Centre for Medium-Range Forecasts (ECMWF) ERA-40. Результаты реанализа, представленные в узлах сетки с разрешением 125 км, с помощью модели NWP [Papadopoulos A, Korres G, Katsafados P, Ballas D, Perivoliotis L, Nittis K. Dynamic downscaling of the ERA-40 data using a mesoscale meteorological model. Mediterr Mar Sci 2011;12(1):183e98. http://dx.doi.org/10.12681/ mms.59.] были аппроксимированы на сетку 10x10 км.

измерений скорости ветра определяется тем, что в настоящее время для оценки ресурсов и проектирования широко используются специализированные базы данных и ГИС, которые содержат данные моделирования ветрового режима на однородной сетке. И если для целей гидрометеорологии, океанологии и др. областей такие данные являются валидными, то для ветроэнергетики погрешности могут достигать очень существенных значений.

Таким образом, как и в случае актинометрических данных для солнечной энергетики, расчеты ветропотенциала и проектные работы сталкиваются с проблемой недостаточного количества наземных метеорологических наблюдений на нерегулярной сетке. Отдельная важная задача – оценка скоростей ветра и повторяемости на высотах, представляющих интерес для современной ветроэнергетики (50-80 и более метров). Недостаточность данных обеспечила тенденцию использования результатов восстановления данных (реанализа), спутниковых измерений, моделирования, в том числе моделирования характеристик ветра на больших высотах. Несмотря на очевидные плюсы данных моделирования и – особенно – специализированных баз данных, таких как NASA POWER (пространственное разрешение: (1x1)º широты и долготы, обширная номенклатура данных), для обоснованного применения необходимо сравнение массивов скоростей ветра с результатами наземных измерений на метеостанциях России. Нами проводились такого рода сравнения среднемесячных скоростей ветра на высотах флюгерных измерений по данным наземных метеостанций и NASA для различных регионов страны. Показано, что в ряде случаев наземные данные и результаты математического моделирования совпадают достаточно удовлетворительно (например, метеостанции Южного федерального округа – Таганрог, Астрахань, Волгоград, Сочи, Майкоп). Для других метеостанций (Ставрополь, Ростов-на-Дону, Черкесск) имеет место значительные расхождения, причем, не только в абсолютных значениях скоростей ветра, но и в сезонном ходе. В связи с этим для получения некоторой общей (интегральной) оценки ветровых характеристик территории использование базы данных NASA, по-видимому, является оправданным. Однако, применение их при «точечных» расчетах, т.е. при оценке ветропотенциала и обосновании мест локального ветромониторинга требуется определенная осторожность и продолжение более углубленной верификации.

Литература

Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. / Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. – М.: Изд-во МФТИ, 2010. – 83 с.

Борисенко М.М. Распределение ветра в нижнем 200-метровом слое атмосферы над городом. – Л.: Гидрометеоиздат. 1977.

ВНИГМИ-МЦД // Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных – http://meteo.ru/data (дата обращения: 21.10.18).

Гридасов М.В., Нефедова Л.В., Попель О.С., Фрид С.Е. Разработка геоинформационной системы «Возобновляемые источники энергии России»: постановка задачи и выбор методов // Теплоэнергетика. 2011. № 11. С. 38-45.

Игнатьев С.Г. Исследование проблемы определения ветроэнергетического потенциала по данным метеорологических станций с позиций проектирования ветроэнергетических установок. Отчет НТО-1, инв. № 7530 ЦАГИ, 2007.

Игнатьев С.Г. Решение теоретических задач ветроэнергетики с позиций теории вероятностей одномерной случайной величины // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2011. № 2. С.14-30.

Игнатьев С.Г. Функция плотности вероятности однозначной непрерывной и дифференцируемой функции V(t) // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №1 (2 часть). С.63-93.

Игнатьев С.Г. Анализ современной методологии определения энергетических характеристик ветра // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №12. С.22-34.

Игнатьев С.Г. Вычисление интегралов ветроэнергетики при различной форме данных о функции V(t) // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 13.

Игнатьев С.Г. Анализ непредставительных измерений скорости ветра // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 12. С.40-54.

Игнатьев С.Г. Исследование влияния случайной погрешности в дискретных значениях скорости ветра на точность определения интегралов ветроэнергетики // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 12.

Игнатьев С.Г., Киселева С.В. Развитие методов оценки ветроэнергетического потенциала и расчета годовой производительности ветроустановок // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 10(90). С.10-35.

Климатологический справочник СССР. Вып. 1-34. Метеорол. данные за отд. годы. Ч. 4. Ветер. – Л.: Гидрометеоиздат. 1950-1960 гг.

Мировой центр радиационных данных – http://wrdc.mgo.rssi.ru/wwwrootnew/wrdc_ru_new.htm (дата обращения 21.10.18).

Научно-прикладной справочник по климату СССР. – Л.: Гидрометеоиздат. 1990.

Национальный кадастр вероэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. – М.: Изд. «АТМОГРАФ». 2007. 596 с.

Основы солнечной теплоэнергетики. Учебно-справочное руководство / Даффи Дж., Бекман У., пер. с англ. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект». 2013. С.64-167.

Пивоварова З.И. Радиационные характеристики вычислений. – Л.: Гидрометеоиздат. 1977. 335 с.

Пивоварова З.И., Стадник В.В. Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР. – Л.: Гидрометеоиздат. 1988. 291 с.

Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Лисицкая Н.В. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): Учебное пособие. – М.: Изд-во МФТИ. 2010. 56 с.

Справочник по климату СССР. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – Л.: Гидрометеоиздат. 1967.

Справочник эколого-климатологических характеристик г. Москвы (по данным Метеорологической обсерватории МГУ). Том 1. Солнечная радиация, солнеч-

ное сияние. Метеорологические элементы и явления. Характеристики пограничного слоя атмосферы. – М.: Изд-во Моск. Ун-та. 2003. С.35-87
Хлебникова Е.И. Численные стохастические модели временных метеорологических рядов и их прикладные возможности // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 2008. Вып.557. С. 34-52.
3TIER // Renewable Energy Assessment and Forecasting [Электронный ресурс] – http://www.3tier.com/en/ (дата обращения: 21.10.18).
ERA Interim reanalysis system – http://apps.ecmwf.int/datasets/data/ interim_full_daily/ (дата обращения: 21.10.18).
Global Atlas for Renewable energy IRENA – http://irena.masdar.ac.ae/# (дата обращения: 21.10.18).
Hernandez, Gordillo G., Vallejo W. Predicting the behavior of a grid-connected photovoltaic system from measurements of solar radiation and ambient temperature// Applied Energy. 104 (2013). 527–537.
Meteonorm – http://meteonorm.com/ (дата обращения: 21.10.18).
NASA POWER Methodology – https://power.larc.nasa.gov/documents/ POWER_ Data_v8_methodology.pdf (дата обращения: 21.10.18).
NASA Prediction Of Worldwide Energy Resource [Электронный ресурс]. – https://power.larc.nasa.gov/ (дата обращения: 21.10.18).
RETScreen International // Renewable energy decision support center – http://www.retscreen.net/ang/databases.php (дата обращения: 21.10.18).
SoDa // Solar Energy Services for Professionals – http://www.soda-is.com/eng/index.html (дата обращения: 21.10.18).
SWERA // Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) – http://maps.nrel.gov/SWERA (дата обращения: 21.10.18).
Takvor H. Soukissian, Anastasios Papadopoulos. Effects of different wind data sources in offshore wind power assessment// Renewable Energy 77 (2015) 101-114. – http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0960148114008350 (дата обращения: 21.10.18).
The NCEP/NCAR Reanalysis Project – http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/ (дата обращения: 21.10.18).
TRNSYS // The Transient System Simulation Program. 2007. – http://sel.me.wisc.edu /TRNSYS/ (дата обращения: 21.10.18).

ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РОССИИ

С.В. КИСЕЛЕВА, В.П. ШАКУН

В ряде регионов Российской Федерации с большим количеством автономных потребителей и высоким уровнем среднегодовых сумм солнечной радиации, таких как Восточная Сибирь и Дальний Восток, солнечная электроэнергетика обладает широкими перспективами развития, обеспечивая независимость от дорогостоящей доставки органического топлива в труднодоступные районы и повышая надёжность энергоснабжения.

Для целей проектирования солнечных энергоустановок с учетом климатических условий необходимым является мониторинг работы модельных систем, которые должны располагаться в различных, характерных по метеорологическим и актинометрическим параметрам, точках территории страны. При этом для проведения адекватного анализа результатов их эксплуатации и оценки методов проектирования важно разработать и обосновать регламент проведения мониторинга, под которым подразумевается выбор конфигурации модельных солнечных энергетических систем (состав оборудования, величина нагрузки), состав системы мониторинга, перечень фиксируемых характеристик работы систем, а также порядок проведения измерений и обработки результатов. Это позволит унифицировать системы мониторинга и тем самым расширить сферу применения получаемых результатов.

В настоящее время на территории РФ реализован ряд пилотных проектов автономных и сетевых солнечных энергоустановок, однако отсутствие систем мониторинга не позволяет получать адекватные массивы результатов их эксплуатации, которые могли бы быть использованы для технико-экономических оценок и усовершенствования методов проектирования.

Важной задачей для расширения применения солнечных энергоустановок является разработка инженерных методик проектирования, позволяющих оценивать производительность автономных систем и степень удовлетворения запросов потребителей. При этом большие сложности возникают – особенно в климатических условиях России – в связи с недостаточностью или отсутствием метеорологической и актинометрической информации в местах работы установок. Недостаточное покрытие территории РФ сетью актинометрических станций требует анализа возможности использования спутниковых данных и данных наземных наблюдений с различной пространственной и временной детализацией для оценки потенциальной производительности установок.

Примеры мониторинга работы солнечных энергоустановок в РФ пока крайне немногочисленны:

- системы мониторинга SunnyPortal фирмы SMA, установленная на семи солнечных установках и станциях на территории РФ (например, на солнечно-дизельной станции в поселке Яйлю (Республика Алтай)). Результаты мониторинга предоставляются веб-сервисом SunnyPortal [SunnyPortal] в свободном или частном доступе в зависимости от пожеланий заказчика;

- Система мониторинга работы фотоэлектрических установок (ФЭУ) ФТИ им. А.О.Иоффе (НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике). В целях исследова-

ния эффективности работы тонкопленочных солнечных модулей в различных климатических условиях России, а также долгосрочного мониторинга их технических характеристик специалистами ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе» и ООО «Хевел» в семи регионах страны были введены в эксплуатацию тестовые фотоэлектрические установки [Андроников, 2013];

- Система мониторинга сетевой ФЭС Чувашского государственного университета им. Н.И. Ульянова. На базе Чувашского государственного университета им. Н.И. Ульянова в рамках Государственного контракта между ФТИ им. А.И. Иоффе РАН и Министерством образования и науки РФ реализован проект по созданию сетевой фотоэлектрической станции номинальной мощностью 2 кВт;

- Система мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей ОИВТ РАН. С целью исследования рабочих параметров различных фотоэлектрических модулей и их зависимости от внешних факторов в ОИВТ РАН создан стенд их сравнительных испытаний. Для исследования были взяты фотоэлектрические модули различных производителей, отличающиеся между собой по типу и номинальным параметрам [Попель, Тарасенко, 2014].

Во всех случаях регистрируемыми характеристиками являлись: ток, напряжение и мощность ФЭМ; если мониторингу подвергались солнечные автономные установки - напряжение на аккумуляторной батарее (АКБ), ток заряда АКБ и напряжение на нагрузке, а также интенсивность солнечного излучения в рабочей плоскости модуля. На основе мгновенных регистрируемых данных рассчитывается мгновенный КПД и количество выработанной каждым модулем энергии. Для каждого ФЭМ рассчитываются суточные значения отношения выработанной энергии к пиковой мощности, к стоимости и площади каждого модуля, что позволяет определить коэффициент использования установленной мощности устройств и их экономические показатели.

На базе НИЛ возобновляемых источников энергии МГУ имени М.В. Ломоносова в 2012 г. была создана опытно-демонстрационная фотоэлектрическая установка, предназначенная для решения ряда задач:

- отработки технических решений систем освещения с применением фотоэлектрических модулей;
- экспериментальной проверки разработанной инженерной методики проектирования;
- получения актуальной информации по энергетическим показателям работы ФЭМ, АКБ и установки в целом для оценки эффективности эксплуатации аналогичных систем в условиях г. Москвы. Основными компонентами ФЭУ являлись:

- фотоэлектрические модули MSW-180 (производитель - «Солнечный ветер», Краснодар);

- контроллер заряда Morningstar Sunsaver MPPT 15 A, 24 B (Morningstar);

- аккумуляторы гелевые свинцово-кислотные Prosolar-R RA12-260DG (Ritar);

- нагрузка – светодиодные светильники мощностью 26 Вт или лампы накаливания суммарной мощностью до 320 Вт.

Система управления и сбора данных реализована на основе блока аналогово-измеряемых величин осуществляется с помощью ПО PowerGraph v.3.0. В систему мониторинга также входит пиранометр QMS101, установленный в рабочей плоскости модуля. Пиранометр снабжен многоканальным аналого-цифровым преобра-

зователем сигнала и программным обеспечением для сбора данных. Конфигурация опорной конструкции ФЭМ позволяет изменять угол наклона в зависимости от сезона от 42° до 72°. Перечень получаемых в ходе мониторинга характеристик: напряжения на фотоэлектрических батареях;

- напряжения на АКБ;
- напряжения на нагрузке;
- токи ФЭМ;
- токи АКБ;
- ток нагрузки.

Опытно-демонстрационная ФЭУ на базе НИЛ ВИЭ МГУ предназначена для апробации технических решений использования солнечной энергии в системах освещения, получения актуальной информации о производительности фотоэлектрических модулей и энергетическом балансе автономной солнечной энергоустановки в климатических условиях г. Москвы.

Опытная эксплуатация ФЭУ позволила провести апробацию разработанной инженерной методики проектирования [Тарасенко, Тетерина, 2012], которая дает оценку производительности установки, при этом в качестве источника данных о падающей солнечной радиации используются значения средних месячных сумм суммарной солнечной радиации на приемную поверхность с учетом угла наклона. В связи с недостаточностью наземных актинометрических данных, что характерно для большей части территории России, предлагается использовать базу данных NASA POWER – открытый Интернет-ресурс, в котором приведены соответствующие данные для всей земной поверхности на сетке 1ºx1º [NASA POWER Methodology]. Адекватность указанного источника данных была проверена путем сравнения среднемесячных значений (БД NASA SSE) и реальных измеренных значений суммарной солнечной радиации на приемную поверхность фотоэлектрического преобразователя (ФЭП), полученных в ходе опытной эксплуатации ФЭУ в течение 2014 -2016 гг.

Согласно проведенным сопоставлениям полученных в эксперименте данных о радиации, средняя за период измерений относительная погрешность данных NASA POWER (отклонение измеренных значений падающей солнечной радиации от соответствующих данных NASA POWER для каждого месяца) составила от 5-7% в августе и июне до 25-27% в октябре и апреле. В ноябре наблюдалось максимальное отклонение значений – от 43 до 59%. Без учета ноябрьских аномалий средняя погрешность за период измерений равна 14,8% , что дает возможность использовать данные NASA для проектирования и первичных оценок производительности.

В ходе опытной эксплуатации ФЭУ в течение 2013 г. был обнаружен ряд аспектов, имеющих существенное значение – как для работы установки, так и для функционирования системы мониторинга. При работе установки в режиме мониторинга необходимо подобрать нагрузку таким образом, чтобы вся накопленная в течение светлого времени суток в аккумуляторах энергия уходила на нагрузку за темное время суток (система «обнулялась» каждые сутки). Это позволяет корректно определять суточные значения энергетического баланса установки в целом и производительности ее элементов (ФЭМ). Величина нагрузки при этом изменяется в зависимости от сезона года. В случае ФЭУ НИЛ ВИЭ нагрузка менялась ступенчато от 90 Вт зимой до 194 Вт в летний период.

Второй важный аспект работы ФЭУ и системы мониторинга был выявлен при разряде аккумуляторов на малых токах: в этом случае АКБ разряжаются ниже разрешенной глубины разряда; при этом несимметричный разряд аккумуляторов, включенных в цепь, не фиксируется контроллером заряда. В результате возникает и усиливается разбаланс аккумуляторов, что приводит к полному выходу из строя отдельных аккумуляторов. Следовательно, необходима полная синхронизация аккумуляторов в начале эксплуатации, а также использование эффективной системы балансировки заряда аккумуляторов.

Обработка и визуализация данных в системе мониторинга ФЭУ НИЛ ВИЭ осуществлялась с помощью программного обеспечения PowerGraph v.3.0. Помимо визуализации текущих характеристик установки и преобразования данных в формат .txt, программа позволяет производить прореживание данных, их математическую обработку, включая интегрирование и дифференцирование, логическую обработку и т.п. Средствами PowerGraph проводилась обработка первичных результатов измерений, в частности, определялись элементы энергобаланса: энергия, передаваемая за определенный промежуток времени с ФЭП в АКБ и далее на нагрузку, а также суммарная энергия, уходящая за определенный промежуток времени целиком из системы на нагрузку. В качестве характеристики энергоэффективности системы в целом рассматривалась величина К, равная отношению энергии, ушедшей на нагрузку, к энергии падающей солнечной радиации:

$$K = \frac{Q_{\text{вых}}}{Q_{\text{вх}}}$$

Для верификации полученных экспериментальных данных о величине солнечной радиации, а также для разработки методики восстановления недостающих данных было проведено сравнение результатов измерений в эксперименте и данных метеорологической обсерватории МГУ (МО МГУ). Коэффициент корреляции между массивами данных за период с июля по сентябрь 2013 года составил порядка 0,98. Полученные результаты дают возможность восстанавливать недостающие данные, или при необходимости использовать данные метеообсерватории.

Система мониторинга работы ФЭУ НИЛ ВИЭ позволила провести апробацию разработанной методики проектирования автономных солнечных установок в части прогноза производительности. Соответствующий анализ был проведен путем сравнения расчетных и экспериментальных данных о производительности ФЭУ (табл. 1) для мая-августа и ноября 2014 г. Для сравнения были выбраны месяцы, по которым были получены наиболее полные результаты мониторинга работы ФЭУ. Оценивалась относительная погрешность расчетов как отношение разности расчетной и экспериментальной среднесуточной производительности за каждый месяц к расчетной производительности.

Видно, что отклонение результатов эксперимента от расчетных данных, полученных на основе базы NASA POWER, в летние месяцы составляет 10-15%, а в ноябре достигает 80%. Проведенное сравнение данных о падающей солнечной радиации – экспериментальных и среднемноголетних NASA POWER – привело к аналогичным по порядку величины отклонениям. В связи с этим был выполнен пересчет производительности ФЭУ по той же методике, но с учетом актуальных солнечных данных. Обнаружилось, что, за исключением ноября, использование актуальных данных о солнечной радиации позволяет существенно снизить расхо-

ждение между расчетными и экспериментальными данными. Серьезное расхождение по ноябрю удалось снизить почти на 20%.

Таким образом, можно говорить об адекватности предложенной инженерной методики оценки производительности автономных солнечных установок. Основной вклад в погрешность вносят исходные данные о падающей солнечной радиации. Полученные результаты для ноября можно объяснить тем, что существующая версия методики не учитывает изменение состава солнечной радиации в зимний период, когда на большей части территории России преобладает рассеянная составляющая, что существенно ухудшает характеристики монокристаллических солнечных модулей. Кроме того, в методике не учитывается снижение кпд контроллера при малых значениях инсоляции и, как следствие, снижение мощности фотоэлектрического модуля.

Таблица 1. Сравнение расчетной и экспериментальной среднесуточной производительности автономной солнечной энергоустановки

Месяц	$W_{расч}$	$W_{эксп}$	$\delta = \frac{W_{расч} - W_{эксп}}{W_{расч}} \cdot 100\%$	$W_{расч}^{*}$	$\delta^{*} = \frac{W_{расч}^{*} - W_{эксп}}{W_{расч}^{*}} \cdot 100\%$
май	1,744	1,5	14,0	1,472	-1,9
июнь	1,693	1,47	13,2	1,567	6,2
июль	1,704	1,87	-9,8	1,942	3,7
август	1,557	1,32	15,2	1,465	9,9
ноябрь	0,528	0,11	79,6	0,256	57,0

$W_{эксп}$ - средняя экспериментальная производительность, кВтч; $W_{расч}^{*}$ - средняя расчетная производительность с учетом актуальных солнечных данных, кВтч; δ - отклонение экспериментальных результатов от расчетных (по данным NASA), %; δ^{*} - отклонение экспериментальных результатов от расчетных с учетом актуальных данных, %

Выводы

В настоящее время в России появились единичные системы мониторинга, сопровождающие солнечные автономные и сетевые энергоустановки. Необходимость проведения мониторинга и формирования некоторых единых регламентов определяется задачей сравнительного анализа работы ФЭУ в различных климатических условиях. Анализ систем мониторинга, функционирующих в РФ, а также собственный опыт позволяет предложить следующий минимальный состав измеряемых параметров как элемент регламента:

- суммарная солнечная радиация в плоскости модуля;
- температура окружающей среды.
- ток в цепи фотоэлектрических модулей;
- напряжение на зажимах ФЭМ;
- состояние поверхности ФЭМ (затенение, запыление, снежный покров).
- токи и напряжения во всех узлах системы (ФЭМ, АКБ, нагрузка/сеть).

Следует отметить, что в зависимости от назначения установок (сетевая/автономная, учебно-научная; если учебно-научная, то служит для изучения

производительности ФЭМ или системы в целом), состава аппаратной части системы мониторинга и состав измеряемых параметров может варьироваться.

Как видно из перечня, измеряемые характеристики должны давать основу для определения мгновенных и интегральных значений КПД ФЭМ, энергетических балансов установки в целом и отдельных ее элементов; определять зависимость указанных величин от внешних условий (температура, инсоляция).

Для адекватной оценки эффективности системы в целом для опытно-демонстрационных установок важен подбор нагрузки, обеспечивающий, с одной стороны, «обнуление» системы в конце каждого суточного (или иного) периода, т.е. разряд аккумулятора до допустимого уровня, и, с другой стороны, не допускающий отключение солнечной батареи в случае полного заряда аккумулятора. Для проведения сравнительного анализа работы ФЭУ необходим открытый доступ к результатам мониторинга, по крайней мере, для учебно-научных (университетских) фотоэлектрических систем, работающих в различных климатических условиях России.

Литература

Андроников Д.А., Теруков Е. И., Малевский Д.А., Шуткин О.И., Борячок В.В. Системы удаленного мониторинга фотоэлектрических модулей //Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики: сборник трудов российской конференции. 11-14 ноября 2013 года. – Спб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2013. С. 280-281.

Попель О.С., Тарасенко А.Б., Михайлин С.В. Создание методик и материальной базы для сравнительных испытаний фотоэлектрических модулей / Возобновляемые источники энергии: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и IX научной молодежной школы. — М.: Университетская книга, 2014. С. 219-225.

Тарасенко А.Б., Тетерина Н.В., Киселева С.В. О возможности оптимизации энергетического баланса островного поселения (на примере пос. Соловецкий Архангельской области) // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 05-06. С.187-196.

NASA POWER Methodology – https://power.larc.nasa.gov/documents/ POWER_ Data_v8_methodology.pdf (дата обращения: 21.10.18).

SunnyPortal. Веб-сервис мониторинга солнечных энергоустановок компании SMA [официальный сайт] URL: https://www.sunnyportal.com/ (дата обращения 03.03.2015).

АНАЛИЗ РИСКОВ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РОССИИ

Л.В. НЕФЕДОВА

Возобновляемая энергетика все увереннее занимает позиции на мировых энергетических рынках. Новые вводы мощностей генерации на ВИЭ в 2016 г. стали рекордными, составив 161 ГВт и увеличив общую установленную мощность в мире энергообъектов отрасли почти на 9% по сравнению с 2015г. На фотоэлектрическую энергетику приходится около 47% общих введенных мощностей. Далее следуют ветроэнергетика – 34% и гидроэнергетика – 15,5%. Общая мощность установок на возобновляемых источников энергии (без крупных ГЭС) к началу 2017г. по всему миру составила 921 ГВт, 487 ГВт из которых принадлежит ветрогенерационным энергетическим установкам, а 308 ГВт – солнечным. По меньшей мере 17 стран имели к 2017г. мощность установок на солнечной энергии к достаточную для удовлетворения более 2% спроса на электроэнергию, а для нескольких стран характерны гораздо более высокие показатели. В 2016 г. году также отмечено беспрецедентное снижение цен на фотоэлектрические модули. К концу года ВЭС работали более чем в 90 странах, в 24 странах выработка ветроэнергетики обеспечивала до 5% суммарного энергопотребления, а в 13 странах – более 10%. В мире последние годы ежегодно вводится больше мощностей возобновляемой энергетики, чем всех новых мощностей на ископаемых видах топлива [Renewables, 2016].

По прогнозам агентства Bloomberg инвестиции на освоение возобновляемых источников энергии составят почти три четверти из 10,2 трлн долларов США, которые мир будет инвестировать в технологии производства электроэнергии до 2040 года, благодаря быстрому снижению затрат на солнечную и ветровую энергию и возрастающей роли аккумулирования электроэнергии, в том числе электрических аккумуляторных батарей.

По оценкам Bloomberg New Energy Finance (BNEF) [Global trends in renewable energy investment, 2017]. общемировые инвестиции в возобновляемую энергетику (включая крупные ГЭС) в 2016 г. сократились по сравнению с рекордным 2015 г. на 18%, и составили 287,5 млрд долл. США. Пять лет подряд инвестиции в создание новых мощностей возобновляемой энергетики (включая всю гидроэнергетику) были примерно вдвое больше, чем инвестиции в генерирующие мощности на ископаемом топливе. Если исключить гидроэнергетические проекты более 50 МВт, то в 2016 г. в мире новые инвестиции в проекты на ВИЭ составили 241,6 млрд долл. США. Хотя это представляет собой сокращение на 23% по сравнению с 2015г., при этом такое снижение сопровождается рекордной установкой в мире новых мощностей возобновляемой энергетики. Инвестиции в возобновляемую энергетику превысили 2500 млрд долл. США в течение последних десяти лет.

В качестве основной причины падения объёма общемировых инвестиций называется сокращение инвестиций в новые объекты на ВИЭ в Китае и Японии. В Китае возобновляемая энергетика привлекла $87,5 млрд – спад составил 26% по сравнению с прошлым годом. В Японии падение было ещё более резким – 43% до $22,6 млрд. За прошедшие несколько лет эти две азиатские страны пережили бум

солнечной и ветровой энергетики. Сегодня рост объёмов несколько замедляется, на первое место выходит качество использования построенных мощностей. В Китае теряется 10-20% электроэнергии, производимой солнечными и ветровыми электростанциями, и правительство теперь концентрирует усилия на развитии сетевого хозяйства для повышения эффективности интеграции построенных мощностей возобновляемой энергетики. В Европе в 2016г. инвестиции в ВИЭ выросли на 3%, составив $70,9 млрд. Объём инвестиций в возобновляемую энергетику США сократился незначительно — на 7% до $58,6 млрд. В качестве основной причины называется пролонгация Конгрессом мер поддержки ВИЭ (налоговых кредитов): Однако, в 2017г. инвестиции в возобновляемую энергетику в США снижаются в связи с политикой новой администрации страны Дональда Трампа.

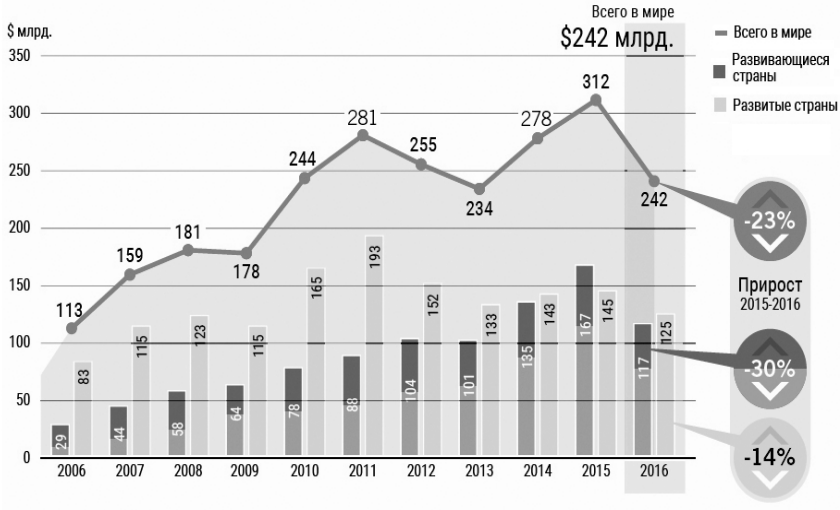


Рис.1. Изменение инвестиций в возобновляемую энергетику в мире по группам стран в период 2006-2016 гг. [Renewables, 2016; Global trends in renewable energy investment, 2017]

Среди стран с развивающейся экономикой инвестиции в возобновляемую энергетику упали на 30%, до $116,6 млрд., тогда как в развитых странах - на 14% до $125 млрд. [Global trends in renewable energy investment, 2017]. Общий более низкий уровень инвестиций в 2016 году был вызван главным образом замедлением на китайском и японском рынках и в других странах с развивающейся экономикой, в частности в Индии и Южной Африке. Это связано, очевидно, с тем, что в условиях послекризисного периода инвесторы досконально рассматривают варианты инвестиций в энергообъекты на ВИЭ, и требуется четкая проработка возможных видов рисков и методов управления ими для создания картины потенциальных рисков и возможностей управления ими.

Источники финансирования проектов на ВИЭ. Можно выделить следующие группы источников финансирования возобновляемой энергетики – правительства, компании-посредники в привлечении государственного и частного финансирования, а также частный сектор, вклад которого превышает 60%. Основными участниками в последней группе являются разработчики проектов, например, Tesla, компании солнечной энергетики (Sun Edison, Solar City, Sun Power), которые в сумме вложили в 2016 г. порядка 92 млрд долл. Крупный вклад (порядка 58 млрд дол.) внесли такие корпорации, как BHP Billiton, Royal Dutch Shell и др., и еще 46 млрд пришлось на домохозяйства.

Примерно столько же пришлось на вторую группу – посредников в привлечении частного финансирования – банки, венчурные и инфраструктурные фонды. Госсектор профинансировал проекты сумму около на 150 млрд долл. Наибольшую долю в этом финансовом потоке (около 130 млрд) обеспечили институты развития различного уровня – от Всемирного банка и Азиатского Банка развития до Французского агентства развития. Климатические фонды и агентства при ООН пока не играют существенной роли в мировом экологическом финансировании.

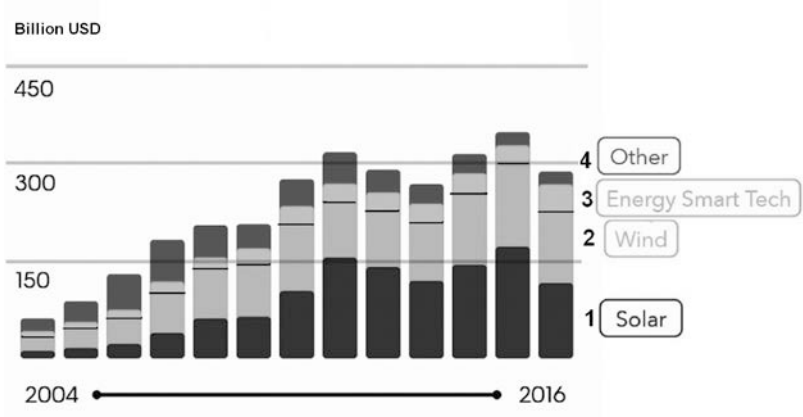


Рис.2 Финансовые инвестиции в возобновляемую энергетику по видам ВИЭ в период 2004-2016 гг. [Global trends in renewable energy investment, 2017].

Существует четыре основных группы инструментов финансирования:

- гранты государственных и частных фондов, а также институтов развития. Особенно популярна эта форма финансирования в развивающихся странах, но это ведет к росту нагрузки на государственные бюджеты в развитых странах.

- долговые инструменты (банковские кредиты в коммерческих банках и банках развития). Так, в развивающихся странах популярны банковские кредиты – как в коммерческих банках, так и в банках развития. Их любят местные инвесторы, так как они позволяют уклоняться от рисков.

- государственные гарантии по банковским кредитам. В случае с такими гарантиями необходимо обеспечивать минимальный уровень средств со стороны

государственных организаций, чтобы добиться эффекта от привлечения средств у частных компаний.

- владение акциями в компаниях, работающих с ВИЭ и зарегистрированных на биржах. Сюда же относятся облигации и «зеленые» бонды, получившие широкое развитие в развитых странах Европы. Они позволяют привлекать капитал специализированных инвесторов, обеспечивать прозрачность реализации экологических проектов. По сути это облигации, выпускаемые государственными или частными организациями для финансирования экологических проектов на ВИЭ. С 2012 г. по 2014 г. объем выпуска зеленых бондов вырос в 20 раз и составил 38 млрд долл. Инвесторами в последние годы выступают в основном компании, управляющие активами, и частные фонды (в основном из Европы, Японии и США), а эмитентами – посредники в привлечении госфинансирования, правительства, компании и банки [Колобова, 2013].

Рис. 3 Схема финансирования проектов возобновляемой энергетики [Колобова, 2013].

Анализ рисков. Для объектов возобновляемой энергетики необходим учет рисков на все этапах разработки проекта: при подготовке технико-экономического обоснования, при проектировании, при организации инвестирования и проведении тендеров, непосредственно при строительстве, а также на этапе функционирования [Менеджмент риска].

В настоящее время различают качественную и количественную оценку рисков.

Качественный анализ предполагает выявление:

– источников риска;

– этапов и работ, при выполнении которых возникает риск (установление потенциальных зон риска, изменение риска в динамике, выявление всех положитель-

ных и отрицательных моментов, связанных с реализацией решения, содержащего риск).

Количественная оценка позволяет:

– выявить математическую вероятность возникновения выявленных рисков;

– определить значения потерь (или прибыли) от действий в рисковой ситуации, которые будут являться объектом дальнейшего анализа для принятия решения об управлении данными рисками;

– определить степень влияния различных факторов на рисковую ситуацию;

– подготовить оптимальный план управления проектом на ВИЭ в рисковой ситуации;

Таблица 1. Внутренние и внешние риски энергетических предприятий

ВНУТРЕННИЕ РИСКИ	ВНЕШНИЕ РИСКИ
СТРАТЕГИЧЕСКИЕ РИСКИ: разработка и воплощение неверных бизнес-решений, неспособность управленческого аппарата принимать правильные решения с учётом изменений внешних факторов.	ПОЛИТИЧЕСКИЕ РИСКИ: политическая нестабильность, изменение таможенной политики, риск географической нестабильности и государственного неподчинения обязательствам.
ОПЕРАЦИОННЫЕ РИСКИ: возникновение отклонений в информационных системах и системах внутреннего контроля; риски связаны с ошибками людей, наличием недостаточных систем контроля.	РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ РИСКИ: риски тарифного и экологического регулирования; регулирования в области безопасности; специфические налоговые риски; риски антимонопольного регулирования.
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РИСКИ: непреднамеренные сбои в работе, неверный выбор технологического оборудования, нарушения технологических процессов, нерегулярные профилактика и ремонт оборудования, потери в результате сбоев и поломок.	РЫНОЧНЫЕ РИСКИ: риск недополучения прибыли, риск изменения стоимости капитала, риск влияния крупных транзакций на параметры рынка, финансово-экономические, изменение конъюнктуры рынка, цен на топливо и т.д.

Анализ методов оценки риска разными авторами [Ермасова, 2005; Павлова, 2011] показал, что процедура предварительного анализа состоит из следующих этапов:

1. Определение в первом приближении границ предметной области объектов технического регулирования, для которых необходимо подобрать подходящую методику оценки риска.

2. Сбор всех видов документов, определяющих потенциальную опасность выбранных объектов.

3. Сбор статистических данных о происшествиях и авариях, относящихся к выбранным объектам технического регулирования.

4. Анализ документов (по результатам сбора всех видов документов) и статистических данных (по результатам статистики происшествий).

5. Определение всех видов потенциальных опасностей, характерных для выбранных объектов, для которых оценивается риск.

6. Формирование списка потенциальных опасностей для рисковых объектов, определенных в результате анализа.

В России опыт оценок рисков энергетических компаний и объектов на ВИЭ с целью повышения финансовой устойчивости и инвестиционной привлекательности невелик.

Для разработки методологии управления рисками необходимо предварительно оценить возможные риски на всех стадиях развития проекта сооружения на ВИЭ. При постановке задачи оценки управления рисками важно определить для каких целей проводится оценка. Целью может быть минимизация рисков, оптимизация рисковой ситуации, полное исключение риска и др. Риски объектов на ВИЭ, как и на других предприятиях энергетической отрасли, можно разделить на внутренние и внешние риски (табл. 1) [Павлова, 2011].

Для оценок рисков проектов возобновляемой энергетики могут быть привлечены различные методы математического моделирования и анализа. Например, в работе [Кошелев, 2016] комбинации методов экономико-математического моделирования, анализа риска инвестиционных проектов и сценарных модельных экспериментов с применением метода «Монте-Карло» нашла применение для оценки рисков по внедрению биогазовой технологии, проводимой на базе экономической оценки инвестиционных проектов строительства биогазовых установок в сельскохозяйственных организациях. Такая методика оценки рисков проекта в разрезе сценариев использована для того, чтобы выбрать наиболее рациональную специализацию объекта размещения биогазового производства, обеспечивающую его устойчивое функционирование при минимальных рисках. Метод «Монте-Карло» применяется и для экономического анализа рисков децентрализованного электроснабжения на основе ВИЭ [Arnold, 2017].

Управление риском – это совокупность определенных методов, приемов и мероприятий, с помощью которых производится выявление, оценка и, при необходимости, воздействие на риск с целью уменьшения убытка или увеличения прибыли предприятия. По своей основе можно выделить нефинансовые и финансовые механизмы управления рисками. Нефинансовые инструменты включают в свой состав [Ермасова, 2005]:

- технические меры - предполагают использование различных приспособлений и устройств, которые уменьшают вероятность наступления негативных событий или минимизируют потери, область распространения опасных явлений, время учёта рискового события. В свою очередь различают пассивные и активные технические меры. Пассивные мероприятия призваны с помощью определённых технических решений (запасные выходы, генераторы, огнеупорные конструкции и т. п.) воздействовать на возможные рисковые ситуации. Активные мероприятия проводятся до наступления происшествия, предполагают использование широкого набора технических средств для уменьшения области распространения потерь или восстановления имущества и работы хозяйствующего субъекта (охранная сигнализация, операции по спасению имущества и т.п.).

- организационные мероприятия предполагают использование комплекса мер, направленных на оптимальное построение технологических процессов и отдельных операций, на разработку охранных и предупредительных мероприятий, на поощрение работников при соблюдении защитных мероприятий и т.п.

- правовые мероприятия предполагают разработку и утверждение соответствующих нормативных документов, которые регламентируют определённые ситуации, устанавливают предельные максимальные или минимальные уровни значений определённых показателей, возлагают ответственность за нарушение или ненадлежащее исполнение возложенных обязанностей и т.п.

- обучение персонала также можно отнести к специфическим мероприятиям по воздействию на рисковые ситуации, т. к. в основе риска часто лежит человеческий или субъективный фактор. Беззаботность, некомпетентность или недостаток специальных знаний, неправильные действия персонала из-за отсутствия практического опыта являются причинами появления определённых рисковых событий, приводящих к потерям различного уровня. Для того, чтобы не допустить данное положение, необходимо обучение и повышение квалификации, практического опыта персонала в нештатных и подобных ситуациях. Работники должны осознать рисковый характер деятельности хозяйствующего субъекта и должны обладать навыками и знаниями по воздействию на возникающие случайные события.

В финансовых методах управления рисками в возобновляемой энергетике можно выделить три основные стратегии: принятие, перенос и снижение риска.

- Принятие риска обычно означает оставление всего или части риска за предпринимателем, т. е. на его ответственности. В этом случае предприниматель принимает решение о покрытии возможных потерь в результате свершения рискового события за счет собственных средств (например, самострахование). Основными методами принятия риска на себя являются: компенсация (покрытие риска за счет текущего денежного потока); резервирование (создание фонда средств на покрытие непредвиденных расходов); самострахование (создание девелопером собственных страховых фондов, которые предназначены для покрытия убытков). Вопрос о том, какой риск следует принимать на себя является одним из самых сложных и важных в практике риск-менеджмента. Современное понимание риск-менеджмента базируется на так называемой «концепции приемлемого риска», согласно которой основной целью процесса управления риском является придание максимальной устойчивости всем видам деятельности организации путем удержания совокупного риска (ожидаемого уровня потерь) в заданных стратегией развития организации пределах.

Перенос риска – это методы страхования объектов на ВИЭ, их работы и выдачи гарантированной мощности.

При сооружении энергообъекта на ВИЭ распределение риска между участниками проекта является действенным способом его снижения. Он заключается в распределении риска между владельцем, инвестором и исполнителем проекта. Отношения между владельцем проекта и исполнителем проекта в большинстве случаев основаны на договорных отношениях. Поэтому при заключении договора подряда заранее оговариваются все штрафные санкции, которые будут применены к подрядчику за невыполнение им договорных обязательств. Тем самым риск будет распределен между участниками договора и некоторым образом компенсирован.

Последние годы, благодаря наличию обширного фактического материала по объектам на ВИЭ, зарубежными исследователями активно разрабатывается тематика методов риск-менеджмента в возобновляемой энергетике. Данная тематика особенно важна и для российской возобновляемой энергетики, вступившей в фазу активного развития. Для территории России велико значение решения проблем ресурсных рисков, то есть рисков отсутствия необходимых ресурсов для обеспечения рентабельности проекта – обусловленных неравномерностью распределения энергопотенциала ВИЭ во времени и пространстве [Нефедова, Соловьев, 2015].

Для получения точных прогнозов доходности и планирования доходов с учетом рисков, владельцы ВЭС должны сочетать в своем портфеле оценки выработки для ветряных электростанций с прогнозами цен на электроэнергию на рынке фьючерсов. С помощью программных продуктов MATLAB® аналитики HorizonWindEnergy (ныне EDPRenewables), компании владеющей 18 ВЭС в разных районах США, в 2015г. разработали автоматизированную систему по прогнозированию рисков, которая учитывает в своей работе многолетние данные, текущие цены и оценочные прогнозы экспертов [Horizon Wind Energy].

Климатическая изменчивость частично предсказуема и является фундаментальным фактором в объяснении финансового риска в проектах в области возобновляемых источников энергии. Последние годы разрабатывается методология оценки риска, учитывающая прогнозируемость климата. В работе [Cristian Bustos, 2017] описана методика по снижению риска на проектах фотоэлектрических установок путем моделирования предсказуемых компонентов солнечной радиации и атмосферных колебаний. Была разработана новая модель прибыли для PV-установок, учитывающая эту предсказуемую климатическую информацию. Модель была адаптирована для оценки рисков PV-инвестиций и применяется в более чем 10 географических районах по всему Чили, крупнейшему рынку ПЭВМ в Латинской Америке, где климат сильно зависит от трех океанских атмосферных колебаний. Использование модели в этих регионах позволяет снизить ежемесячный финансовый риск на 60-80% по сравнению с традиционной методологией. Для проекта PV 100 МВт, расположенного в этих областях, это означает снижение годового риска с 4,93 до 7,88 млн долл. США в год (традиционная модель) до 1,11-2,38 млн долл. США в год (предлагаемая модель). Моделирование океанско-атмосферных колебаний позволяет добиться наибольшего снижения рисков для северо-центральные района, уменьшая их влияние на экстремальные широты. Данная методология потенциально применима к гидроэнергетическим, ветровым и другим возобновляемым ресурсам и позволяет исключить прогнозные компоненты климата из расчета риска проекта.

Инвесторы принимают решения о поддержке проектов на ВИЭ на основе анализа будущих доходов и оценки основных рисков, которые могут потенциально повлиять на проект. Объемы и условия финансирования находятся в тесной связи с тем, насколько высок уровень риска проекта и от наличия инструментов их снижения. Таким образом, возможности получения необходимых инвестиций и кредитов на проекты возобновляемой энергетики зависят от эффективности управления рисками в этой отрасли.

Анализ опыта зарубежных проектов на ВИЭ показал, что наиболее применимыми являются такие методы снижения рисков, как долгосрочные соглашения о закупке электроэнергии, контракты на эксплуатацию и техническое обслуживание,

а также передача части рисков третьим лицам [Нефедова, Соловьев, 2015]. Основным механизмом передачи риска является страхование. Страхование позволяет девелоперу (разработчику) проекта компенсировать потери, которые могут возникнуть в случае негативных последствий существующих рисков. К рискам, принимаемым страховыми компаниями, относятся обычно страховые продукты, разработанные для традиционных отраслей промышленности. Сюда относятся: технологические риски (выход из строя оборудования), организационные (задержки в поставках), стихийные бедствия, человеческий фактор, а также часть юридических и финансов рисков.

Изучение рисков в возобновляемой энергетике предложено проводить методом анализа сетей разработанным Т.Саати. Метод используется для оценки ключевых факторов риска и анализа последствий выбранных альтернативных решений. Также он позволяет внедрять различные факторы и критерии – материальные и нематериальные – которые характеризуют оценку рисков. Данный метод позволяет определить, какая из стратегий является приоритетной в общем процессе оценки рисков, и какая стратегия наиболее приемлема для группы и отдельных рисков. В статье [Калинчик, 2013] с использованием метода анализа сетей проведен анализ рисков по трем стратегиям: принятие, перенос и уменьшение риска.

Однако далеко не все виды рисков, присущие для объектов возобновляемой энергетики, подлежат страхованию. Страховые компании, как правило, покрывают только те риски, по которым может быть оценена вероятность наступления страхового случая, оценен размер возможного ущерба и вычислена соответствующая страховая премия. Ряд факторов риска, характерных для работы проектов на ВИЭ, и в первую очередь - изменение законодательства и экономического и политического климата в стране, обычно выходят за рамки страхования. Это также касается отдельных проектов с использованием новых технологий возобновляемой энергетики, реализация которых не отвечает базовым требованиям страховых компаний. В связи с этим многие проекты в области возобновляемой энергетики имеют высокой уровень риска, что снижает их перспективы получения кредитов с точки зрения банков.

Новые формы управления рисками в возобновляемой энергетике. Анализ действующих проектов на ВИЭ показывает, что ряд крупных девелоперов активно используют альтернативные инструменты передачи риска, адаптированные для возобновляемой энергетики. Рассмотрим некоторые кроме традиционного страхования, существующие альтернативные механизмы передачи риска, которые могут повысить инвестиционную привлекательность проектов возобновляемой энергетики.

Погодные деривативы. В течение многих десятилетий единственной возможностью снизить погодные риски было их страхование, и лишь в конце 90-х годов прошлого века появилось такое понятие, как «срочный контракт на погоду», который в настоящее время интенсивно используется иностранными компаниями для снижения риска, связанного с изменениями погодных условий. Ресурсные погодные риски влияют на надежность выработки большинства систем возобновляемой энергетики и, следовательно, - на получение запланированной прибыли. Погодные деривативы — это финансовые фьючерсные контракты, выплаты по которым напрямую зависят от погодных условий: количества солнечных дней, колеба-

ния скорости ветра и количества осадков, отклонения от заданного значения температуры).

Растущее производство электроэнергии из возобновляемых источников энергии в последние годы в сочетании с неопределенностью погодных условий в Германии и Австрии привели к росту рисков компаний-производителей энергии при увеличении числа ВЭС. Биржа EEX в 2016г. предложила эффективный инновационный инструмент хенджирования для управления рисками в виде фьючерсов (погодных деривативов). В качестве базового актива фьючерса на ветряную энергию EEX используется индекс ветра, рассчитываемый EuroWind. Модель меняется каждые 15 минут, исходя из данных метеорологической службы, расположенной в Германии. Регулирование торговли ведется в соответствии с правилами MiFID, как и других деривативов в зоне ЕС. Очевидно, что с увеличением доли возобновляемых источников энергии в глобальном масштабе появятся фьючерсы и выработку гелиоэнергетических станций. Индекс ветра – это параметр, рассчитанный Ingenieurbüro Energietechnik (Iwet), который является индексом производства и определяется по результатам работы нескольких тысяч ветровых турбин. Для учета региональных различий федеральная территория разделена на 25 регионов. Индекс ветра равен 100, если годовая выработка электроэнергии соответствует среднему значению. Оценивая годовое производство электроэнергии по проекту с помощью индекса ветра соответствующего региона, возможен прогноз долгосрочного - ожидаемого выхода энергии [Fera, 2017].

В настоящее время ряд международных и финансовых институтов (DeutscheBörse, Entergy-KochTrading, MerrillLynchGlobalCommodities и др.), такжеиспользуют индексы выработки ветряной электроэнергии, основанные на сопоставлении кривых мощности типичных ветрогенераторов и среднемноголетних показателей скорости ветра в конкретных регионах. Фирма, владеющая ВЭС может приобрести годовой фьючерс или опцион, фиксирующий определенное значение индекса. В случае, когда скорость ветра становится ниже данного значения, компания получает компенсацию от продавца опциона, тем самым снижая риск финансовых потерь. Однако, в том случае если выработка превышает данные индекса, доходы от нее получает компания, реализующая данный опцион. Аналогичные индексы существуют для оценки солнечной радиации, температуры и количества осадков. Таким образом, девелоперы проектов на ВИЭ могут захеджировать (застраховать) свои риски в случае наступления для них неблагоприятного события, однако отказываются от сверхприбыли в случае наступления благоприятного события. Этот механизм несет достаточно высокие риски из-за сложности оценки потенциальных убытков, которая непосредственно влияет на стоимость деривата, а также за счет невозможности страхования от чрезвычайных ситуаций.

К новым формам управления финансовыми рисками в возобновляемой энергетике можно отнести также интегрированные многорисковые контракты, рисковый капитал, залог акций, валютный своп и секьютеризация кредитов.

Многорисковые контракты позволяют компаниям комбинировать различные риски, присущие конкретному проекту. Очевидно, что вероятность того, что несколько событий произойдут одновременно гораздо ниже вероятности того, что они произойдут по отдельности. Поэтому стоимость многорисковых контрактов значительно ниже страховых тарифов. Кроме этого, данные соглашения могут включать в себя такие риски, которые, как правило, не покрываются страховыми

компаниями (политические и деловые риски, колебания валютного курса и цен на товары). Понятие рисковый капитал включает в себя различные схемы финансирования непредвиденных убытков, которые применяются в качестве альтернативы традиционному страхованию. Рисковый капитал может принимать форму опционов, конвертируемого долга, гибридных ценных бумаг и привилегированных акций. Залог акций позволяет разработчику проекта использовать часть принадлежащих ему акций в качестве средств обеспечения кредита. Кредитор может получить право собственности на акции только в случае неисполнения разработчиком проекта его обязательств по займу. Валютный своп - торгово-финансовая операция между двумя партнерами по обмену разнообразными финансовыми активами, с целью снижения или изменения характера рисков. В возобновляемой энергетике применяются обычно договоры валютного свопа в международных проектах, когда изменение валютного курса играет важную роль. Секьюритизация кредитов - привлечение финансирования путём выпуска ценных бумаг, обеспеченных активами, генерирующими стабильные денежные потоки и позволяет провести преобразование нерыночных активов в рыночные ценные бумаги. Так, в 2013г. компания SolarCity выпустила пакет ценных бумаг на сумму в $54 млн, обеспеченных активами, включающими в себя солнечные станции, контракты лизинга и долгосрочные контракты на поставку электроэнергии.

Важным фактором снижения рисков и повышения кредитного рейтинга компании при создании объектов на ВИЭ и являются также гарантии международных институтов и государственного сектора. Данные гарантии играют ключевую роль в снижении политического риска, так как на сегодняшний день традиционные страховые продукты не покрывают риски, связанные с изменением политической обстановки и законодательства в той или иной стране. Это имеет особенно большое значение при привлечения финансирования для проектов возобновляемой энергетики в развивающихся странах с высоким уровнем политического риска.

Заключение

В России последние пять лет получила активное развитие возобновляемая энергетика. В стране действует государственная программа, принят ряд нормативно-правовых актов в области ВИЭ. Федеральным законом от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» предусмотрено использование механизма продажи мощности генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), по договорам поставки мощности на оптовый рынок (ДПМ ВИЭ) по цене и в порядке, установленном Правительством Российской Федерации. Механизм поддержки ВИЭ заключается в проведении конкурсных отборов инвестиционных проектов по строительству генерирующих объектов, функционирующих на основе ВИЭ, и заключении в отношении отобранных проектов ДПМ ВИЭ [Федеральный закон от 26.03.2003 N 35-ФЗ]. Постановлением от 28.05.2013 №449 утверждены правила определения цены на мощность для таких генерирующих объектов, корректированные в целях снижения рисков принятия инвестиционных решений по проектам строительства генерирующих объектов ВИЭ постановлением Правительства Российской Федерации от 10.11.2015 №1210 [Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 N 449]. В 2015г. были внесены изменения в законодательные акты РФ по планам введения в строй мощностей на ВИЭ и по стимулированию использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электроэнергии, по требованиям к использованию отечественного

оборудования, способствующие более стабильному развитию возобновляемой энергетики [Распоряжение Правительства РФ от 28.07.2015г. №1472-р].

Освоение было начато с гелиоресурсов и ввода завода по производству фотоэлектрических панелей в Новочебоксарске и сооружения сетевых солнечных электростанций. Большинство действующих солнечных электростанций в России были введены в 2015-2017 гг., ключевой игрок на данном рынке компания «Хевел», которой принадлежат почти все возведенные сетевые электростанции: Орская СЭС имени А.А. Влазнева мощностью 40 МВт, Бурибаевская СЭС мощностью 10 МВт, Бугульчанская СЭС 10 МВт, Кош-Агачская СЭС мощностью 10 МВт и др. С 2017г. получает развитие и ветроэнергетика. В 2017 г. построены ЭС на ВИЭ, общей мощностью около 140 МВт, из которых 105 МВт – солнечные электростанции, и еще 35 МВт – первый крупный в стране ветропарк Симбирская ВЭС. Госкорпорация «Росатом» по конкурсам проектов, проходивших 2016-2017 гг., получает кредитное финансирование на строительство до 2024 г. ветроэлектростанций, суммарной мощностью 970 МВт в Адыгее, Краснодарском крае и Курганской области. «Энел Россия» получила право на строительство двух объектов совокупной мощностью 291 МВт в рамках тендера на строительство ветрогенерации, Общий объем инвестиций, который необходим для строительства двух ветропарков, составит около 405 млн евро.

Активизация процесса освоения ВИЭ в России требует внимательного подхода и изучения факторов риска, возникающих при создании и эксплуатации энергообъектов, а также анализа основных методов управления рисками, применимыми в возобновляемой энергетике. Хотя сооружение энергообъектов на ВИЭ получает в настоящее время большую государственную поддержку, снижающую риски в работе ЭС, однако программа поддержки составлена до 2024 г. В дальнейшем возобновляемая энергетика должна стать полноправным участником рынка. Высокий уровень риска проектов возобновляемой энергетики снижает их кредитоспособность и, следовательно, затрудняет получение заемного капитала. Фундаментальным требованием для привлечения финансирования является снижение рисков, которые имеют большую вероятность негативного воздействия на проект. И поэтому особенно важна уже на современном этапе разработка и адаптация в российских реалиях уже существующей в зарубежной практике методологии управления рисками использования всех видов возобновляемых источников энергии как для сетевого, так и для автономного энергоснабжения. Поскольку возобновляемая энергетика является достаточно молодым сектором, многие отраслевые данные еще не получили широкого распространения среди специалистов других областей, и именно специалисты возобновляемой энергетики совместно с разработчиками проектов и финансовыми структурами могут обеспечить научный подход к современному риск менеджменту в этой области.

Литература

Ермасова Н.Б. Риск-менеджмент организации. – М.: Альфа-Пресс, 2005. 240с.

Калинчик В.П., Кокорина М.Т. Оценка рисков генерации энергии из возобновляемых источников // Техніка в сільсько господарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, вип. 26, 2013р., с 225-230.

Колобова М. Об инструментах «зеленого» финансирования // Региональная энергетика и энергосбережение» 7.07.2017.
Кошелев В.М., Нургалиев Т.И. Оценка рисков проектов по производству биогаза в России // Известия ТСХА. Вып. 5. 2016. С.108-118.
Менеджмент риска. Принципы и руководство ГОСТ Р ИСО 31000-2010. Дата введения 09.01.2011.
Нефедова Л.В., Соловьев А.А. Анализ рисков освоения возобновляемых источников энергии в России // Проблемы анализа риска. 2015. Т.12. №6. С.56-63.
Павлова О.С. Риск-менеджмент на российских энергетических предприятиях // Вестник научно-технического развития. 2011. №6(46). С.34-43.
Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 N 449 (ред. от 10.11.2015) «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности»
Распоряжение Правительства РФ от 28.07.2015г. №1472-р.
Федеральный закон от 26.03.2003 N 35-ФЗ (ред. от 03.07.2016) «Об электроэнергетике» (с изм. и доп., вступ. в силу с 31.07.2016)
Arnold U., Yildiz Ö. Economic risk analysis of decentralized renewable energy infrastructures– A Monte Carlo Simulation approach // Renew. Energy. 2015. Vol. 77. P. 227-239.Volume 74, July 2017, Pages 548-568
Cristian Bustos, David Watts, Marysol Ayala. Financial risk reduction in photovoltaic projects through ocean-atmospheric oscillations modeling // Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 74, Pages 548-568, 2017.
Fera M., Macchiaroli1 R., Fruggiero F and A., Lambiase A. Risks Prioritization in Decision Making for Wind Energy Investments using Analytic Network Process (ANP) //International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 10 (2017) pp. 2567-2574
Global trends in renewable energy investment 2017. // Frankfurt School-UNEP Centre / BNEF. Frankfurt am Main 2017.18pp.
Horizon Wind Energy разработал инструмент по прогнозированию доходов и анализу рисков для ветряных электростанций // Электронный ресурс https://matlab.ru/articles/Horizon_user_story_rus.pdf
Renewables 2016. Global status report // REN21/UNEP. – Paris: REN21 Secretariat, 2017. 302pp.

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ ПО ПОТЕНЦИАЛУ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Л.В.НЕФЕДОВА

Проблема районирования территорий развивается в географической науке в вот уже много десятилетий в различных направлениях. Особое место занимает районирование территорий по обеспеченности ресурсами. При этом подчеркивается, что природно-ресурсное районирование является базовым для дальнейшего проведения регионального планирования. Основы учения о роли природных факторов в формировании территориальной структуры хозяйства были заложены в отечественной экономической географии Н.Н. Баранским [Баранский, 1956] и получили дальнейшее развитие в работах многих его учеников и последователей. Значительный вклад в методологию природно-ресурсного районирования внес А.А Минц. В целом кратко можно сказать, что природные ресурсы - это та природная база, опираясь на которую, развивается хозяйство страны. Но более полное определение дано А.А.Минцем, который считал, что «природные (естественные) ресурсы - это тела и силы природы, которые на данном уровне развития производительных сил и изученности могут быть использованы для удовлетворения потребностей человеческого общества в форме непосредственного участия в материальной деятельности». А.А.Минцем природно-ресурсный потенциал рассматривается как суммарная народохозяйственная ценность того или иного сочетания ресурсов, исчисленных в стоимостном выражении. В своих работах он указывал на необходимость при экономической оценке ресурсного потенциала территории использовать не только абсолютные показатели, которые оказываются привязанными к сетке административного деления, но и производные удельные величины рассчитанные на единицу площади или на одного жителя [Минц, Кахановская,1973].

Для районов, обладающих многими видами природных ресурсов, важна комплексная оценка природно-ресурсных сочетаний. В регионах с экстремальными природными условиями добыча и эксплуатация тех или иных уникальных по запасам, концентрации и качеству ресурсов иногда делает невыгодным их разработку при современном уровне техники. В связи с этим актуальным является изучение «территориального сочетания естественных ресурсов», под которым понимаются «источники ресурсов различного вида, расположенные на определенной целостной территории и объединяемые фактическим или перспективным совместным использованием в рамках единого производственно-территориального комплекса» (А.А.Минц). В такое сочетание включаются все компоненты природной среды - топливно-энергетические, гидроэнергетические, водные, лесные, земельные, рекреационные ресурсы, минеральное сырье, климатические и агроклиматические условия и др.

Рассмотрим общие принципы природно-ресурсного районирования, разработанные А.А.Минцем, необходимые для оценки территориальных сочетаний естественных ресурсов: во-первых, необходимо выделить границы сочетаний, во-вторых, учитывать динамичность таких сочетаний по составу и значению в зависимости от степени изученности территории и уровня развития производительных сил [Минц, Кахановская,1973]

В целом процесс районирования может различаться из-за поставленных целей. Их может быть много, и каждой будет соответствовать своя система регионов. Возможно применение следующих методов: картографический, статистический, математический, комплексный. В современной России чаще всего применяют 2 подхода в процессе выделения регионов: **сплошное (однородное) районирование** и **узловое районирование.** При однородном районировании вся территория разделятся на отдельные регионы. Районирование может быть 3-х уровней (макрорайонирование, районирование на мезоуровне и микрорайонирование). Узловое районирование подразумевает выделение в пределах территории каких-то узловых точек, или сгустков концентрации явлений. Районирование целесообразно рассматривать (в экономической географии) как систему методов разработки и обоснования конкретных систем районов. Районирование может рассматриваться в этом случае как способ дискретизации, перехода от непрерывной пространственной дифференциации к системе дискретных объектов, эту дифференциацию описывающих и ренпрезентирующих. Районирование с одной стороны выявляет пространственную дифференциацию, а с другой стороны позволяет объединить разнородные территории, схожие по какому-либо признаку.

Одним из методов, которой достаточно широко применяется при природно-ресурсном районировании, является метод многомерной классификации так называемой «Евклидовой метрики». По этому методу значения показателей, характеризующих территориальную единицу, можно интерпретировать как координаты точки многомерного пространства. В этом случае, чем более схожи территориальные единицы по исследуемым признакам, тем ближе друг к другу расположены соответствующие точки многомерного пространства. Таким образом, мера близости двух точек может характеризовать степень схожести соответствующих территориальных единиц. В качестве такой меры близости можно использовать расстояние между двумя точками в многомерном пространстве, так называемое евклидово расстояние, вычисляемое по формуле:

$$r_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} (x_{ij} - x_{ki})^2}$$

где r_{ik} - расстояние между точками i и k, m - число показателей, характеризующих территориальные единицы (число координат точек или размерность многомерного признакового пространства), x_{ij}, x_{kj} –j-е координаты соответственной i-й и – k-й точек (значения j-го показателя, характеризующие i-*ю* и k-ю территориальную единицу).

Степенью использования общего природно-ресурсного потенциала можно считать ту его часть, которая вовлечена в настоящее время в производство. Как и весь потенциал, её можно при желании выразить в баллах или стоимостных единицах, а также в процентах. Это используемая часть потенциала. Разница между потенциалом и его используемой частью показывает степень современного "недоиспользования" всего комплекса природных ресурсов. Природно-ресурсный потенциал, его величина и структура и особенно степень и структура его использования оказывают сильное воздействие на ход формирования экономических очагов, ядер и, в конечном счёте, экономических районов с их территориально-производственными комплексами. Таким образом, следует говорить о важной районообразующей роли

природного потенциала. И это, конечно, неудивительно, ибо использование природных ресурсов - следствие происходящих в той или иной стране или регионе социально-экономических процессов, определяющих ход формирования экономических районов.

Рассматривая распределение ресурсов возобновляемых источников энергии по территории как объект географического районирования, мы приходим **к двойственной задаче**: с одной стороны – необходимость характеристики пространственного распределения возобновляемых ресурсов, многие из которых распределены повсеместно по территории, и их распределение может быть представлено в виде изолиний (поступление солнечной радиации, характеристики ветрового режима,), с другой стороны – характеристика потенциалов дискретно располагающихся по территории ресурсов (залегание геотермальных ресурсов, потенциал малой энергетики).

При характеристике повсеместно распределенных ресурсов весьма важен выбор шкалы изолиний с тем, чтоб была отражена изменчивость параметра по территории, но при этом она не превышала точность измерения (определения) характеристик. Однако необходимо подчеркнуть, что с точки зрения географической науки данный вид картографического изображения информации о ресурсах ВИЭ еще не является по сути своей районированием, а лишь делением территории по одному заданному признаку.

Под районированием следует понимать деление территории или акватории на части (районы), различающиеся между собой и в чем-то однородные внутри себя. Признаки, по которым выделяются районы, могут быть различны по характеру, по широте охвата признаков, по цели районирования.

Поскольку ресурсное ВИЭ районирование мы можем рассматривать как этап экономико-географического районирования для целей регионального планирования освоения этого энергоисточника и оценки его роли в ТЭК регионов, то нам представляется целесообразным использование в качестве территориальной единицы (ТЕ) территории административных единиц разного масштаба. Тем более , что ресурсный потенциал всегда характеризует какую-либо конкретную территорию. Именно в пределах территорий административных районов хорошо прослеживаются сложившиеся и прогнозируемые профили хозяйственного использования ресурсного потенциала. Приняв территории административных районов за исходную ступень природно-ресурсного районирования, можно группировать их по всему природно-ресурсному потенциалу в региональные комплексы более высокого ранга.

Вопросы отображения на картах распределения по территории нашей страны от дельных видов возобновляемых энергоресурсов разрабатываются уже длительный период.

Ветроэнергетические ресурсы. В плане оценки ветроэнергетических ресурсов необходимо назвать в первую очередь разработки ГГО, построенные с помощью статистики среднегодовых скоростей ветра, полученной от метеостанций России [Атласы ветрового и солнечного климатов России, 1997]. Затем под руководством Минтопэнерго России и НЛ РИСО (Дания) рядом отечественных организаций был составлен Атлас ветра России по образцу и технологии Европейского Атласа Ветров, разработанного Национальной Лабораторией РИСО в виде отдельного тома, содержащего описание методики, обработанные данные по метеостанциям и карты

ветровых ресурсов. Атлас был составлен с использованием статистики распределения ветра по 8-16 направлениям в течение 10-15 лет от 320-360 метеостанций (МС); информации о расположении станций, высоте и типе анемометров; цифровых карт местности достаточно крупного масштаба (1:50 000 или 1:100 00 в радиусе 5-10 км от каждой метеостанции. Входные данные по каждой МС обрабатываются пакетом прикладных программ WAsP, разработанных в Дании и международно признанных, с целью устранения местных эффектов (орографии, шероховатости). Для определения ветрового потенциала в каждом конкретном месте необходимо было иметь цифровую карту данной местности. Тогда, используя обратную процедуру, WAsP корректирует региональные данные с учетом локальных эффектов. В настоящее время этот способ является международным стандартом по определению ветровых ресурсов местности, препятствий в виде построек и т.п.), влияющих на силу и направление ветра. [Старков и др., 2000].

В 2008 г. по данной тематике опубликован «Кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методических основ их определения», разработанный и подготовленный к изданию АНО НИЦ «АТМОГРАФ» при участии Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского и ОАО РАО «ЕЭС России». В работе содержится систематизированный свод сведений о полученных эмпирическими и расчетными методами динамических и энергетических характеристиках ветра в приземном и пограничном слое атмосферы, его временной и пространственной структуре и изменчивости на территории России, а также об энергетической и экономической эффективности современных ВЭУ в различных ветроклиматических регионах страны. Данные расчетов в точках проведения аэрологических измерений нанесены на схемы территории России [Национальный Кадастр…, 2008].

Геотермальные ресурсы. Достаточно подробно разработаны вопросы районирования территории России по запасам геотермальных ресурсов, базирующиеся на геологическом районировании и картировании. В геологии эксплутационные запасы подземных ископаемых при оценки возможностей их хозяйственного использования разделяются на: разведанные, прогнозные и освоенные. Оценка запасов термальных вод осуществляется на всех стадиях изысканий. Достоверность запасов показывается их категорией. Согласно «КЛАССИФИКАЦИИ ЗАПАСОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ» [приказ МПР РФ, Приказ №40 от 7.03.97г.] в России эксплуатационные запасы подземных вод подразделяются на:

- освоенные - категории А;
- разведанные - категории В;
- предварительно оцененные - категории С1;
- выявленные - категории С2.

Прогнозные ресурсы подземных вод по степени обоснованности относятся к категории Р. Каждая категория запасов служит основой для выполнения определенных стадий проектных решений по подготовке месторождений к дальнейшему изучению или освоению. При этом существует также деление всех запасов на балансовые и забалансовые [МПР РФ Приказ №718 от 1.09.11г.]. К балансовым принадлежат такие запасы полезных ископаемых, которые целесообразно разрабатывать при современном уровне техники и экономики. К забалансовым относятся запасы полезных ископаемых, которые из-за их малого количества, низкого качества, сложных условий эксплуатации или переработки ныне не используются, но в

дальнейшем могут явиться объектом промышленного освоения. По аналогии и потенциал ресурсов ВИЭ подразделяется на валовый, технический и экономический.

Всероссийский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО) в 60-е годы начал систематические исследования ресурсов месторождений термальных вод и парогидротерм и условий их формирования. Сотрудниками Института было составлено много разнообразных гидрогеотермических карт и методических руководств по изучению и оценке запасов термальных вод, уже в 1983 г. был подготовлен и выпущен капитальный «Атлас ресурсов термальных вод СССР», содержащий 17 карт 1: 2 5000 000 масштаба и объяснительная записка к нему. Ярославский научно-производственный центр «Недра» совместно с Петербургским горным институтом проводил оценку геотермальных ресурсов регионов России. В атласе собраны карты температур на глубинах от 25 м до 5 км, карты плотности теплового потока для любой точки России, карты расположения потенциальных геотермальных ресурсов. Другая половина атласа дает информацию о целесообразности освоения геотермальной энергии (строительства геотермальных систем) в каждом конкретном районе. В атласе содержатся рекомендации по выбору технологии добычи тепла с малых глубин. Это особенно актуально, поскольку технологии тепловых насосов находят все более активное применение для целей теплоснабжения в мировой практике.

Наряду с высокотемпературными месторождениями подземных вод большие территории занимают и участки с подземными низкопотенциальными ресурсами. Это тепло может быть освоено при применении технологий тепловых насосов, которые уже достаточно разработаны и применяются в Европе. Опыт эксплуатации таких установок показывает, что на киловатт затрачиваемой электроэнергии получить до трех киловатта тепловой. Геотермальные ресурсы температурой выше 40-50 градусов чаще всего залегают на глубинах не менее километра, но эффективность их освоения может быть в несколько раз выше. При дальнейшем росте цен на метан и затрат на газификацию уже сегодня многие геотермальные проекты сравнимы по эффективности с традиционными углеводородными. Ресурсом повышения эффективности подобных проектов становятся комбинированные источники теплоснабжения.

Однако если говорить по сути проблематики, то выделение на определенной территории, каждая точка которой характеризуется определенным значением того или иного параметра (физико-географической характеристики) : абсолютная высота местности, температура воздуха в определенный момент (отрезок) времени, поступление солнечной радиации, продолжительность солнечного сияния, скорость ветра (включая полный штиль) зон, которым присущи значения параметра в том или ином интервале, не является районированием как таковым.

Гелиоэнергетические ресурсы. Ярким примером именно ресурсного районирования территории являются исследования, проводившиеся сотрудниками Главной геофизической обсерватории (ГГО) оценкам потенциала ресурсов возобновляемого энергоисточника – солнечной радиации на территории СССР на основе данных измерений наземных актинометрических измерений на метеостанциях. Работы по созданию солнечного кадастра на территории бывшего СССР проводились в ГГО на протяжении нескольких десятков лет. Были разработаны методы долгосрочного прогноза поступления солнечной радиации, созданы карты распределения солнечной энергии по территории бывшего СССР. Особенно важно для

гелиоэнергетических расчетов многолетняя изменчивость характеристик, поэтому важным вкладом являются составленные в ГГО карты среднеквадратических отклонений суммарных приходов солнечной радиации [Пивоварова, Стадник, 1988].

Средние величины являются необходимой, но недостаточной энергетической характеристикой солнечной радиации. Необходим учет особенностей ее внутримесячной структуры и, прежде всего, повторяемость суточных сумм радиации – для решения задачи климатологического анализа статистических характеристик суточных сумм суммарной радиации в целях районирования территории страны по типам распределения. [Пивоварова, 1977; Стадник, 1983]. Для выделения типов распределения суточных сумм суммарной радиации на территории СССР использовались следующие характеристики: коэффициенты асимметрии и эксцесса, их сочетания, суточные суммы суммарной радиации и их изменчивость. Было выделено шесть типов распределения, характерных для территории СССР [Стадник, 1984].

Для учета зональности физико-географических условий, в том числе вызванной и циркуляционным фактором, 10-градусные широтные зоны рассматривались отдельно в пределах пяти крупных регионов СССР: 1) Европейская часть страны и Кавказ (до 1000 м над уровнем моря), 2) Средняя Азия, 3) Западная Сибирь (включая Урал), 4) Восточная Сибирь, 5) Дальний Восток. Материковая часть СССР севернее 70º с.ш. и острова арктического бассейна были выделены в отдельный район без разделения в меридиональном направлении. После выделения таким образом 11 районов с заранее заданными широтно-долготными границами был выбран комплекс радиационных показателей для их сравнительной оценки. Согласно расчетам районам были присвоены номера в соответствии с приоритетом потенциала солнечной энергии (табл.1). Результаты районирования представлены на рис. 1 [Рекомендации…., 1987].

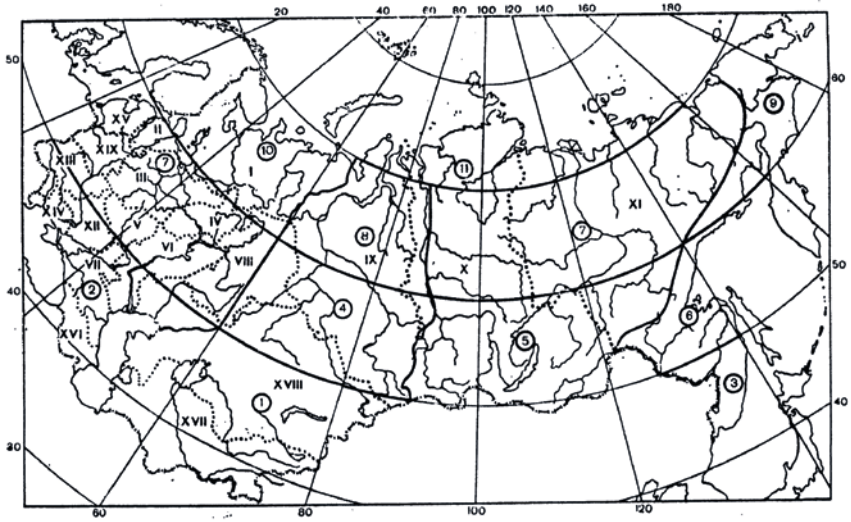


Рис. 1. Районирование территории СССР по потенциалу солнечной радиации. Цифра в кружке – номер района по приоритету потенциала, римская цифра – номер экономического района, точки – границы районов).

Таблица 1. Результаты ранжирования районов СССР по приоритету потенциала солнечной радиации

	70…60º с.ш.				60…50º с.ш.				50º с.ш. - южные границы		
	ЕЧС[1]	ЗС	ВС	ДВ	ЕЧС	ЗС	ВС	ДВ	ЕЧС	Ср.Аз	ДВ
№ р-на	10	8	7	9	7	4	5	6	2	1	3

[1] *ЕЧС – Европейская часть страны, ЗС – Западная Сибирь, ВС – Восточная Сибирь, ДВ – ДальнийВосток*

Наибольшим потенциалом солнечной энергии обладали южные районы СССР – Средняя Азия (1), юг Европейской части России, включая Кавказ (2) и юг Дальнего Востока (3). Выполненное ГГО им. А.Е. Воейкова районирование являлось ценным опытом при решении задачи определения степени обеспеченности различных районов гелиоресурсами. Подобное районирование имеет большое значение для рационального и оптимального использования ресурсов солнечной энергии. В то же время возникающие потребности в персональных установках преобразования солнечной энергии требуют в настоящее время все более уточненных данных по обеспеченности ресурсами солнечной энергии не столько крупных регионов, сколько конкретных географических точек. Появившиеся в последние годы дополнительные источники метеорологической информации, основанные, в частности, на многолетних спутниковых наблюдениях за поверхностью земного шара, предоставили возможность получить более детальные актинометрические данные, в том числе и для всех регионов России.

Проведенное тем или иным способом районирование не может рассматриваться как однозначный, окончательный вариант. Накопление данных метеорологических наблюдений, проведение геологических оценок и изысканий, привлечение принципиально новых видов данных, совершенствование известных и создание новых технологий использования ресурсов, возникновение разработок по использованию новых видов сырья для возобновляемой энергетики приводят к тому, что неизбежно возникает необходимость проведения новых разработок по районированию территорий и типизации районов на них расположенных.

Задачи районирования и типологии районов по потенциалу возобновляемых (как и других природных ресурсов) решаются для целей регионального планирования и развития производственно-территориальных комплексов. Однако экономические оценки территориальных сочетаний природных ресурсов, выражаемые по предложению А.А.Минца в денежном эквиваленте, являются очень сложной проблемой. На современном этапе развитии экономической географии при решении практических задач территориального планирования и сравнительного анализа территорий наблюдается тенденция перехода от денежного выражения к относительным единицам (путем различных математических сопоставлений со средними по региону значениями) или же экспертным бальным оценкам. Для рассмотрения территориальной структуры региона во взаимосвязи и развитии используются различные (совокупности) методы. Это и общенаучные и специальные (например, сравнительно-общегеографические). Здесь особенно необходимо выделить методы, базирующиеся на сравнении единиц между собой путем выделения

наибольших отклонений от среднего. Особое место занимают методы комплексной оценки ресурсов.

В научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии Географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова была разработана и применена для типологии районов в ряде регионов методика оценки комплексной оценки ресурсов возобновляемых источников энергии [Нефедова, 2008].

Особенности природных условий и хозяйственной деятельности определяют региональные различия потенциала возобновляемых источников энергии. При анализе возможностей и перспектив использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и оценке их будущей роли в энергокомплексах регионов представляется важным рассматривать не каждый ресурс изолированно, а проводить типологию районов на основе характеристики уровня обеспеченности ресурсами комплекса ВИЭ, имеющих наибольшее значение для данного региона.

Для комплексной оценки ресурсов возобновляемых источников энергии предлагается методика расчета суммарного удельного нормированного потенциала ВИЭ в зависимости от количества жителей – потребителей энергии.

В качестве основных показателей потенциала отдельных видов ресурсов ВИЭ могут быть использованы: поступление солнечной радиации на единицу площади, удельный технический потенциал ветроэнергетических ресурсов, удельная мощность перспективных малых гидроэлектростанций (МГЭС), удельный технический потенциал использованием отходов сельскохозяйственного производства в регионе, удельный потенциал использования геотермальной энергии. Все показатели рассматриваются в расчете на 1 тыс. жителей региона.

При сопоставлении показателей, имеющих разный порядок величин, проводим нормирование значений по каждому показателю потенциала ресурсов, что является модификацией алгоритма разработанного В.С.Тикуновым [Тикунов, 1997]. Алгоритм нормирования показателей позволяет получать синтетические характеристики оценочного положения территориальных единиц по единой шкале и ранжировать данные территориальные единицы на основе этих оценок. Нормализация исходных показателей позволяет преодолеть их разноразмерность, сохранив те же соотношения между видами ресурсов по различным районам. Нормированные значения (a_{ij}) удельного потенциала ресурсов рассчитываются по формуле:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^0}{x_j^{\max} - x_j^0} \qquad \begin{matrix} i = 1,2,3....n \\ j = 1,2,3...m \end{matrix}$$

где n – количество территориальных единиц

m – количество показателей потенциала ресурсов (x_{ij}),

x_j^o – наименьшее значение (по каждому показателю ресурсов) из всех регионов,

$x_j^{\max}$ – наиболее отличающееся от x^o_j значение показателя.

Такая нормировка дает возможность выразить отклонение всей системы показателей от наилучших и наихудших оценочных значений и тем самым более достоверно с содержательных позиций соразмерить их. Она позволяет устранить количественные соотношения между значениями удельного потенциала по разным видам ресурсов для изучаемых территориальных единиц.

Важным представляется характеристика общей обеспеченности территориальных единиц ресурсами ВИЭ. Для этого предлагается определить суммарные зна-

чения по всем удельным нормированным потенциалам (УНП) ресурсов по отдельным видам возобновляемых источников энергии.

Величина

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} \frac{x_{ij} - x_j^0}{x_j^{\max} - x_j^0} \qquad \begin{matrix} i = 1,2,3....n \\ j = 1,2,3...m \end{matrix}$$

была названа «Суммарный удельный нормированный потенциал» (СУНП).

Разработанная методика была опробована нами для типологии штатов Индии по обеспеченности ресурсами ВИЭ. В целом страна обладает высоким потенциалом ресурсов ВИЭ (табл.2).

Таблица 2.Потенциал ресурсов возобновляемых источников энергии Индии [Annual Report, MNES, 2007].

Солнечная энергия	$5x10^{15}$кВт.ч/год
Энергия ветра	452000 МВт
Малые ГЭС	150000 МВт
Термическая энергия океана	50000 МВт
Биомасса	50000 МВт
Бытовые и промышленные отходы	27000 МВт
Бигазовые установки	12000 тыс.шт.

Штаты Индии значительно различаются как по общей численности населения, так и числу сельских жителей. В связи с этим для получения картины, соответствующей фактическим условиям обеспеченности населения ресурсами ВИЭ, при анализе потенциала использовались удельные показатели, отнесенные к численности населения в штате. При расчете удельного потенциала ресурсов малой гидроэнергетики расчет проводился в отношении к численности сельского населения, поскольку именно оно является потребителем энергии, которая может быть получена на автономных МГЭС. Аналогично и для потенциала создания сельских биогазовых установок в расчетах участвовало число сельских жителей штата. Для ресурсов ветроэнергетики и энергетики с использованием биомассы расчеты проводились по данным о численности всего населения штата, поскольку электроэнергия от объектов, уже действующих в Индии на основе данных ресурсов, поступает в энергосистемы штатов и может быть использована всеми жителями. Таким образом, при типологии по обеспеченности ресурсами ВИЭ были использованы следующие показатели:

- удельный технический потенциал ветроэнергетических ресурсов в штате на 1 тыс. жителей.
- удельный технический потенциал мощности электростанций с использованием отходов сахарного производства в штате на 1 тыс. жителей.
- удельная мощность перспективных МГЭС (<3 МВт) на 1 тыс. сельских жителей.
- потенциал количества биогазовых установок в штате на 1 тыс. сельских жителей.

– среднее по территории штата значение среднегодового прихода суммарной солнечной радиации на единицу площади за сутки.

Таблица 3.Значения суммарного удельного нормированного потенциала на территории Южного Федерального Округа

Административные единицы ЮФО	Значения удельных нормированных технических потенциалов					Значения СУНП
	Гелиоресурсы (производство тепла)	Гелиоресурсы (выработка эл.энергии)	Ветроэнергетические ресурсы	Ресурсы малой гидроэнергетики	Биоэнергетические ресурсы (отх. сельского хоз-ва)	
Респ.Адыгея	0,033	0,040	0,115	0	0,506	0,694
Респ.Дагестан	0,048	0,051	0,243	0,01	0,238	0,590
Респ.Ингушетия	0,000	0	0,044	0	0,135	0,179
Кабардино-Балкарская Респ.	0,022	0,027	0,01	0,009	0,231	0,299
Респ. Калмыкия	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	5,000
Карачаево-Черкесск. Респ	0,087	0,104	0,07	0,048	0,138	0,447
Респ. Сев.Осетия-Алания	0,014	0,025	0,002	0,016	0,271	0,328
Чеченская Респ.	0,029	0,036	0,004	-	-	0,069
Краснодарский край	0,038	0,040	0	0,005	0,903	0,986
Ставропольский край	0,090	0,090	0,117	0,063	0,807	1,167
Астраханская обл.	0,159	0,146	0,068	0,221	0,142	0,736
Волгоградская обл.	0,121	0,132	0,068	0,339	0,783	1,443
Ростовская обл.	0,055	0,062	0,021	0,098	0,555	0,791

Проведенная типология штатов Индии на основании расчетов предложенного суммарного удельного нормированного потенциала ВИЭ позволила составить карту обеспеченности населения страны ресурсами для создания объектов возобновляемой энергетики [Нефедова, 2003].

В дальнейшем были выполнены разработки по типологии территориальных единиц различного масштаба при комплексных оценках обеспеченности территорий ресурсами возобновляемых источников энергии. Нами проводятся работы по оценке значений показателя суммарного удельного нормированного потенциала для территорий России, в частности для Южного федерального округа по материалам, опубликованным Институтом Энергетических стратегий, с использованием современных статистических материалов по субъектам РФ [Справочник по ресурсам, 2007]. Для расчетов по ЮФО были использованы показатели технического потенциала наиболее значимых для данного региона ресурсов: ветроэнерге-

тических (валовый и технический), гелиоэнергетических (валовый, технический для производства тепла и технический для выработки электроэнергии), ресурсов малой гидроэнергетики (валовый, технический и экономический), валовый биоэнергетический ресурсов отходов агропромышленного комплекса и органических отходов населенных пунктов для двух вариантов расчета. Выполнен анализ информации о геотермальных ресурсах ЮФО.

Проведенные расчеты СУНП показали, что наибольшими возможностями внутреннего энергообеспечения населения за счет использования ВИЭ имеет республика Калмыкия. В первом варианте расчетов (табл.3) различия значений показателя СУНП по другим административным единицам ЮФО невелики. В связи с этим для уточнения распределения комплекса ресурсов ВИЭ по территории была выполнения серия расчетов без включения данных о значениях нормированных технических потенциалов ресурсов ВИЭ на территории Калмыкия (рис.2).

Рис.2. Показатели суммарного нормированного потенциала по территории Южного Федерального Округа (без Респ. Калмыкия).

Во втором варианте расчетов высокие значения показателя СУНП (более 2,00) определены для Ставропольского края, Астраханской и Волгоградской областей. Краснодарский край, имеющий высокий валовый потенциал ресурсов ВИЭ, при расчетах ресурсов на душу населения в целом по субъекту характеризуется значением СУНП равным 1,16. Это показывает необходимость уточнения оценок путем проведения расчетов по более мелким административным единицам. Данная методика оценки суммарного потенциала территории имеет и узко региональное значение на мезоуровне.

В ряде регионов России в связи с проблемами в техническом состоянии энергогенерирующих объектов создаются аварийные ситуации с энергообеспечением населения, возникает необходимость в решении вопросов создания дублирующих мощностей по производству электроэнергии. При этом остро стоят вопросы социального характера и жизнеобеспечения населения. Комплексная оценка ресурсов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в регионе позволяет делать оценки о перспективности повышения энергетической безопасности регионов с их использованием. Существуют также примеры районирования территории по перспекти-

вам использования ресурсов ВИЭ прикладного плана. Так в работе [Елистратов, 2013] проведено районирование территории России с целью выявления областей перспективного применения ветро-солнечных энергокомплексов для целей автономного электроснабжения. При этом были выделены следующие типы районов перспективности электроснабжения: только дизельгегнераторы (ДГ), ветроэнергоустановки (ВЭУ) в комплексе с ДГ, солнечные фотоэлектрические установки (СФЭУ), СФЭУ в комплексе с ВЭУ, строительство МикроГЭС.

В 2015 г. специалистами МГУ имени М.В.Ломоносова, Института энергетики НИУ ВШЭ, Объединенного института высоких температур РАН был составлен «Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России» [Атлас, 2015]. В Атласе представлены карты ресурсов и данные по отдельным видам ВИЭ, а также приведены методики оценки и результаты расчетов природных ресурсов и энергетических потенциалов следующих видов возобновляемых источников энергии на территории РФ: солнца, ветра, малых водных потоков торфа, биомассы, в том числе сельскохозяйственных отходов, ТБО, ОСВ, отходов лесной и деревообрабатывающей промышленности.

Значительные перспективы для более полного и точного проведения комплексного районирования по потенциалу ресурсов ВИЭ открываются при использовании данных геоинформационного картографирования. В НИЛ ВИЭ МГУ имени М.В.Ломоносова совместно с ОИВТ РАН создана ГИС «Возобновляемые источники энергии России» (http://gisre.ru/), в которой представлены карты прихода солнечной радиации на различным образом ориентированные поверхности, среднегодовые характеристики скоростей ветра на высотах 10-120м с рассчитанными соответствующими валовым и техническим удельными энергопотенциалами ветроресуров и характеристиками повторяемости значений скорости ветра, данные о биэнергетическом потенциале субъектов РФ, о действующих энергобъектах на ВИЭ. Данная ГИС регулярно дополняется и обновляется, что позволяет рассматривать ее как значимую и перспективную основу для проведения дальнейших разработок по районированию территории России как по потенциалу различных видов или комплекса ВИЭ, так по и перспективам его использования.

Литература

Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / Т.И.Андреенко, Т.С.Габдерахманова, О.В.Данилова и др. – М.: РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2015. – 160 с.

Атласы ветрового и солнечного климатов России / Под ред. М.М. Борисенко, В.В. Стадник. – С-Пб.: Изд-во ГГО им. А.И. Воейкова, 1997.

Баранский Н.Н. Экономическая география. Экономическая картография. Разд. «Учет природной среды в экономической географии». – М., 1956.

Безруких П.П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. – М: Наука, 2004.

Гладкевич Г.И. Природные условия и природные ресурсы / Экономическая и социальная география России. Учебник для ВУЗов. Под ред. А.Г.Хрущева. 4-ое изд. – М.: Дрофа, 2009. С.23-44.

Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. Изд.2 доп. – СПб.: Наука, 2013. – 308 с.

Колосовский Н.Н. Энергопроизводственные циклы. – М.: Наука, 1974.
Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Приказ №718 от 1.09.2011 г. «Об утверждении Классификации запасов и прогнозных ресурсов теплоэнергетических и промышленных подземных вод».
Министерство природных ресурсов Российской Федерации. Приказ №40 от 7.03.1997 г. «Об утверждении классификаций запасов полезных ископаемых».
Минц А.А. Экономическая оценка естественных ресурсов. – М.: Мысль, 1973.
Минц А.А., Кахановская Т.Г. Опыт количественной оценки природно-ресурсного потенциала районов СССР // Изв. АН СССР, сер. География. 1973. №5. С 55-65.
Национальный Кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения / Под редакцией В.Г. Николаева. М.: Изд. «АТМОГРАФ». 2008. 584 с.
Нефедова Л.В. Метод регионального анализа ресурсов ВИЭ на основании расчета показателя суммарного удельного нормированного потенциала // Теплоэнергетика. 2008. №12. С.2-5.
Нефедова Л.В. Региональный анализ ресурсов возобновляемых источников энергии, состояния и перспектив их использования в Индии // Вестник Московского Университета. Серия 5. География. 2003. №3. С.50-56.
Объяснительная записка к атласу карт ресурсов термальных вод СССР. – М., 1983.
Пивоварова З.И., Стадник В.В. Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии территории СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 291 с.
Рекомендации по определению климатических характеристик гелиоэнергетических ресурсов на территории СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 31 с.
Романова Э.П., Куракова Л.И., Ермаков Ю.Г. Природные ресурсы мира. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 304с.
Руденко В.П. ПРП территории как основа природно-ресурсного районирования // География и природные ресурсы. 1982. № 3. С. 16-20.
Савельева И.Л. Природно-ресурсное районирование России // География и природные ресурсы. 1997. № 1. С. 5-12.
Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии в России и местным видам топлива (показатели по территориям) / Под ред. П.П. Безруких. – М.: ИАЦ «Энергия», 2007. – 272с.
Стадник В.В. Статистические характеристики суточных сумм суммарной радиации. – Труды ГГО, 1983, вып. 475, с.61-68.
Старков А.Н., Ландберг Л., Безруких П.П., Борисенко М.М. Атлас ветров России. – М.: «Можайск-Терра», 2000. – 560 с.
Тикунов В.С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? (Опыт формальных классификаций). – Москва-Смоленск: Изд-во СГУ, 1997. – 367 с.
Annual Reports 1995-1996, 1999-200б, 2006-2007. Ministry of Non-Conventional Energy Sources. Government of India. - New Delhi,1996, 2000, 2007.
India 2000. A Reference Annual / Publication Division, Ministry of Information and Broadcasting. Govt. of India. – New Delhi. 2001.

ПЛАН ГОЭЛРО И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

К.С. ДЕГТЯРЕВ, А.М. ЗАЛИХАНОВ, А.А.СОЛОВЬЕВ

Использование ВИЭ в России до революции 1917 г. История использования ВИЭ в России в современном понимании отсчитывается примерно с конца XIX-начала XX в., когда началось строительство первых гидроэлектростанций (причем, по современным критериям, все они попадают под определение малых ГЭС) и электростанций на торфе. К 1913 г. в России действовало 78 ГЭС [Дегтярев, 2015].

Из крупных торфяных электростанций следует отметить Богородскую станцию (в настоящее время – Ногинский район Московской области), запущенную в эксплуатацию в 1913 г., мощностью 5 МВт. В проектировании станции принимал участие Г.М. Кржижановский.

В целом установленные перед Первой мировой войной в России электроэнергетические мощности оставались небольшими – чуть более 1 ГВт [Гришин, 2009], а выработка электроэнергии в 1913 г. составила 1,9 млрд кВт·ч, или 14 кВт·ч на душу населения (для сравнения: в США на тот момент душевое производство электроэнергии составляло 236 кВт·ч [Гвоздецкий, 2001], в современной РФ – около 6 700 кВт·ч, в современных США – более 12 000 кВт·ч).

В России в 1866 г. было основано Императорское русское техническое общество, в котором в 1877 г. был создан электротехнический отдел (VI отдел). Российские профессионалы еще тогда неоднократно поднимали вопросы стратегического развития электроэнергетики страны. В значительной степени идеи, высказанные в тот период, в том числе Г.М. Кржижановским, легли в основу плана ГОЭЛРО.

В частности, выступая 21 ноября 1915 г. на совещании по подмосковному углю и торфу под эгидой Бюро объединенных технических организаций с докладом «Областные электрические станции на торфе и их значение для Центрального промышленного района России», Кржижановский настаивал на необходимости активного использования местных энергетических ресурсов.

Расчеты, приведенные им, показывали достаточность торфяных ресурсов для обеспечения развития промышленности района в течение многих десятилетий, а также более высокую экономическую эффективность производства электроэнергии на торфяных станциях с ее транспортировкой по линиям электропередач к месту потребления по сравнению с перевозкой непосредственно торфа. Один из примеров такого расчета приводится в докладе [Кржижановский, 1957]: *«Сооружение высоковольтной электропередачи на 100-верстное расстояние и трансформаторных устройств обошлось бы по ценам, имевшим место до войны, в круглых цифрах в 1 млн рублей. По линии вышеуказанной стоимости возможно передать в течение года с небольшими потерями 40 млн кВт·ч, что соответствует, как мы видели выше, расходу 6 млн пудов торфа в год. Перевозка же этого количества торфа с операциями взвешивания, нагрузки и выгрузки обойдется, по действующему железнодорожному тарифу, в круглых цифрах в 140 тыс. руб...»*

ВИЭ в плане ГОЭЛРО. Возвращение к данной теме произошло уже после 1917 г., в критической для экономики России послереволюционной и послевоенной ситуации.

О необходимости использования местных, в том числе возобновляемых, источников энергии упоминал В.И. Ленин в «Наброске плана научно-технических работ» от апреля 1918 г.:

«Академии наук, начавшей систематическое изучение и обследование естественных производительных сил России, следует немедленно дать от Высшего совета народного хозяйства поручение образовать ряд комиссий из специалистов для возможно более быстрого составления плана реорганизации промышленности и экономического подъема России. В этот план должно входить: использование непервоклассных сортов топлива (торф, уголь) для получения электрической энергии с наименьшими затратами на добычу и перевоз горючего. Водные силы и ветряные двигатели вообще и в применении к земледелию» [Ленин, 1969].

При всех различиях того периода и нынешнего времени обращает на себя внимание сходство геополитической ситуации. Ранее, по условиям Брестского мира и в целом вследствие войн и революционных катаклизмов, Россия на тот момент находилась практически в границах современной Российской Федерации, утратив контроль над южными и западными территориями, и в «Наброске...» отдельно оговаривается необходимость поиска собственных ресурсов развития – *«без Украины и без занятых немцами областей»*.

На содержание «Наброска…» не могли не повлиять состоявшиеся ранее (в ноябре-декабре 1917 г.) встречи Ленина с энергетиками И.И. Радченко и И.В. Винтером [Гвоздецкий, 2001], на которых поднимался, в том числе, вопрос использования местных энергоресурсов в новых, критических условиях. Кроме того, по итогам встреч было принято постановление о строительстве Шатурской ГРЭС и начата подготовка сметы строительства Волховской ГЭС под руководством Г.О. Графтио, в тот момент возглавлявшего «Электрожелдор».

Ленин активно поддерживал и способствовал продвижению идей и разработок Кржижановского, занимавшего с 1919 г. пост председателя Главэлектро ВСНХ, а с февраля 1920 г. – председателя Государственной комиссии по электрификации России (ГОЭЛРО).

В январе 1920 г. Кржижановский снова выступил на тему использования торфяных ресурсов в докладе «Торф и кризис топлива». В то время Россия находилась, по сути, в энергетической блокаде. Основная часть довоенных источников энергоснабжения была потеряна – инфраструктура Донбасса разрушена, а уголь Домбровского бассейна (современная Польша) оказался за пределами России, контроль над нефтепромыслами Баку также был на тот момент потерян.

Кржижановский характеризует положение дел в Центрально-промышленном районе и России в целом следующим образом: *«До войны Россия покрывала почти две трети своего промышленного потребления топлива каменным углем: донецким, домбровским и заграничным, а остальную треть – нефтью и дровами. Торф и местные угли играли лишь ничтожную роль. На отопление домов потреблялось больше, чем на промышленность, и здесь преобладающее значение имели дрова. Потеря домбровского и заграничного углей лишила нас сразу 30% всего промышленного топлива... Нам приходится теперь приступить к переоценке топливных ценностей. Мы не можем рассчитывать на быструю поправку в направлении угля и нефти. Надежда на сланцы пока оста ется надеждой. Ясно, что следует отнестись с особым вниманием к тем перспективам, которые открывает использование торфа».*

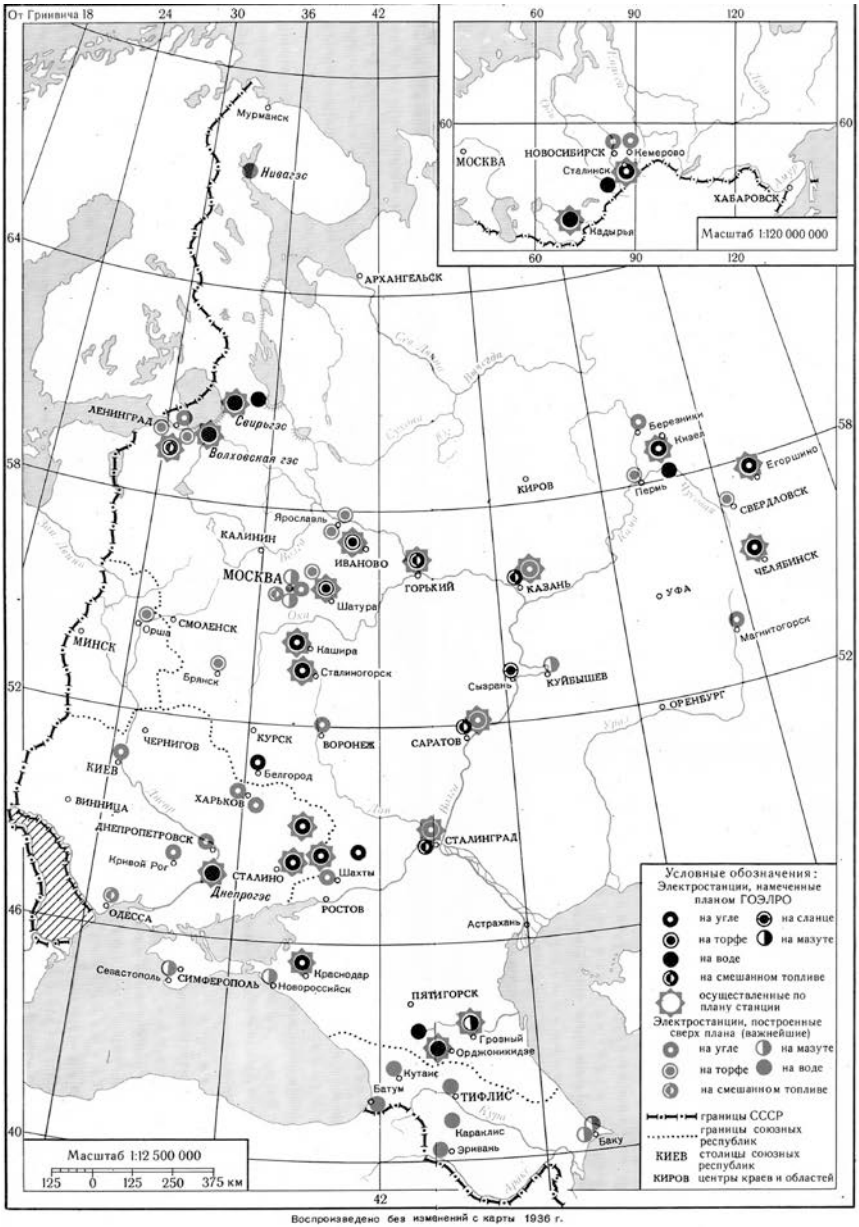


Рис. 1. Выполнение плана ГОЭЛРО к 1936 г. [Кржижановский, 2006]

В дальнейшем план ГОЭЛРО составлялся с опорой на местные энергоресурсы. С точки зрения ВИЭ можно выделить следующие его составляющие:

- акцент на местные виды топлива в каждом районе;
- торфяные ресурсы;
- гидроэнергетические ресурсы;
- перспективы использования ветроэнергетики.

Положение о Комиссии ГОЭЛРО было утверждено 24 февраля 1920 г. Советом Рабочекрестьянской обороны и подписано В.И. Лениным. Комиссия ГОЭЛРО была сформирована в составе 19 человек, а всего в работе было задействовано около 240 человек [Гвоздецкий, 2001].

План государственной электрификации России (план ГОЭЛРО) был одобрен 22 декабря 1920 г. VIII Всероссийским съездом советов и утвержден декретом СНК «Об электрификации РСФСР» на IX Всероссийском съезде советов 23 декабря 1921 года.

ГОЭЛРО был планом не только развития энергетики, но и экономики страны в целом на основе ее электрификации. Более того, районирование страны в соответствии с планом ГОЭЛРО легло в основу принятого Госпланом экономического районирования России и СССР.

Непосредственно электроэнергетическая составляющая плана включала реконструкцию и строительство в течение 10-15 лет 30-ти электростанций во всех основных районах страны установленной мощностью более 1,7 ГВт и рабочей мощностью более 1,4 ГВт, в том числе 0,65 ГВт на базе ВИЭ [Пчелин, 2010]. За 15 лет план ГОЭЛРО был даже перевыполнен – построено не 30, а 40 современных, по меркам того времени, электростанций (рис. 1), работавших главным образом на местном сырье, при этом почти в половине случаев – на ВИЭ. В качестве возобновляемых источников выступали гидроэнергия и торф.

Идеи и планы развития энергетики на основе ВИЭ в 1920-1930-е гг. В дальнейшем планировалось еще более активное использование местных возобновляемых источников. В частности, выступая на V съезде Советов 23 мая 1929 г., Г.М. Кржижановский отдельно упомянул потенциал гидро- и ветроэнергетики: *«Это заставляет думать об использовании и других источников энергии, в первую очередь о водной энергии. Здесь та же знакомая нам картина. Мы не знаем своих собственных водных богатств. В то время как составлялся план ГОЭЛРО, мы считали природную мощность наших водных сил, таких, которые давали бы возможность делать в одном месте гидравлические установки величиной в 10 тыс. л.с. – всего в 20 млн л.с. За эти годы эта оценка поднялась до 40 млн л.с. Теперь есть возможность говорить, что ресурсы нашей водной энергии на самом деле превосходят 60 млн л.с.... У нас сейчас использование водной энергии ничтожно: едва 1,5% имеющихся природных ее запасов...»* [Кржижановский, 1957].

Эти слова до сих пор сохраняют актуальность – потенциал гидроэнергии в России использован далеко не в достаточной степени. Особый интерес представляют оценки Кржижановским перспектив ветроэнергетики:

«... Пару слов еще об одном источнике энергии, который мы не должны упускать из виду и который в будущем будет играть колоссальнейшую роль, - это энергия ветра... Грубые прикидки наших ученых говорят, что мы можем с поверхности европейской части СССР получить в течение года 3000 млрд кВт·ч

энергии, то есть мощность, превосходящую все мыслимые мировые потребности в ней. Предстоит вплотную подойти к этому великому источнику, и пятилетка ВСНХ правильно намечает поднять установленную мощность ветродвигателей до 500 тыс. л.с. Мы должны ветровыми двигателями более совершенной конструкции заменить старые ветряки в деревне, которые, как они ни были плохи, давали общую мощность до 800 тыс. л.с. Эти ветряки могут быть и пионерами сельской электрификации. А со временем мы их включим в сеть электропередач, и они заживут новой жизнью...».

В 1933 г. в одном из первых номеров журнала «Техника Молодежи» была опубликована статья Б.В. Дюшена «Ветер-вода-солнце» [Дюшен, 1933], где рассматривались идеи и перспективы использования основных ВИЭ, включая ветроэнергетику, речную гидроэнергетику, использование энергии приливов, солнечную энергетику. Сам обобщающий термин «возобновляемые источники энергии» ни в статье Дюшена, ни в работах и выступлениях Ленина, Кржижановского и других деятелей того периода не используется. В то же время речь идет именно о ВИЭ в современном их понимании. Необходимость их активного вовлечения в энергетику обосновывалось растущим энергопотреблением и риском исчерпания используемых в то время энергоресурсов: *«По подсчетам ряда ученых для полной механизации труда необходима мощность в 2 кВт на каждого жителя земного шара. Пока же современное человечество располагает только 0,04 кВт на душу населения, распределяемого следующим образом: энергия, получаемая от сжигания угля, нефти, торфа, дров и других горючих веществ, составляет 0,023 кВт; энергия движущихся вод – 0,016 кВт; энергия ветра – 0,001 кВт. Эти цифры убеждают нас в том, что количество вырабатываемой энергии получается главным образом за счет расходования природных запасов топлива, восстановление которых идет крайне медленно».*

В духе своего времени автор возлагал надежды прежде всего на социалистическую экономику СССР с ее грандиозными проектами развития и централизованным планированием в противовес неорганизованной рыночной стихии капиталистического мира. В то же время отмечаются интересные идеи и достижения в использовании ВИЭ в западных странах. Энергетика на основе новых источников объявляется «энергетикой будущего».

В разделе статьи, посвященном ветроэнергетике («голубому углю»), говорится о наличии в СССР на тот момент около 170 тыс. ветряных мельниц. В то же время автор говорит о необходимости строительства крупных ветропарков (хотя само слово «ветропарк» также не используется): *«Энергетика будущего требует не ветряка для размола муки или подъема воды в цистерну для нужд небольшого отдельного хозяйства,* ***она требует создания громадных по мощности и устойчивых по режиму работы ветряных установок.*** *Эти установки должны передать свое движение электрогенераторам, которые дадут ток в линии электропередачи и этим током обслужат потребности не только ближайших местностей, но и целых обширных районов».*

В качестве пионерного проекта такого рода упоминается уже построенная ВЭС на 100 кВт близ Севастополя и запроектированная ВЭС в районе Балаклавы. Дюшен отмечает также экономическую сторону дела и принцип работы энергосети, работающей на силе ветра: *«Ветроэлектростанции должны работать «кус-*

тами», обслуживая общую кольцевую электрическую сеть высокого напряжения. При

этом условии отпадает вопрос о неравномерности силы ветра и необходимости устраивать сложные и дорогие аккумуляторы энергии».

В разделе, посвященном гидроэнергии («белому углю») упоминаются огромные гидроэнергетические ресурсы СССР, оцениваемые в величину не менее 50 млн л.с. только для наиболее известных и доступных водотоков. Акцент делается также на необходимости создания большого количества мощных гидротехнических сооружений. Отдельно упоминается возможность использования энергии приливов: *«Принципиально задача использования приливов не представляет больших технических затруднений. С астрономической точностью приливы совершаются два раза в сутки. При этом подъем уровня воды колеблется в разных местах побережья от 4 до 18 м. Во время прилива воду направляют в ограниченную плотинами бухту. При отливе же запасенную воду можно спустить, при этом энергия движущейся воды перерабатывается с помощью гидротурбин в электрический ток».*

Отдельный интерес представляют воззрения автора на возможности использования солнечной энергии. Прежде всего, он отмечает повсеместно высокий естественный потенциал солнечной энергии: *«Величина энергии солнечных лучей, падающих на 1 м^2 поверхности, определяется примерно в 1 кВт. Можно считать, что общая площадь крыш большого города получает в среднем от 10 до 100 млн кВт солнечной энергии. При использовании только 1-2% можно получить от 100 тыс. до 2 млн кВт·ч полезной энергии».*

В то же время в 1930-е гг. использование солнечной энергии находилось еще на уровне по большей части теоретических изысканий, что отмечается в статье. Автором упоминаются уже реализованные проекты солнечных коллекторов или концентраторов (в терминологии, используемой Дюшеном, парников и тепловиков): *«... Система парников или тепловиков, устроенных впервые Ф. Шуманом в Филадельфии. Действие тепловика основывается на замечательном свойстве стекла и некоторых других материалов пропускать только определенную группу тепловых лучей (инфракрасных) и задерживать все остальные тепловые лучи.».*

Автор упоминает и другие отечественные разработки и достижения и в солнечной энергетике, и в энергосбережении, в том числе, принадлежащие также Б.П. Вейнбергу: *«Проф. Вейн- берг с помощью т. Коймана построил легкий домик, являющийся своего рода «аккумулятором» тепла. В этом легком домике применена особая изоляция стен, правильно выбрано распределение и расположение окон, окраска стен и крыши, в результате получилась постройка - прохладная летом и теплая зимой без какого- либо отопления».* В статье упоминается и ряд грандиозных, в том числе фантастических, даже по меркам нашего времени, проектов.

В заключение автор подчеркивает, что страной энергетики будущего является именно Советский Союз благодаря социалистическому хозяйству. Тот период давал основания для подобных надежд - более того, новая энергетика (на основе ВИЭ) активно развивалась в нашей стране в 1930-е - 1960-е гг. и, несмотря на торможение в последующие годы, работы не прекращались.

Этапы развития энергетики на основе ВИЭ в СССР и постсоветской России. После 1920-х - 1930-х гг. можно выделить четыре этапа развития энергетики на основе ВИЭ в нашей стране:

- этап активного роста в 1930-е - 1960-е гг.;
- замедление роста в 1960-е - 1980-е гг.;
- стагнация в 1990-е - 2000-е гг.;
- возобновление интереса, начиная с 2000-х гг.;
- устойчивый рост использования ВИЭ (после 2020-2030 гг.).

На первом этапе следует отметить прежде всего мощное развитие гидроэнергетики, включая строительство малых ГЭС – к началу 1960-х гг. их число достигло 2,5 тыс., а также рост использования торфа в энергетических целях.

К 1940 г. добыча торфа в СССР превысила 27 млн т в год, к середине 1970-х гг. объем добычи торфа вырос до 90-100 млн т в год в РСФСР и до 130-150 млн т в СССР в целом, что составляло примерно половину мировой добычи торфа в то время [Дегтярев, 2016]. Это можно рассматривать как продолжение политики, заложенной в плане ГОЭЛРО [Бушуев, 2015].

Кроме того, активизировалось использование других видов ВИЭ, в том числе упоминавшихся в программных документах, статьях и выступлениях в 1920-е - 1930-е годы.

В частности, продолжалось строительство ветроэлектростанций. В 1950-1955 гг. в СССР производилось 9000 ветроустановок в год, а в Казахстане была построена комбинированная электростанция ВЭС в паре с дизельным двигателем общей мощностью 400 кВт, ставшая прообразом современных европейских ветропарков и систем «ветро-дизель» [Дегтярев, Соловьев, 2013].

В целом, по утверждениям специалистов, современные западные разработки в ветроэнергетике в значительной степени базируются на советских. А СССР своими успехами в ветроэнергетике в 1930-1950-е гг. обязан отечественной школе аэродинамики и авиастроения.

В солнечной энергетике также имело место продолжение работ, начатых еще в 1920-е гг. Б.П. Вейнбергом и другими специалистами. В 1958 г. был запущен первый спутник с солнечными батареями («Спутник-3»), экспериментальные солнечные электростанции (СЭС) ставились в 1960-е гг. в Туркмении, в Краснодарском крае в 1989 г. была построена «солнечная деревня» мощностью 40 кВт [Стребков, 2015]. Все это базировалось на отечественных идеях и разработках.

В 1968 г. была построена первая в нашей стране приливная электростанция - Кислогубская ПЭС.

Развивалась также биоэнергетика. Разработки в сфере получения биогаза из сельскохозяйственных отходов и современной биоэнергетики в целом начались еще в 1960-х гг. [Панцхава, 2016]. В конце 1960-х гг. в СССР уже были созданы промышленные производства биотоплив (биоводород, биометан, биобутанол, биоацетон, биоэтанол). Более того, СССР оказался в данных разработках в числе мировых лидеров, хотя в дальнейшем развить успех не удалось.

Отдельно следует отметить геотермальную энергетику. История ее развития в России началась как минимум до Великой Отечественной войны, на Северном Кавказе (Краснодарский и Ставропольский края, Чечено-Ингушетия, Дагестан), где теплые термальные воды использовались для отопления. Уже в настоящее время около 500 тыс. человек в регионе обеспечиваются теплом за счет термальных источников, в частности – г. Лабинск в Краснодарском крае с населением 60 тыс. чел. [Дегтярев, 2013].

Другим центром развития геотермальной энергетики стала Камчатка уже в послевоенные годы. Здесь оно связано, прежде всего, со строительством геотермальных электростанций (ГеоЭС). Первые из них были пущены в эксплуатацию также еще в 1960-е годы. Одна из них Паратунская ГеоЭС мощностью 600 кВт стала первой в мире, работающей на бинарном цикле, являющимся разработкой советских ученых С.С. Кутателадзе и А.М. Розенфельда. Торможение развития энергетики на возобновляемых источниках, начиная с 1960-х гг., было парадоксальным образом связано с общим экономическим развитием и научно-техническим прогрессом. На том этапе, после обнаружения и начала разработок огромных запасов углеводородов Западной Сибири, а также освоения атомной энергии, ВИЭ оказались слишком дорогостоящими и не способными решать масштабные хозяйственные задачи.

Произошло резкое снижение ВИЭ в энергобалансе страны в пользу ископаемых углеводородов и атомной энергии, а выработка энергии на малых ГЭС снизилась и в абсолютных величинах – их общее число сократилось с нескольких тысяч до нескольких сотен.

Следует отметить, что в конце 1980-х - начале 1990-х гг. энергетика на основе ВИЭ (за исключением гидроэнергетики) была слабо развита во всем мире – в частности ее доля в общемировом электроэнергетическом балансе в 1990 г. составляла 1,2% (в 2012 – уже 5%). При этом две трети приходились на биоэнергетику, оставшаяся треть на геотермальную, а доля Солнца и ветра была исчезающе мала.

Стагнация в течение первых 15-20 постсоветских лет была связана с общим социальноэкономическим кризисом в стране. Именно эти годы стали в значительной степени потерянными для развития «новой» энергетики России. Тем не менее время разработки на уровне НИОКР в условиях острого недостатка финансирования и нередко на энтузиазме продолжались и в те годы. Более того, в 1990-е гг. реализовывались и отдельные проекты, в частности, строительство Куликовской ВЭС в Калининградской обл., работающей и в настоящее время, и первого ветропарка в Калмыкии.

Реанимация интереса к ВИЭ в России относится уже к середине - концу 2000-х годов. В значительной степени этот интерес импортируется уже с Запада вместе с технологиями, оборудованием и общими подходами. В то же время в России есть и отечественные научные разработки и научно-производственные коллективы - многие из них были созданы еще в СССР и были для того времени передовыми, пережили тяжелый период 1990-х и начинают активнее действовать сейчас. В настоящее время в России проблематикой возобновляемой энергетики занимается ряд образовательных, научно-исследовательских и научно-производственных организаций, включая НИЛВИЭ географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, ОИВТ РАН, ЦАГИ, МЭИ, ЭНИН, ВИЭСХ, НОЦ «ВИЭ» и ряд других – в Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске, Краснодаре и других городах и регионах. Работа идет по всем направлениям, начиная от исследований потенциала ВИЭ, включая экономический анализ, НИОКР и участие в непосредственной реализации проектов строительства станций.

В вузах создаются учебные подразделения, программы и курсы, связанные с тематикой возобновляемой энергетики. Среди новых предприятий, производящих оборудование и станции для работы на ВИЭ – ООО «Хевел» в солнечной энергетике, корпорация «БиоГазЭ- нергоСтрой» в биоэнергетике, НТО «ИНСЭТ» в ма-

лой гидроэнергетике и ряд других, число которых уже можно оценить в несколько десятков.

Что касается непосредственно строительной и производственной стадии, то этим также занимается целый ряд организаций. Наибольший вклад на данный момент принадлежит крупным корпорациям (в том числе «РусГидро», «РосНано» и др.). Кроме того, для финансирования этих проектов выделяются средства из федерального бюджета.

По ситуации на начало 2000-х гг. действующие энергетические мощности на ВИЭ (кроме большой гидроэнергетики) включали:

– геотермальные станции (ГеоЭС) на Камчатке;
– обеспечение теплом из геотермальных источников ряда населенных пунктов на Кавказе;
– ряд малых ГЭС (порядка нескольких сотен) на Кавказе и в других регионах;
– приливная электростанция на Кольском полуострове (Кислогубская ПЭС) мощностью 1,7 МВт;
– ветроэлектростанция в Калининградской области (Куликовская ВЭС) мощностью 600 кВт.

Основной вклад в возобновляемую энергетику России вносили сохранившиеся малые ГЭС и камчатские ГеоЭС, но даже с их учетом суммарная мощность исчислялась величинами порядка сотен МВт, то есть менее 1% всех установленных электроэнергетических мощностей страны. В то же время в последние 10 лет складывается уже несколько иная картина. В частности, резко выросли объемы производства биотоплива и сырья для него. Российские деревообрабатывающие предприятия в последнее десятилетие нарастили производство древесных пеллет до 1-1,5 млн т в год, а производственные мощности - до 3 млн т в год, хотя основная часть продукции идет на экспорт.

Производство рапсового масла – основного сырья для производства биотоплива, только с 2009 по 2012 гг. выросло с 200 до 350 тыс. т, экспорт - с 90-95 до 175 тыс. т. В данном случае также наблюдается экспортно-сырьевоая ориентация энергетики.

Кроме того, в настоящее время идет реализация целого ряда проектов, и при их успешном осуществлении доля ВИЭ в российском энергобалансе в ближайшее время может существенно вырасти, хотя вряд ли в обозримом будущем превысит несколько процентов. Среди проектов и программ последних лет можно отметить:

– продолжение строительства новых и роста мощностей имеющихся геотермальных электростанций на Камчатке и Курильских островах и геотермальных тепловых станций на Кавказе и в Крыму;
– частичная реанимация торфяной промышленности и рост использования торфа в качестве местного топлива, а также перевод котельных на древесные пеллеты (главным образом во Владимирской, Тверской, Архангельская и др. областях);
– строительство биогазовых станций в Белгородской, Калужской областях и других сельскохозяйственных регионах, котельных на биотопливе и перевод на биотопливо имеющихся энергетических мощностей в ряде регионов Севера европейской части России;
– строительство малых ГЭС на Кавказе, в республиках Алтай и Тыва;

- Северная приливная электростанция (Мурманская область) и ряд других ПЭС;
- строительство солнечных электростанций в Краснодарском и Ставропольском краях, Астраханской и Оренбургской областях, Якутии;
- проекты (в различной степени продвижения) строительства ветроэлектростанций и ветропарков в Калмыкии, Краснодарском крае, Ленинградской и Мурманской областях, на Ямале, в Алтайском крае и Республике Алтай, на Камчатке и в других регионах.

Суммарная мощность всех проектов уже достигает величин порядка гигаватт. Однако приходится отмечать, что Россия существенно отстает от многих стран по всем направлениям развития ВИЭ. Суммарная доля возобновляемой энергетики с нетрадиционными источниками в российском энергетическом балансе находится на уровне 1%. Отсутствуют индикаторы освоения нетрадиционных возобновляемых источников энергии, нет и законодательной базы, определяющей приоритеты и условия их развития. До сих пор не решены многие актуальные задачи, в том числе относящиеся к разработке дорожной карты, имеющей непосредственное отношение к объективному принятию управленческих решений в области возобновляемой энергетики. Сохраняется потребность в принятии обоснованных решений по продвижению технологий использования возобновляемых источников энергии в различных регионах России и в оценке реальных объемов энергопотенциалов, и территориальной доступности возобновляемых энергоресурсов для их преобразования в формы пригодные к практическому употреблению [Ленин, 1969].

Что касается дальнейших перспектив развития отечественных нетрадиционных ВИЭ в XXI в., то можно констатировать наметившу юся устойчивую тенденцию к их систематическому развитию с политической и финансовой поддержкой. Долевой объем участия нетрадиционных источников энергии в общем энергетическом балансе к 2020 г., определен в размере 2,5%. В свете того что внутренний энергетический сектор изобилует традиционными видами топлива, потенциал роста возобновляемой энергетики в России в краткосрочной перспективе ограничен, за исключением отдаленных регионов, не имеющих централизованных систем энергоснабжения, где возобновляемые источники могут заменить дизельные генераторы. Тем не менее к 2030 г. планируется повысить долю нетрадиционных возобновляемых источников энергии в общем объеме вырабатываемой электроэнергии до уровня минимум 80-100 млрд кВт·ч в год.

Несмотря на явные различия ситуации почти 100-летней давности и нашего времени, есть целый ряд сущностных сходств, что придает дополнительный вес предположениям о возможности новой фазы роста, связанной с энергетикой на ВИЭ и утверждениям о сохраняющейся актуальности подходов, заложенных в плане ГОЭЛРО.

Актуальность подходов плана ГОЭЛРО в XXI веке. План ГОЭЛРО принимался исходя из существовавших в то время условий экономической блокады страны, геополитической уязвимости и острого энергетического дефицита. Применительно к современной России утверждение об энергетическом дефиците, с одной стороны, выглядит не имеющим оснований [Бушуев и др., 2012]. С другой стороны, Россия существенно – в 2-2,5 раза, уступает по душевым показателям энерговооруженности и потребления энергии таким странам, как Канада и США, сопоставимыми с Россией с точки зрения территориальных, климатических и

структурно-экономических параметров. Сравнительно слабая энерговооруженность нашей страны четко коррелирует и с меньшим – примерно в 3 раза, показателем ВВП на душу населения. При этом даже гипотетический отказ от экспорта энергоносителей, составляющего менее половины их общего производства энергоносителей, с полным направлением их на внутренние нужды, не способен устранить данный разрыв [Дегтярев, Соловьев, 2011].

В дополнение к этому специфика размещения населения и хозяйства России в привязке к климатическим условиям требует, при прочих равных условиях, даже более высокого душевого энергообеспечения по сравнению с данными странами. Это требует поиска новых источников энергии, среди которых свою весомую роль в средне- и долгосрочной перспективе могут сыграть возобновляемые источники энергии, учитывая их огромный естественный потенциал на территории России [Безруких, Соловьев, 2014].

Сходство нынешней политической ситуации со временем принятия плана ГОЭЛРО проявляется в обострившемся противостоянии с западными странами и попытками экономической изоляции нашей страны. Вероятно, в нынешний период ситуация не столь критична, как была почти 100 лет назад, тем не менее наши геополитические угрозы и риски велики и вряд ли снизятся в обозримом будущем.

Территория России в действующих границах в настоящее время примерно та же, что контролировалась советским правительством в 1920 г., и даже несколько меньше. Политическая ориентация вновь созданных независимых государств – бывших республик СССР может оказаться враждебной России, что было продемонстрировано на Украине, ранее в Грузии и странах Балтии. Это дополнительно усиливает геополитические риски и уязвимость нашей страны. Исходя из данного комплекса экономических и геополитических факторов, вопрос развития с опорой на собственные силы, за счет собственных источников, обретает особую актуальность.

Помимо проблем страны в целом, существуют энергетические проблемы отдельных регионов. Прежде всего речь идет о российских регионах, не имеющих сухопутной границы с основной территорией – таких как Калининградская область, Крым, островные и удаленные территории – Курильские острова, Сахалин, Камчатка, Чукотка, Приморье и другие. При неблагоприятном развитии событий эти территории могут стать первоочередными и наиболее уязвимыми объектами воздействия, в том числе энергетической блокады.

В России есть и ряд других территорий, в высокой степени зависящих от поставок энергоносителей из других регионов, что также делает их повышенно уязвимыми при неблагоприятных экономических и геополитических изменениях. Более того, в России практически отсутствует прямая связь по территории страны между европейским и сибирским сегментами энергосистемы страны – связь между ними идет через северную часть Казахстана, с небольшой мощностью энергомоста – 1 ГВт. Также отсутствует прямая связь с энергосистемой Дальнего Востока [Атаев, 2008]. Только в 2015 г. был построен энерготранзит между Сибирью и Уралом (Курганская - Тюменская - Омская область) мощностью 500 кВт впервые по российской территории.

Эти риски и угрозы требуют роста как связности энергосистемы страны, так и числа точек самостоятельной генерации и энергетической самодостаточности ряда

регионов России. Это может быть достигнуто в первую очередь за счет более активного использования местных источников энергии, прежде всего – ВИЭ.

Выводы

План ГОЭЛРО был первым в нашей стране планом комплексного стратегического экономического развития на национальном и региональном уровнях на основе электрификации страны. Он был принят в крайне жестких для страны экономических и геополитических условиях и сообразовывался именно с данной тяжелой ситуацией, из которой требовалось найти выход. Эта задача была решена.

В качестве ключевой составляющей план ГОЭЛРО включал опору на местные энергетические ресурсы, где огромную роль играли ВИЭ. Прежде всего в план ГОЭЛРО было включено использование местных гидроэнергетических ресурсов и торфяного сырья. Почти 50% энергетических мощностей, созданных в соответствии с планом, использовали возобновляемые энергоресурсы.

В дальнейшем разработчиками плана и другими исследователями рассматривались перспективы использования ветряной энергии, а также других ВИЭ – солнечной, приливной, более полного использования речного гидроэнергетического потенциала.

В период, непосредственно предшествовавший принятию плана ГОЭЛРО, во время его реализации и следующие несколько десятилетий в нашей стране шел активный поиск в области ВИЭ и развитие энергетики на их основе, что вывело нашу страну в число мировых лидеров в использовании возобновлямых энергоресурсов.

В настоящее время, несмотря на безусловно более благополучное экономическое положение по сравнению с послереволюционным периодом, и экономическая, и геополитическая ситуация обнаруживает ряд сходных черт.

Необходимость опоры на собственные ресурсы в условиях существенных экономических и геополитических рисков, повышения устойчивости и социально-экономического развития регионов вновь делает актуальной как развитие энергетики на основе местных возобновляемых энергоресурсов, так и стратегические методологические подходы, характерные для плана ГОЭЛРО.

Литература

Атаев З.А. Территориальная организация локальной энергетики Центрального экономического района России / Автореф. диссер. на соискание ученой степени доктора географических наук. – М. 2008.

Безруких П.П., Соловьев Д.А. Взгляд на энергетику 2020 г. в свете устойчивого развития России // Малая энергетика. 2014. № 1-2. С. 4-8.

Бушуев В.В. От плана ГОЭЛРО до единой энергосистемы (К 95-летию плана ГОЭЛРО в преддверии юбилейных дат образования ЕЭС России) // Электроэнергия. Передача и распределение. 2015. № 6(33). С. 6-9.

Бушуев В.В., Громов А.И., Куричев Н.К., Николаев М.А., Соловьев Д.А. Тиматков В.В., Черников А.А. Энергетические истоки и последствия глобального кризиса 2010-х годов. М.: Энергия, 2012. 88 с.

Гвоздецкий В.Л. План ГОЭЛРО. Мифы и реальность // Наука и жизнь. 2001. №5.

Гришин В.И. Энергетические войны: создание и разрушение энергосистемы России. – М.: Авити, 2009. 632 с.

Дегтярев К.С. Тепло Земли // Наука и жизнь. 2013. № 10. С. 27-31.
Дегтярев К.С. Торф – недооцененный ресурс России // Сантехника, отопление и кондиционирование. 2016. № 3. С. 44-51.
Дегтярев К.С., Соловьев А.А. Энергообеспечение России – проблемы и возможности решения // Молодой ученый. 2011. № 8-1. С. 107-112.
Дегтярев К.С., Соловьев А.А. Ветреная ветряная энергетика // Наука и жизнь. 2013. № 7. С. 42-47.
Дегтярев К.С., Соловьев А.А. Вода зажигает свет // Наука и жизнь. 2015. № 2. С. 56-65.
Дюшен Б. Ветер - вода - солнце // Техника молодежи. 1933. №5. С.61-67.
Кржижановский Г.М. Избранное. – М.: Гос. изд-во полит. лит-ры, 1957. С. 9-20.
Кржижановский Г.М. К 35-летию плана ГОЭЛРО. – М.: Энергия, 2006. С. 5-39.
Ленин В.И. Полное собрание сочинений (5 изд.). Т. 36 (март - июль 1918). – М.: Изд-во полит. лит-ры, 1969. С. 228.
Панцхава Е.С. Биоэнергетика. Мир и Россия. Биогаз. Теория и практика. М.: Русайнс, 2014. 971 с.
Пчелин М.М. Плану ГОЭЛРО 90 лет // Золотой лев. 2010. – http://www.zlev.ru/index.php7artic le=3292&nomer=54&p=article.
Стребков Д.С. История развития солнечной фотоэлектрической энергетики в России / под ред. П.П. Безруких, С.В. Грибкова. – М., 2015. С. 266-278.

РАЗДЕЛ 3

ЭКОНОМИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

К.С.ДЕГТЯРЕВ, М.Ю.БЕРЁЗКИН

Закономерности развития возобновляемой энергетики во многом связаны с географическим положением и природными условиями. Это естественно, учитывая зависимость возобновляемых источников энергии (ВИЭ) от природных факторов, таких, как количество поступающей на Землю солнечной энергии, сила ветров, продуктивность биосферы, наличие гидрологических и геотермальных источников.

Структура мирового производства электроэнергии на ВИЭ. Общие объёмы и структура мирового производства электроэнергии на ВИЭ по регионам мира показывает сложную картину, местами прямо противоположную представлениям о лидерстве западных стран. Например, наиболее высока доля ВИЭ (включая гидроэнергетику) в энергобалансе в странах Центральной и Южной Америки (более 56%). При этом доля данного региона в мировом производстве электроэнергии на ВИЭ составляет 17,4% [EIA, 2013], что существенно выше его доли в мировом производстве всей электроэнергии, составляющей 6,8%.

Доля ВИЭ в Европе (29,1%) существенно превосходит среднюю мировую (23%), в то же время в США, Японии и Австралии она вдвое ниже (12,4%, 12,7% и 10,1%, соответственно), чем в мире в среднем, и заметно ниже, чем в России (16,6%). Таким образом, приходится говорить не о лидерстве, а о среднем уровне развития возобновляемой энергетики в группе стран, считающихся экономически наиболее развитыми, в то время как лидерство принадлежит Центральной и Южной Америке и ряду стран Азии и Африки. При этом, на страны Азии вне Ближнего Востока приходится, прежде всего, наибольший абсолютный объём производства возобновляемой электроэнергии – 31,9% мирового. Примерно 2/3 этого объёма приходится на Китай.

Кроме того, доля ВИЭ в энергобалансе резко различается и внутри группы западноевропейских стран – от 21-24% в Германии и Испании и даже 50-100% в Норвегии, Исландии и Дании до 10-14% в Нидерландах и Бельгии.

География мировой гидроэлектроэнергетики. На гидроэлектроэнергию приходится 77% производства всей электроэнергии на основе ВИЭ. Можно выделить несколько регионов, где ГЭС наиболее велики благодаря сочетанию геоморфологических и климатических условий, обеспечивающих полноводность и большие уклоны рек, и где производится в настоящее время основная часть гидроэлектроэнергии мира.

Как правило, это предгорные районы:

- Центральная и Южная Америки, прилегающие к Андам, Гвианскому и Бразильскому плоскогорьям бассейны Амазонки, Ориноко, Параны, где выраба-

тывается более 700 млрд кВт·ч в год гидроэлектроэнергии или более 20% от общемировой.

- Центральная и Южная Африка, бассейны Нила, Конго, Замбези и Лимпопо, также берущих начало в горных районах, связанных с Восточно-Африканским рифтом (Эфиопское нагорье, ВосточноАфриканское плоскогорье, Рувензори) – около 100 млрд кВт·ч или 3% мировой выработки.
- Южная и Восточная Азии, связанные с горными системами Памира, Тибета и Гималаев и бассейнами рек Инда, Ганга, Брахмапутры, Иравади, Янцзы, Меконга – более 1000 млрд кВт·ч или 30% мирового.
- Центральная и северная части Северной Америки (юго-западные, южные и юго-восточные районы Канады и северные районы США), прилегающие к Кордильерам и Лаврентийской возвышенности в бассейнах рек Колумбия, Миссури, Черчилл, Святого Лаврентия – около 500 млрд кВт·ч или 15% мирового.
- Скандинавский полуостров (Норвегия, Швеция и, в меньшей степени, Финляндия), склоны и отроги Скандинавских гор, бассейны рек Гломма, Вефсна, Намсен, Лулеэльв, Умеэльв, Оунасйоки, Кемийоки и др. – более 230 млрд кВт·ч, что составляет 7% выработки гидроэлектроэнергии в мире и 43% в Европе.

Таким образом, на этих пяти массивах, занимающих примерно 25-30% площади земной суши, вырабатывается около 75% гидроэлектроэнергии мира. При этом, гидроэнергетический потенциал Латинской Америки, Азии и, тем более, Африки остаётся в значительной степени неосвоенным.

Можно выделить ещё ряд территорий с высоким гидроэнергетическим потенциалом и существенным производством электроэнергии на ГЭС. В Европе это, прежде всего, горные и предгорные южные районы – Пиренеи, Альпы, Апеннины. К числу крупных европейских производителей энергии за счёт ГЭС относятся Швейцария, Австрия, Франция, Италия. Среди развитых стран выделяются также Исландия, где на ГЭС приходится 70% выработки всей электроэнергии и Новая Зеландия, где на ГЭС приходится более 52%. Это примеры небольших стран с высоким природным и технико-экономическим потенциалом ВИЭ, который они активно используют, обеспечивая себя энергией, главным образом, за счёт ВИЭ. Соответственно, 100 и 72% выработки электроэнергии в этих странах приходится на ВИЭ в целом. В этом же ряду находятся и далеко не самые богатые и развитые азиатские и африканские страны.

Крупным производителем гидроэлектроэнергии с высоким гидроэнергетического потенциалом является Япония, на которую приходится 75 млрд кВт·ч или 2% мирового производства гидроэлектроэнергии. В то же время при общих размерах японской экономики и связанных с ней больших объёмах производства электроэнергии доля ГЭС невысока по сравнению с большинством стран со сходными природными условиями.

В России значительные ресурсы и объёмы производства гидроэлектроэнергии связаны также с горными территориями Кавказа, Южной Сибири, Дальнего Востока, а также с соседними со Скандинавией связанными с Балтийским щитом Кольским полуостровом и Карелией. Отметим, что роль каскада ГЭС на Волге снижается – на них в настоящее время приходится около 3% всей выработки электроэнергии в стране и менее 20% гидроэлектроэнергии. Одна Саяно-Шушенская ГЭС на Енисее по мощности и потенциальной выработке электроэнергии сопоставима со всем волжским каскадом.

Россия относится к числу ведущих мировых производителей электроэнергии на ГЭС. На нашу страну приходится более 160 млрд кВт·ч в год или 5% мирового. По выработке Россия занимает пятое место в мире после Китая (850 млрд), Бразилии (411 млрд), Канады (377 млрд) и США (276 млрд кВт·ч). В то же время, гидроэнергетический потенциал России также остаётся освоенным далеко не в полной мере – прежде всего, это относится к территориям к востоку от Урала. Представление о масштабах недоиспользования потенциала гидроэнергии может дать сопоставление с Канадой – страной, сходной с Россией по природным условиям и сопоставимой по территории, где общий объём производства электроэнергии на ГЭС выше в 2,3 раза, а плотность производства (в кВт·ч на 1 км^2 площади страны) – выше в 3,9 раз.

Что же касается стран бывшего СССР, то значительным гидроэнергетическим потенциалом, также далеко не полностью используемым, обладают страны Закавказья и Средней Азии (прилегающие к Памиру и Тянь-Шаню). На гидроэнергетику приходится 95% всей вырабатываемой электроэнергии в Таджикистане, 94% – в Киргизии, более 75% – в Грузии, 30% – в Армении, 22% – в Узбекистане, 8,8% – в Казахстане, 8,3% – в Азербайджане.

Добавим, что крупнейшие ГЭС также построены в обозначенных выше регионах мира – в частности, «Три ущелья» и Силоду на реке Янцзы в Китае (22,5 и 13,9 ГВт), Итайпу на реке Парана на границе Парагвая и Бразилии (14 ГВт), Гури на реке Карони в Венесуэле (10,2 ГВт) и др. В этом перечне самая крупная российская ГЭС (Саяно-Шушенская, 6,4 ГВт), занимает примерно 9-10 место. В этих же регионах в настоящее время проектируется и строится ещё ряд крупных и сверхкрупных ГЭС.

Энергетика на ВИЭ (кроме ГЭС) – закономерности размещения. Если рассматривать ВИЭ без учёта ГЭС, а включая только геотермальную, солнечную, ветровую и биологическую энергию, то и тогда зависимость от природно-географических условий не отменяется. Всего на долю ВИЭ, помимо ГЭС, приходится 5% мирового производства электроэнергии или 1069 млрд кВт·ч в 2012 году. Выделим регионы и отдельные стран, где доля ВИЭ без ГЭС выше среднемировой (табл. 1).

Среди развитых стран существуют свои пространственные различия. В частности, лидерами (с большими абсолютными объёмами и высокой долей в структуре) производства по видам источников являются: Исландия, Италия – **геотермальная**, Испания, Германия, Великобритания, Италия, Дания, Португалия, Ирландия – **ветровая**, Германия, Италия, а также Испания – **солнечная** и Германия, Великобритания, Италия, Швеция, Финляндия, Дания, Польша, Нидерланды – **биоэнергетика.**

Геотермальная энергетика чётко привязана к определённым геолого-тектоническим условиям. Ветровая энергетика в наибольшей степени развита на атлантическом побережье. Развитая солнечная энергетика в большей степени характерна для юга Европы и Средиземноморских стран. Биоэнергетика в большей степени развита в Центральной и Северной Европе, что можно связать с развитым сельским и лесным (в Финляндии и Швеции) хозяйством.

Германия, занимающая центральное положение в Европе, отличается равномерно высоким развитием всех типов энергетики на ВИЭ, кроме геотермальной.

При этом геотермальная энергетика практически полностью отсутствует где-либо, кроме Исландии и Италии, а солнечная отсутствует в странах Северной Европы.

Кроме того, наиболее высокая доля ВИЭ в энергобалансе характерна для небольших стран – Дания (50,7%), Португалия (31,7%), Исландия (29,9%).

В общей структуре мирового производства электроэнергии на ВИЭ (без учёта ГЭС) на Западную Европу и Северную Америку приходится более 65% мирового производства, с Китаем, Японией, Южной Кореей и Австралией – более 70%, хотя этот показатель вместе с общей долей этих стран в производстве электроэнергии постепенно снижается. Тем не менее, фактор общего экономического развития страны здесь играет ключевую роль, и доля ведущих стран мира в производстве ветровой, солнечной и биоэнергии выше их доли в общем мировом производстве электроэнергии.

В то же время, мы видим, что существуют и природно-географические факторы, создающие сложную мозаичную картину с разнообразными региональными особенностями (табл. 2).

Таблица 1. Доля в производстве электроэнергии на основе ВИЭ (кроме ГЭС) по странам и регионам, 2012 г. [EIA, 2013]

Регионы/страны мира	ВИЭ (кроме ГЭС),%	Геотерм.,%	Ветер,%	Солнце,%	Биомасса,%
Северная Америка	5,4	0,3	3,3	0,1	1,7
США	5,7	0,4	3,5	0,1	1,8
Центральная и Южная Америка	5,0	0,7	0,8	0,0	3,6
Страны Центральной Америки	17,4	8,1	2,6	0,0	6,6
Страны Карибского бассейна	1,6	0,1	0,6	0,0	0,9
Бразилия	7,5	0,0	0,9	0,0	6,6
Др. страны Южной Америки	3,1	0,0	0,2	0,0	2,8
Европа	13,0	0,3	6,1	2,1	4,4
Страны СНГ	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2
Азия, страны Ближнего Востока	0,7	0,1	0,5	0,0	0,1
Африка	1,0	0,2	0,3	0,0	0,3
Азия (кроме Ближнего Востока)	3,1	0,3	1,6	0,2	1,1
Австралия	4,2	0,0	2,6	0,6	1,0
Новая Зеландия	20,6	14,3	4,8	0,0	1,5
Папуа-Новая Гвинея	11,9	11,9	0,0	0,0	0,0
Океания	1,0	0,0	0,7	0,0	0,3
Всего в мире	5,0	0,3	2,4	0,4	1,8

Таблица 2. Источники ВИЭ и регионы с высоким уровнем развития энергетики на основе данного источника [EIA, 2013]

Источник энергии	Регионы/страны мира	Доля источника в собственном производстве электроэнергии, %	Доля в мировом пр-ве эл-энергии из данного источника, %
Геотермальная	Исландия	29,9	7,3
	Италия	2,0	8,8
	Юго-Восточная Азия и Океания: Филиппины, Индонезия, Папуа – Новая Гвинея, Новая Зеландия	5,1-14,7	38,7
	Восточная Африка: Кения	19,7	2,9
	Центральная Америка: Мексика, Сальвадор, Гватемала, Никарагуа, Коста-Рика, Гваделупа	2,1-24,8	14,7
	США	0,4	23,5
	Всего	95,9	
Биоэнергия	Центральная и Южная Америка	В среднем 3,6 (47,3 – Белиз; 6,6 – Бразилия)	13,5
	Центральная и Северная Европа: Германия, Великобритания, Бельгия, Польша, Швеция, Финляндия	6,6-16,4	26,6
	США	1,8	18,5
	Китай	0,9	11,7
	Япония	3,4	8,6
	Всего	78,9	
Ветровая энергия	Европейские страны на Атлантическом побережье: Германия, Великобритания, Дания, Франция, Португалия	2,8-35,5	30,6
	Отдельные страны Карибского бассейна и острова Атлантического океана: Аруба, Гваделупа, Ямайка, Нидерландские Антилы, Фолкленд-ские острова	2,6-16,7	0,06
	США	3,5	27,1
	Всего	57,7	
Солнечная энергия	Центральная и Южная Европа: Германия, Испания, Италия	4,3-6,7	59,4
	Япония	0,7	7,3
	Китай	0,1	6,3
	США	0,1	4,2
	Всего	77,2	

Основная часть геотермальной энергетики привязана к Огненному поясу Земли или Тихоокеанскому вулканическому кольцу. К этом поясу относятся острова Восточной, Юго-Восточной Азии и Океании на западном побережье Тихого океана и Америка (Центральная и западная часть Северной, в частности, запад США) на другой его стороне. Сюда же входит Япония, где на данный момент на геотермальную энергетику приходится 4,4% мирового объёма, сюда же входят российские Сахалин, Курильские острова и Камчатка, где геотермальная энергетика обеспечивает около 30% энергопотребления Камчатского края (Паужетская ГеоЭС – 42,5 млн кВт·ч, Верхне-Мутновская – 63,0 млн кВт·ч МВт, Мутновская – 344,0 млн кВт·ч).

Три других заметных очага развития геотермальной энергетики отличаются сходными геолого-тектоническими условиями. Это Исландия, где повышенный потенциал геотермальной энергии связан со Срединно-Атлантическим хребтом, Италия, находящаяся в Альпийско-Гималайской зоне высокой тектонической активности и Кавказ. Третий очаг – Восточно-Африканский рифт. Наибольших успехов в геотермальной энергетике здесь достигла Кения, но существуют планы развития геотермальной энергетики и в других восточноафриканских странах (см. Нефедова Л.В. «Использования возобновляемых источников энергии в странах Африки для устойчивого развития и снижения эмиссии парниковых газов»).

Более сложная картина в биоэнергетике, в которой уровень развития определяется комбинацией высокой естественной продуктивности биосферы, развитого сельского хозяйства, лесопромышленного комплекса и общим экономическим уровнем развития страны. Ведущие позиции в биоэнергетике занимают Северная и Центральная Европа, США, Центральная и Южная Америка и восточноазиатский кластер, включающий Китай и Японию. В России биоэнергетика в данный момент не играет какой-либо роли в общем производстве электроэнергии. Но в досточной степени развитие получила в северо-западных районах, а также на юге Сибири и Дальнего Востока. Связано это с тем, что Россия является одним из ведущих мировых производителей (наряду с Канадой, США и скандинавскими странами) древесных пеллет на базе развитого лесопромышленного комплекса, основная часть которых в настоящее время идёт на экспорт в страны Западной Европы, а в последнее время также и Восточной Азии [Дегтярев, 2014]. Кроме того, рост спроса позволит развивать внутренний рынок биоэнергетики.

Развитие ветроэнергетики в ещё большей степени определяется общим экономическим уровнем развития страны или региона. В то же время, наблюдается определённая неравномерность внутри развитых стран. Ветроэнергетические мощности Европы концентрируются, прежде всего, в странах атлантического побережья, в зонах стабильных и сильных ветров. В дополнение к этому обозначается очаг развития ветроэнергетики на Антильских островах и других островных территориях (Фолклендские острова), что имеет те же естественные предпосылки. В целом, наиболее перспективно использование ветроэнергии в прибрежных зонах, а также на открытых континентальных пространствах (в частности, в степях).

Солнечная энергетика, на данный момент, вероятно, в наибольшей степени из всех возобновляемых источников, зависит от общего экономического уровня развития. Большую часть мировой выработки солнечной электроэнергии приходилось на Китай, Германию, Японию, США и Италию.

Заключение

Природно-географические условия в наибольшей степени действуют на размещение объектов гидроэнергетики, геотермальной и биоэнергетики.

С учетом географических особенностей можно выделить следующие пояса развития возобновляемых источников энергии (кроме гидроэнергетики):

- Тихоокеанский геотермальный (связанный с Тихоокеанским огненным кольцом Земли).
- Три биоэнергетических – Северный, Центрально-Южноамериканский и Восточноазиатский.
- Североатлантический ветровой.
- Средиземноморский солнечный.

В солнечной и ветроэнергетике – отраслях со сравнительно недавней историей масштабного развития – на первое место выходят факторы общегэкономического и технологического развития в сочетании с целенаправленной государственной политикой стимулирования.

Потенциально дальнейшее развитие возобновляемой энергетики в мире может быть связано с освоением новых территорий с благоприятными природными условиями. Географический фактор развития возобновляемой энергетики будет усиливаться. Это связано как с распространением технологий из стран Центра («триада» Северная Америка, Европа, Япония) в страны Полупериферии и Периферии [Берёзкин, Синюгин, Соловьев, 2013], так и с общими тенденциями развития возобновляемой энергетики [Дегтярев, 2015].

Что касается России, то потенциал развития возобновляемой энергетики, как природный, так и технико-экономический, использован далеко не в полной мере. Но за счет большой территории страны есть возможность развивать ВИЭ в отдалённых, труднодоступных районах, таких как Дальний Восток и Восточная Сибирь.

Литература

Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А., Соловьев А.А. География инноваций в сфере традиционной и возобновляемой энергетик мира // Вестник МГУ: Сер. 5. География. 2013. №1.

Дегтярев К.С. Возобновляемая энергетика в контексте экспортно-сырьевой ориентации российского ТЭК // Малая энергетика. 2014. №1-2.

Дегтярев К.С. Энергетика на возобновляемых источниках – от энтузиазма к прагматизму // Журнал С.О.К. 2015. №4.

U.S. Energy Information Administration (EIA). Интернет-ресурс: www.eia.gov.

ГЕОГРАФИЯ ИННОВАЦИЙ В СФЕРЕ ТРАДИЦИОННОЙ И ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИК МИРА

М.Ю. БЕРЁЗКИН, О.А. СИНЮГИН

Инновацию, или инновационный процесс, можно представить как усовершенствование, так и создание новых технологий [Шумпетер, 2007]. Исторически инновация – это цепь технологических переходов, функционально она проявляется в пространстве и во времени. Поэтому географию инноваций можно представить как смену технологических укладов и распространение их от стран – центров инноваций на страны периферии. Несмотря на очевидную значимость инноваций в сфере энергетики, методологических исследований, раскрывающих содержание, формы и причины территориальной неоднородности инновационных процессов, в частности по отношению к динамике развития возобновляемых источников энергии, пока очень мало [Бушуев и др., 2008].

В наши задачи входил анализ структурных и инновационных процессов в традиционной и возобновляемой энергетике мира применительно к разработке методологии исследования пространственных закономерностей распространения и развития инновационных процессов. К методам исследования откосятся большие циклы Кондратьева, теория инновационного развития Шумпетера, мироссистемный анализ Валлерстайна (модель Центр – Полупериферия – Периферия) [Валлерстайн, 2006]. Эти методы, нашедшие широкое применение в экономико-географических исследованиях, взяты в качестве базовых при изучении территориальной неоднородности инновационных процессов в возобновляемой энергетике мира. В работе использованы материалы международной сетевой организации REN21, которая объединяет правительства, промышленные ассоциации, исследовательские институты, различные международные организации, в том числе входящие в ООН [Renewables, 2011].

Инновации и новая структура энергетики мира. Активизация инновационной деятельности и широкое распространение инновационных технологий, безусловно, приоритетное направление современного мирового развития энергетики. Под воздействием инновационных процессов формируется новая структура энергетики мира, которую можно рассматривать как цивилизацию энергетических инноваций. Во многом благодаря распространению инноваций в области энергосбережения и энергоэффекгивности наметилась тенденция к сокращению роста энергопотребления на душу населения в развитых странах. В последние 30 лет душевое энергопотребление в них оставалось практически неизменным, а в новых индустриальных странах, напротив, отмечается увеличение подушного потребления энергии. Подобная тенденция отражает характерные черты развивающегося постиндустриального общества, которое характеризуется ростом и распространением информационных технологий, снижением энергопотребления и ресурсоемкости в отраслях материального производства.

Новые технологические решения, в отличие от индустриальной экономики, не требуют такого же количества невозобновляемых природных ресурсов и энергии. В отношении базового энергоносителя для постиндустриальной экономики сложилась уникальная ситуация, отличная от аналогичных переходных процессов при смене технологических укладов в индустриальной экономике, когда происходило плавное замещение одного энергоресурса другим, качественно лучшим. Извести,

что каждому технологическому укладу в терминах циклов Кондратьева соответствует свой базовый энергоноситель [Голицын и др., 2004]. Исторически для 1-го технологического уклада им служила энергия воды и ветра, для 2-го и 3-го – уголь, для 4-го – нефть.

Что касается 5-го технологического уклада, то еще в 1970-е гг. преобладало оптимистичное мнение о скором замещении нефти ядерной энергией, демонстрирующей тогда экспоненциальный рост. Ядерная энергетика претендовала на роль базовой инновации в новом технологическом укладе. Но известные трагические события, связанные с авариями на атомных электростанциях, выявили реальные риски и несовершенство ядерных энергетических технологий. Атомная энергетика не стала базовой энергетической технологией. Сейчас в странах – лидерах ядерной энергетики работают над реализацией концепции безопасной эксплуатации атомных электростанций нового поколения, их крупномасштабное распространение относится к дальней перспективе. Поэтому основным фактором формирования современного мирового энергетического пространства все же остается природный газ. Благодаря высокой экономической эффективности и относительной экологичности природный газ продолжает замещать нефть и уголь в энергетическом балансе мира.

Определяя базовые направления развития инновационного процесса в традиционной энергетике как совершенствование накопленных за десятилетия технологий, можно выделить следующие наиболее значимые из них:

- физико-химические методы воздействия на пласт в нефте- и газодобыче; бурение и транспортировка углеводородов в шельфовых зонах; разработка технологий добычи газогидратов;
- технологии газификации и ожижения в угольной промышленности, включая улавливание выбросов угольных электростанций;
- ядерные реакторы нового поколения с повышенной степенью безопасности, замыкание ядерного топливного цикла, обращение с отходами.

Из перечисленных технологий к наиболее перспективному базовому энергетическому ресурсу следует отнести газогидраты. По многим оценкам, мировые запасы газовых гидратов в несколько раз превышают запасы обычного газа. Кроме того, этот ресурс отличается практически повсеместным присутствием под дном Мирового океана. Дальше всех в поиске и разработке газогидратных месторождений продвинулась Япония, которая, как известно, сильно зависит от импорта углеводородов. В настоящее время на шельфе Японии наибольший интерес с точки зрения промышленного освоения представляет месторождение природных гидратов Нанкай [Глобальная энергетика …, 2011].

Основная трудность в решении проблемы добычи газа из гидратов связана с тем, что большая часть природных газовых гидратов сосредоточена под дном Мирового океана на глубине от 300–500 м и глубже. Технология извлечения и доставки этого ресурса очень сложная и находится только в начальной стадии опытно-конструкторских разработок.

Поэтому можно констатировать, что в ближайшее десятилетие базовым энергоносителем останется газ, а географическая картина энергетики мира будет формироваться на основе наиболее экономически привлекательных природных углеводородных ресурсов, находящихся в евразийской “оси”, которая протягивается по меридиональной полосе от шельфа Карского моря через Западную Сибирь, Кас-

пийское море, Иран, Персидский залив к Аравийскому п-ову. Перспективные рынки потребителей энергии расположены по краям Евразии – в Европе и Восточной Азии, как правило, на весьма значительном расстоянии от производителя (около 4-6 тыс. км).

Инновационный процесс в традиционной энергетике определяется значительными инвестициями в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, которые составляют 30–50 млрд долл. США в год, что на порядок превышает затраты на возобновляемую энергетику. Основной массив новых технологий на правах патентов и ноу-хау, например в нефтегазовой промышленности, принадлежит транснациональным компаниям, при этом не идет речь о диффузии высоких технологий в развивающиеся страны.

Для поддержания уровня добычи в настоящее время необходимо вовлекать в разработку месторождения в более отдаленных и труднодоступных районах. Все больший масштаб принимает извлечение ресурсов в шельфовой зоне. В настоящее время доля "шельфового" газа уже почти достигла 1/3 мировой добычи газа, что требует дополнительных финансовых затрат, в том числе для разработки и внедрения новейших технологий. Эти тенденции касаются и нефтяной промышленности, например, большие средства затрачиваются на строительство подводных трубопроводов. Увеличились инвестиции на строительство заводов по сжижению природного газа. Стоимость инвестиционных проектов по добыче и транспортировке нефти и газа в среднем увеличивается в 3-4 раза за десятилетие в расчете на единицу топлива.

Вместе с тем необходимо отметить, что развитие современной традиционной энергетики за многие десятилетия практически достигло предельного уровня. Технология производства электроэнергии отработана до деталей и трудна для совершенствования.

Кроме того, существует и другой аспект проблемы. В постиндустриальных странах с развитой экономикой, где доля индустриального сектора в последние десятилетия заметно снизилась, рост энергопотребления, как уже отмечалось, существенно замедлился.

Стагнация роста потребления в развитых странах все меньше стимулирует развитие традиционной энергетики. Иерархически многоступенчатые структуры уступают место специализированным структурам, ориентированным на фрагментарное производство [Берёзкин, Синюгин, 2002]. Такая же тенденция наметилась и в энергетике, где все более востребованными становятся автономные, децентрализованные энергопроизводители.

Экологические стимулы инновационного развития возобновляемой энергетики. Основным экологическим стимулом развития возобновляемой энергетики в настоящее время стал Киотский протокол, основная цель которого – снижение на 5% выбросов парниковых газов к 2012 г., а также создание глобального углеводородного рынка. (Для посткиотского процесса предполагается снижение выбросов на 20% к 2020 г. и на 50% к 2050 г.)

В 2008 г. оборот мирового углеводородного рынка увеличился по сравнению с предыдущим годом в 2,3 раза и составил 92 млрд евро. Наибольшая доля рынка (примерно 75%) приходится на страны ЕС, где реализована так называемая Европейская схема торговли выбросами парниковых газов. В рамках схемы крупным компаниям-эмитентам устанавливаются определенные квоты (разрешения) на вы-

бросы и предоставляется право торговать ими без ограничения. По итогам года разрешения на выбросы парниковых газов изымаются в зависимости от фактически произведенных выбросов за год и погашаются. За выбросы, не обеспеченные разрешениями, взимается штраф в размере 100 евро за тонну CO_2.

Наряду с квотами на выбросы парниковых газов на рынке углеводородов представлены и другие углеродные единицы. Компания, осуществляющая про ект, который позволяет сократить выбросы парниковых газов, может оформить и утвердить этот проект в установленном порядке для целей Киотского протокола и получать оплату за достигнутое сокращение выбросов в течение определенного периода времени. Механизм чистого развития (МЧР) предназначен для проектов, реализуемых в развивающихся странах, которые не имеют количественных обязательств по ограничению и сокращению выбросов парниковых газов (Индия, Китай, Бразилия и др.). Механизм, получивший название "совместное осуществление" (СО), реализуется в странах, имеющих обязательства по выбросам парниковых газов, к ним относятся развитые страны ЕС, Россия, Украина, Австралия, Япония, Швейцария и др.

В реализации Киотского протокола основная роль отводится возобноатяемой энергетике. Энергетика (включая использование энергии на транспорте) дает около 80% выбросов парниковых газов. И именно в этом секторе сосредоточен основной потенциал по сокращению их выбросов. Задача состоит в кардинальном изменении структуры современной энергетики в низкоуглеродном направлении, в уходе от принципа "палеотопливо – палеоклимат". Большая часть проектов в рамках Киотского протокола заключается во вводе новых мощностей возобновляемой энергетики. При этом Киотский протокол создает условия для дополнительных инвестиций в возобновляемую энергетику, измеряемых десятками миллиардов долларов. Внедрение новых мощностей возобновляемой энергетики в рамках Киотского протокола в развивающихся странах стимулирует пространственную диффузию инноваций. Страны-лидеры в этом процессе по количеству установленной мощности возобновляемых источников энергии – Китай, Индия, Бразилия и Индонезия. В Китае, например, согласно программе развития возобновляемых источников энергии на средний и длительный период, к 2020 г. объем потребления таких источников энергии должен составить 15% от общего объема потребления.

В 2008-2012 гг. заканчивается период действия Киотского протокола 1997 г. Достижения весьма скромны и противоречивы. В декабре 2009 г. на Всемирной конференции ООН в Копенгагене так и не удалось разработать новое соглашение по ограничению выбросов парниковых газов и выработать принципы и цели посткиотского процесса.

Тем не менее в таких условиях сохраняются стимулы для развития инновационных процессов в возобновляемой энергетике:

- более справедливый доступ к энергии вследствие широкой распространенности и доступности возобновляемых ресурсов по сравнению с ископаемыми;
- простота в управлении, в отличие от многоступенчатых операций в топливной и атомной энергетике;
- широкие возможности варьирования мощностями в соответствии с запросами и нуждами потребителей;
- экологичность, в отличие от топливодобывающей энергетики, которая опустошает природу.

В развитии возобновляемой энергетики выделяются три этапа:

1) с конца XIX в. – появление и становление гидроэнергетики и зарождение ветроэнергетики;

2) после нефтяных кризисов 1970-х гг. – интенсивное инвестиционное стимулирование развития ветровой и солнечной энергетики на основе технологий, имеющихся в традиционной энергетике, а также возникновение первых геотермальных и приливных электростанций;

3) с начала XXI в. – формирование новейших технологий солнечной фотоэнергетики, создание эффективных преобразователей энергии океана и комплексных биоэнергетических систем.

Патентный потенциал инновационного развития. Возобновляемая энергетика находится на второй восходящей фазе цикла Кондратьева, когда неуклонно происходит сокращение издержек. Например, себестоимость ветровых турбин с середины 1980-х г. снизилась почти в 5 раза, солнечных элементов – в 30 раз (на киловатт установленной мощности). Разнообразие методов и технологических решений преобразования возобновляемых энергоресурсов имеют большие перспективы развития и высокий научный потенциал. Возобновляемая энергетика заявила о себе как высокотехнологичная инновационная отрасль.

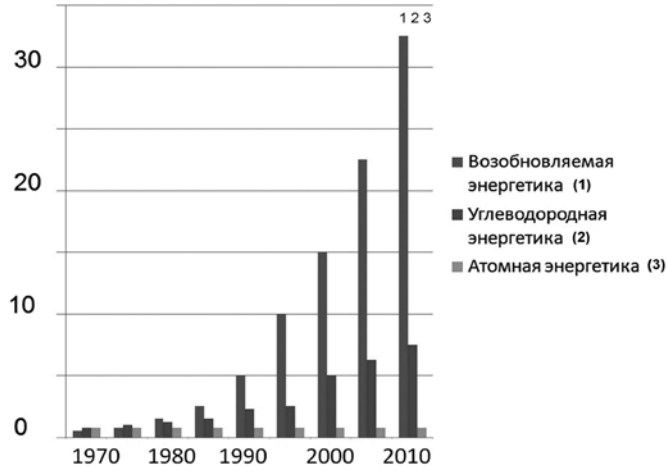


Рис. 1. Количество новых патентов в различных сферах энергетики (1970-2013 гг.) (по [Massachusetts Institute ..., 2013])

Важным показателем для оценки инновационного процесса является такой показатель, как «сумма технологий роста» – количество зарегистрированных патентов. С середины 1980-х гг. наблюдается резкий рост новых патентов в сфере возобновляемых источников энергии (рис. 1). Ежегодно регистрируемых патентов в области возобновляемой энергетики в десятки раз больше, чем аналогичных патентов в углеводородной и атомной энергетике.

Самое значимое увеличение количества патентов по теме возобновляемых источников энергии связано с технологиями, относящимися к солнечной и ветровой энергетике. Например, в период 2004-2009 гг. количество патентов по теме ис-

пользования солнечной энергии увеличивается почти на 13% в год, а по ветроэнергетике – почти на 19% [Massachusetts Institute, 2013].

В США до 2000 г. ежегодно регистрировалось порядка 200 патентов в области возобновляемых источников энергии. Однако после роста цен на нефть увеличились инвестиции в научные исследования в области энергетики, и уже к 2009 г. число патентов возросло до 1000 в год. При этом эффект от инвестиций отражается на десятилетия вперед. Аналогичные тенденции просматриваются и в других странах.

Технологические перспективы инновационного развития возобновляемой энергетики. Для возобновляемой энергетики потенциал новых технологий еще далеко не исчерпан. Высокая наукоемкость, разнообразие методов и технологических решений преобразования возобновляемых энергетических ресурсов открывают большой простор для развития. Возобновляемая энергетика, начав серьезно развиваться всего 30 лет назад, сегодня отличается сравнительно низкой стоимостью энергетических установок. Например, себестоимость ветровых турбин с 1980 г. снизилась почти в 3 раза, а солнечных элементов – в 9 раз.

Спектр фундаментальных исследований возобновляемых источников энергии достаточно широк. В области материаловедения ведутся разработки новых материалов для солнечных элементов. Среди перспективных технологий – тонкопленочная на основе полупроводников субмикронной толщины или аморфного кремния, мультиузловая технология – многослойное напыление разных по эффективности полупроводников, а также полупроводниковые красители.

В биотехнологии ведется широкая работа по увеличению эффективности фотосинтеза, генетическому конструированию новых видов биоэнергетических культур, разработке технологии производства биотоплива на основе липидосодержащих водорослевых культур [Соловьев, 2009].

В ветроэнергетике технологическое совершенствование идет в направлении повышения диаметра вращающейся турбины/ротора, который увеличился с 10 м в середине 1970-х гг. до 126 м в настоящее время. Это позволило заметно снизить затраты на выработку электроэнергии на ветроустановках. Кроме того, непрерывно происходит снижение капитальных затрат на их строительство, к 2015 г. эти затраты могут быть снижены еще на 20% [Глобальная энергетика …, 2011].

По данным ООН, использование возобновляемых источников энергии удвоилось с 2004 по 2008 г.

Наиболее динамичный темп роста продемонстрировала солнечная энергетика – 50% прироста в 2008 г. Если в 2004 г. мировые инвестиции в возобновляемые источники энергии достигли 30 млрд долл. США, то в 2007 г. они составили уже 100 млрд долл.

Основной массив инноваций в сфере возобновляемых источников энергии сконцентрирован в странах «триады» – Западной Европы, Северной Америки и развитых стран Восточной Азии, в которых производится половина ВВП мира (рис. 1). По абсолютному уровню финансирования выделяются США, Япония и Германия, на них приходится 68% общего расхода на развитие возобновляемой энергетики мира. В процессе диффузии инноваций производственная база возобновляемой энергетики, а вслед за ней и технологий перемещается прежде всего в страны периферии этих трех центров, экономически связанных с ними [Берёзкин, Синюгин, 2011].

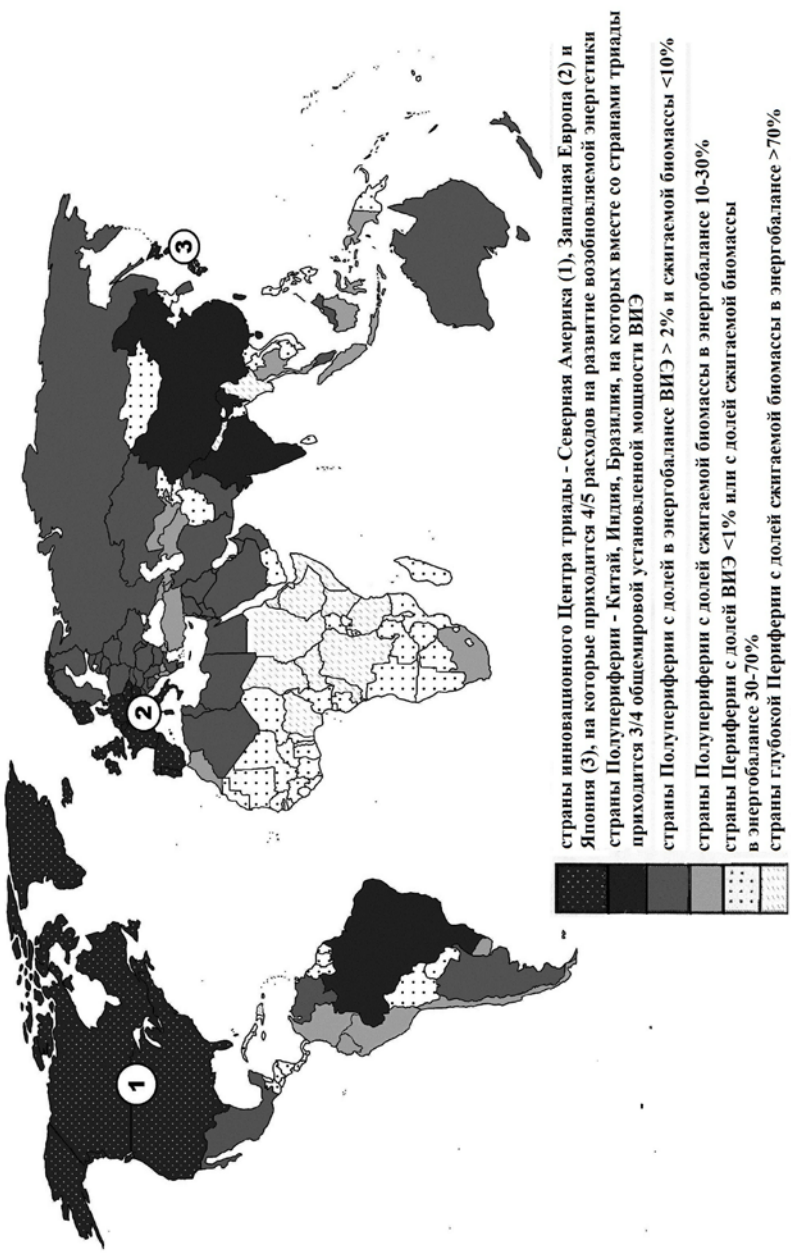


Рис. 1. География инноваций возобновляемой энергетики мира

В 2005 г. страны – члены Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) вместе с Бразилией, Индией и Китаем производили 80% коммерческого электричества и 77% тепла от общемирового количества использованных возобновляемых источников энергии, а также 99% возобновляемого транспортного топлива.

В 2007 г. Европарламент утвердил показатель вклада возобновляемых источников энергии в энергобаланс в странах сообщества: в 2020 г. – 20% и к 2040 г. – 40%. В настоящее время 20%-й рубеж уже превышен, например, в Дании, где возобновляемая энергетика составляет 27% в энергобалансе. Отметим закономерный этап развития возобновляемой энергетики – в январе 2009 г. в Бонне учреждено Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (International Renewable Energy Agency – IRENA).

В США обнародована программа, в соответствии с которой в возобновляемые источники энергии будет инвестировано 150 млрд долл. К 2025 г. планируется обеспечить производство 25% американской энергии за счет возобновляемых источников.

Что касается России, то здесь положение дел сложнее. С одной стороны, существуют определенные факторы в пользу развития возобновляемых источни ков энергии, например централизованные системы энергоснабжения охватывают лишь 1/3 территории страны. Около 20 млн человек проживают вне этих систем. Надежное энергообеспечение отдаленных: районов – сложная и дорогая задача для государства. Более половины административных районов энергодефицитны (импортируют энергоресурсы из других регионов). Газифицировано лишь около 50% населенных пунктов.

Несмотря на это, рост возобновляемой энергетики не столь внушителен, как в странах – лидерах в этой отрасли. При сильной зависимости экономики страны от экспорта углеводородного сырья возобновляемая энергетика пока не востребована.

Выводы:

– с увеличением доли газа и возобновляемых источников энергии и снижением доли угля и нефти в энергобалансе базовый энергоноситель выделяться не будет. Структура мировой энергетики в ближайшее десятилетке сильно диверсифицируется, что будет способствовать развитию конкуренции между разными видами энергии, между странами и регионами;

– учитывая высокий темп роста инвестиций, возобновляемую энергетику можно считать высокотехнологичной инновационной отраслью. Как динамично растущая отрасль, находящаяся на восходящей фазе технологического развития, возобновляемая энергетика имеет существенный потенциал совершенствования и появления новых технологий;

– по объему расходов на возобновляемую энергетику, доле в мировой установленной мощности возобновляемых источников энергии, а также по доле возобновляемой энергетики в страновом энергобалансе можно выделить страны Центра, Полупериферии и Периферии. Кроме того, составлена карта «География инноваций возобновляемой энергетики мира».

Литература

Бабурин В.Л. Инновационные циклы в российской экономике. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. 120 с.

Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А. Постиндустриальные тенденции конкурентоспособности энергетики мира // Конкурентоспособность в системе мирового хозяйства: пространственный анализ / Под ред. Н.С. Мироненко. М.: Пресс - Соло, 2002. С. 340-354.

Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А. География инноваций и возобновляемая энергетика мира // Малая энергетика. 2011. № 1-2. С. 3-10.

Бушуев В.В., Телегина Е.А., Шафраник Ю.К. Миро вой нефтегазовый рынок: инновационные тенденции. М.: ИАЦ «Энергия», 2008. – 358 с.

Валлерстайн И. Миросистемный анализ. – М.: ИД «Территория будущего», 2006. – 248 с.

Глобальная энергетика и устойчивое развитие. Мировая энергетика – 2050 (Белая книга) / Под ред. В.В. Бушуева, В.А. Каламанова. – М.: ИД «Энергия», 2011. – 360 с.

Голицын М.В., Голицын А.М., Пронина М.В. Альтернативные энергоносители. М.: Наука, 2004. – 159 с.

Соловьев А.А. Инновации в возобновляемой энергетике // Вести. РАЕН. 2009. № 2. С. 223-230.

Шумпетер Й.А. Теория экономического развития. – М.: ЭКСМО, 2007. 864 с.

Massachusetts Institute of Technology News. 10 October 2013 / http://news.mit.edu/2013/innovation-in-renewable-energy- technologies-booming-1010 (дата обращения 31.10.2017).

Renewables 2010 Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Paris, 2011.

ТИПЫ СТРАН ПО УРОВНЮ ИНВЕСТИЦИЙ В ВОЗОБНОВЛЯЕМУЮ ЭНЕРГЕТИКУ

М.Ю. БЕРЁЗКИН, О.А СИНЮГИН

Высокие темпы роста возобновляемой энергетики на рубеже тысячелетий говорят о том, что возобновляемая энергетика с разнообразием технологий претендует на серьезную роль в будущей мировой энергетике. В то время как традиционная энергетика, использующая ископаемое топливо, находилась в стагнации, возобновляемая демонстрировала рекордные темпы роста. Интерес к возобновляемой энергетике связан уже не только с экологическими преимуществами, но и с устойчивым, безопасным энергоснабжением человечества в будущем [Безруких, 2007; Стребков, Харченко, 2011]. Важным подтверждением высоких темпов роста возобновляемой энергетики является приток инвестиций.

Инвестиционные процессы в возобновляемой энергетике при среднем многолетнем тренде роста довольно изменчивы (волатильны). Исследование изменений и причин этих изменений представляется чрезвычайно важным. Отражением ситуации с инвестициями в возобновляемую энергетику может служить миросистемный анализ и модель «Центр-Полупериферия-Периферия» [Валлерстайн, 2006].

Этот анализ, нашедший широкое применение в экономико-географических исследованиях, взят в качестве базового при изучении территориальной неоднородности инвестиционных процессов в возобновляемой энергетике мира. В ходе эволюции модели Валлерстайна «Мир-Системы» ее центр неоднократно перемещался: многие века этот центр находился в Китае, до XIX в. сначала был в Европе, затем – в Северной Америке. В связи с этим наблюдающийся в последнее время экономический подъем Китая можно считать началом возвращения центра «Мир-Системы» в его «естественное» место после европейско-североамериканского периода.

В работе использованы сравнительно-географический, проблемный, типологический подходы, метод сравнительного анализа временных рядов данных по инвестициям по странам и регионам и в секторах возобновляемой энергетики, а также материалы международных сетевых организаций, в том числе входящих в ООН [Doom, 2013; Global Trends, 2014; World Energy, 2015; Renewables Global, 2016].

Инновационная составляющая инвестиционного процесса. Инвестиционные процессы имеют непосредственную причинно-следственную связь с инновационным развитием. С одной стороны, инвестиции стимулируют инновации, а с другой стороны, от уровня развития инновационных технологий зависит объем привлечения инвестиций.

В данном исследовании мы исходим из того, что инновации, а точнее инновационный процесс в энергетике исторически связан со сменой базовых энергоносителей при соответствующем переходе от одного технологического уклада к другому в терминах Кондратьева, когда каждому технологическому укладу соответствует свой базовый энергоноситель [Кондратьев, 2002]. Исторически, для первого технологического уклада доиндустриальной эпохи им являлась энергия воды и ветра, для второго – уголь, для третьего – нефть.

Что касается четвертого технологического уклада, то еще в 1970-е гг. преобладало оптимистичное мнение о скором замещении нефти ядерной энергией, демонстрирующей тогда быстрый экспоненциальный рост. Но известные трагические события с авариями на атомных электростанциях выявили реальные риски и несовершенство ядерных энергетических технологий. Атомная энергетика в данный момент не стала базовой, главной энергетической технологией.

При сохранении существующих темпов роста возобновляемой энергетики, сохранением доли газа и уменьшением доли угля, нефти и атомной энергетики в энергобалансе базовый энергоноситель выделяться не будет, как это было при смене технологических укладов в индустриальной экономике. Структура мировой энергетики в ближайшее десятилетие сильно диверсифицируется [Глобальная энергетика ..., 2011].

В настоящее время темпы роста возобновляемых источников энергии заметно превышают темпы роста в традиционной, углеводородной энергетике, которая за полтора столетия развития практически достигла технологического предела. Способы добычи углеводородов и производства электроэнергии отработаны и все более трудны для совершенствования. Кроме того, для поддержания уровня добычи с каждым десятилетием необходимо вовлекать в разработку месторождения из все более отдаленных и труднодоступных районов. Все больший масштаб принимает извлечение ресурсов в шельфовой зоне, большие средства затрачиваются на строительство подводных трубопроводов [Берёзкин, Синюгин, 2013].

Между тем, постиндустриальная экономика характеризуется сокращением энергопотребления и ресурсоемкости в отраслях материального производства. В отличие от индустриальной экономики, новые технологические решения не требуют таких же количеств невозобновляемых природных ресурсов и энергии. Прирост энергопотребления наблюдается лишь в развивающихся странах, проходящих еще путь индустриального развития, тогда как в развитых постиндустриальных странах, широко внедряющих энергоэффективные и энергосберегающие технологии, темпы рост энергопотребления находятся в стагнации. Таким образом, если в ситуации с индустриальной экономикой (с высокими темпами роста энергопотребления) возобновляемая энергетика не могла достойно конкурировать с углеводородной, то при постиндустриальном развитии – это вполне возможно.

В постиндустриальной экономике иерархически многоступенчатые производства все больше уступают место специализированным, ориентированным на фрагментарное производство предприятиям. Такая же тенденция наметилась и в энергетике, где все более востребованными становятся автономные, децентрализованные энергопроизводители и энергопотребители. Вписаться в новую архитектуру энергетики, занять «экологическую нишу» вполне эффективно могут возобновляемые источники энергии [Киушкина, 2016].

Динамика инвестиционных процессов. Двузначные цифры темпов прироста возобновляемой энергетики были достигнуты на основе инвестирования масштабных научных разработок, инициированных мировым энергетическим кризисом 1970х гг. Лидерами этого процесса стали такие европейские страны как Дания, ФРГ, Великобритания, а также США, Япония, Бразилия (последняя – за счет производства биотоплива, точнее – моторного спирта из сахарного тростника). В середине 1980-х объем инвестирования в возобновляемую энергетику был значительно снижен из-за резкого падения мировых цен на нефть. Несмотря на это, на основе инвестиционного задела в 1990-х гг. был достигнут технологический прорыв в ветроэнергетике (Дания, Германия, США), в преобразовании солнечной энергии (США), в переработке биомассы в жидкое топливо (Бразилия и Китай). Наблюдался резкий рост установленных мощностей при активной государственной поддержке и инвестировании новых технологий за счет налоговых льгот, субсидий, льготного кредитования.

Начало второй пульсации инвестиций в возобновляемую энергетику наблюдается с конца 1990-х гг. Прежде всего, за счет привлечения частных инвестиций в развитых странах («страны-Центра», если оперировать терминами миросистемного анализа): производство возобновляемой энергии в них стало коммерчески выгодно. Необходимость в государственных инвестициях в условиях отсутствия платежеспособного спроса населения оставалась в развивающихся странах. Со временем активную экспансию возобновляемой энергетики в развивающихся странах стали осуществлять совместные предприятия. Для них было характерно сочетание инвестиций и технологических разработок энергетических компаний развитых стран и растущие энергетические потребности развивающихся стран. География возобновляемой энергетики стала расширяться. Крупные или локальные установки, использующие возобновляемые источники энергии, теперь можно найти практически в любой стране.

В настоящее время в развитых странах главными причинами инвестирования

в возобновляемую энергетику являются как ограниченность традиционных углеводородных ресурсов, так и желание уменьшить зависимость от их импорта. В развивающихся же странах, с одной стороны, возобновляемая энергетика используется в качестве диверсификации растущей в условиях индустриального развития энергетики (как например, в Китае, Индии, где процесс индустриализации сопряжен с высокой энергоемкостью экономики). С другой стороны, возобновляемая энергетика помогает решать проблемы в слаборазвитых странах (или «странах-Периферии»), неспособных удовлетворить свои энергопотребности на хоть какомто достойном уровне, особенно в сельских районах (как например, во многих странах Тропической Африки). После спада цен на энергию в 1997-1999 гг., вызванного азиатским кризисом и естественным циклическим спадом, возобновляемая энергия снова привлекла внимание инвесторов во всем мире. Значительное повышение цен на нефть к середине 2000-х гг. увеличило коммерческую привлекательность к возобновляемой энергетике.

На этой волне формируются новейшие технологии на основе новых материалов в фотоэлектроэнергетике, ветроэнергетике, создаются преобразователи энергии тепла Земли, океана, разнообразные биоэнергетические системы и предпринимаются попытки создать эффективную водородную энергетику. Новый всплеск роста инвестиций оказался еще более масштабным, чем в 1970-х. Если в 2004 г. инвестиции в возобновляемую энергетику составили чуть меньше 40 млрд долл. США, то в 2005 г. – 73, то есть почти в 2 раза за один год. Эта волна несколько стихла во время кризиса 2008 г. Но это снижение инвестиций было лишь на 2% – меньше, чем падение в других сферах мировой экономики. Связано это было с большой инерцией, который набрал инвестиционный процесс в возобновляемой энергетике.

В 2011 г. впервые объем инвестиций в возобновляемую энергетику оказался больше, чем в генерацию на традиционных источниках энергии – 223 млрд долл. США. А через 5 лет инвестиции в возобновляемые источники энергии составили 62% инвестиций в новые мощности всей мировой энергетики. После небольшого спада, глобальные инвестиции в возобновляемую энергетику в 2015 г. достигли исторического максимума – 286 млрд долл. США, что более чем в 7 раз больше чем в 2004 г. Возобновляемые источники энергии без учета крупных ГЭС впервые составили половину от вновь введенных мощностей [Global Trends, 2014].

Несмотря на то, что в 2013 г. объем инвестиций еще раз снизился, произошло падение цен на фотоэлементы, рост установленных мощностей продолжился. Это означало, что рекордное количество введенных фотоэлектрических мощностей произошло за меньшие деньги, чем в 2012 г. Кроме того, если средняя стоимость акций на рынке возобновляемых источников непрерывно падала в 2008-2012 гг., то, начиная с 2013 г., она неуклонно росла.

В посткризисный период происходит географический сдвиг в инвестициях в возобновляемую энергетику: так если в 2007 г. развитые страны инвестировали в возобновляемые источники в 2 с лишним раза больше, чем развивающиеся страны, то уже в 2013 г. этот разрыв сократился до 30%, а в 2015 г. впервые инвестиции развивающихся стран превзошли инвестиции развитых – 156 и 130 млрд долл. США соответственно. При этом существенное различие между данными группами стран состоит в том, что развивающиеся страны лидируют по инвестициям в крупномасштабные проекты, а развитые страны – по инвестициям в распределен-

ные установки возобновляемой энергии малой мощности на уровне домохозяйств.

С 2010 г. среди секторов возобновляемой энергетики лидер отрасли – солнечная энергетика. Доля инвестиции в солнечную энергетику неуклонно растет – за 5 лет она выросла с 40 до 56% от доли общих инвестиций и достигла 160,7 млрд долл. США – это более чем в 1,5 раза превышает инвестиции во второй по значимости сектор возобновляемой энергетики – ветроэнергетику, которая до 2010 г. лидировала по объему инвестиций (табл.). Ускорение развития солнечной энергетики в мире вызвано значительным ростом инвестиций в Китае (с 22% в 2010 г. до 36% в 2015 г. от общемировых инвестиций в солнечную энергетику). Кроме Китая лидерами с полным циклом солнечно-энергетического комплекса являются Германия, США и Япония [Акимова, 2015].

Таблица. Динамика инвестиций по странам, регионам и отраслям возобновляемой энергетики, млрд долл. США

Страны/показатели	2005	2010	2015
Развитые страны	53,0	164,0	130,0
Китай, Индия, Бразилия	14,4	55,6	120,2
Другие развивающиеся страны	5,6	16,7	35,8
США	11,9	34,6	44,1
Бразилия	2,2	7,9	7,1
Америка (без США и Бразилии)	3,4	11,5	12,8
Европа	29,4	101,3	48,8
Китай	5,8	40,0	102,9
Индия	3,2	8,7	10,2
Азия и Океания (без Китая и Индии)	8,3	18,1	47,6
Средний Восток и Африка	0,6	5,0	12,5
Солнечная энергетика	16,4	96,9	160,7
Ветроэнергетика	22,9	95,5	109,1
Малая гидроэнергетика (<25 МВт)	4,4	3,6	3,9
Биотопливо	8,2	8,5	2,2
Геотермальная энергия	1,0	3,1	2,5
Энергия биомассы и отходов	7,8	12,0	6,0
Энергия океана	0,01	0,3	0,23

Типы стран по уровню инвестиций в возобновляемую энергетику. Одним из объективных показателей уровня привлечения инвестиций является душевой показатель. Этот показатель был рассчитан с использованием данных по инвестициям в возобновляемую энергетику по странам мира [Global status report. REN21, 2016]; по нему составлена карта (рис. 1). На основании составленной карты была проведена типологизация стран по уровню развития инвестиций в возобновляемую энергетику. Предлагается выделить четыре группы стран.

Первый тип. Страны с очень высоким уровнем развития инвестирования в возобновляемую энергетику (более 50 тыс. долл. США / н. д. н.). К ним относятся страны Северной Америки и Западной Европы, почти все страны Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), Южно-Африканская Республика и Китай, который в числе лидеров в инвестициях не только по душевому показателю, но и лидер по абсолютным величинам (табл.).

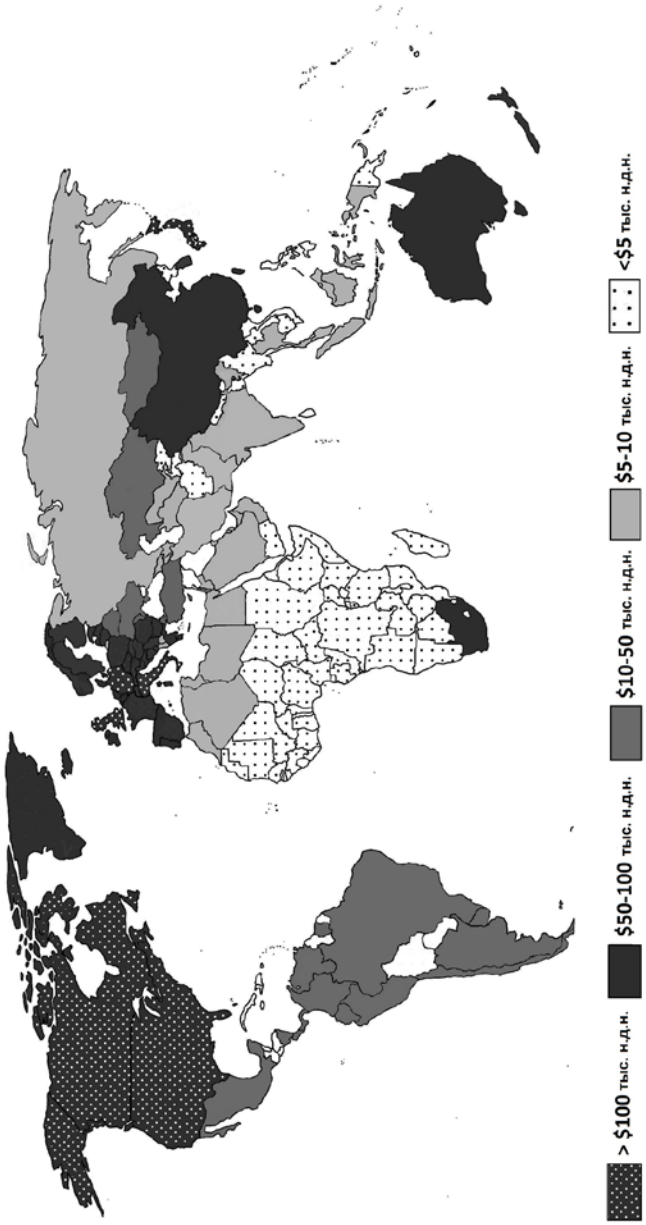


Рис. 1. Инвестиции в возобновляемую энергетику по странам мира (тыс. долл. / н. д. н., 2015 г.)

Китай занимает первое место по объемам инвестиций в возобновляемую энергетику с 2008 г. Там, начиная с 2013 г., в возобновляемую энергетику инвестируется больше, чем в углеводородную и атомную. В 2015 г. объем инвестиций в возобновляемую энергетику в Китае составил более 100 млрд долл. США, тогда как в занимающих второе место США 44,1 млрд долл. США. Но, если в Китае после пери ода бурного роста в 2005-2010 гг. основной тенденцией стало снижение активности в ветроэнергетике, то в США наблюдается рост инвестиций как раз в ветроэнергетику.

Страны Евросоюза достигли исторического максимума инвестиций в 2011 г. (123 млрд долл. США). После чего на следующий год произошло снижение до 89 млрд долл. США В 2013-2015 гг. объем инвестиций колебался на уровне 50-60 млрд долл. США. В основном такое положение было связано с тем, что сворачивались крупные государственные программы по стимулированию развития возобновляемой энергетики. Нынешний высокий уровень развития технологий и производства в странах Евросоюза позволяет рассчитывать на приток частных инвестиции, которые, естественно, не такие масштабные как государственные.

Второй тип. Страны с высоким уровнем развития инвестирования в возобновляемую энергетику (10-50 тыс. долл. США / н. д. н.). К ним относятся страны таких регионов как Латинская Америка, Восточная Европа. Сюда же входят Турция, Казахстан и Монголия. У последних двух высокий душевой показатель получился, в какой-то степени, из-за малочисленности населения стран.

Третий тип. Страны со средним уровнем развития инвестирования в возобновляемую энергетику (5-10 тыс. долл. США / н. д. н.). Это страны Северной Африки, Азии, включая такие многонаселенные страны как Индия, Индонезия и Пакистан. Этот тип стран, как впрочем, и второй можно отнести к «странам-Полупериферии». По душевому показателю к третьему типу можно отнести и Россию (см. ниже).

Четвертый тип. Страны с низким уровнем развития инвестирования в возобновляемую энергетику (менее 5 тыс. долл. США / н. д. н.). К этому типу относятся бедные страны Азии и Тропической Африки, то есть те, которые соответствуют «странам-Периферии».

Положение дел с инвестициями в возобновляемую энергетику в России. Что касается России, то здесь положение сложилось непростое. Вплоть до 1990-х гг. СССР можно было отнести к «странам-Центрам». Тогда широко выполнялись научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по ветроэнергетике, гидроэнергетике и солнечной энергетике (начиная с разработок солнечных элементов для батарей космического предназначения и вплоть до гелиотермоустановок и возведения солнечных электростанций башенного типа, например, в Крыму в 1980-х гг.), а также строительства геотермальных электростанций (например, первой в 1966 г. Паужетской на Камчатке). Затем по разным причинам инвестирование в научный и технический потенциал возобновляемой энергетики не получило достойного развития. Тем не менее, в России существуют определенные географические факторы в пользу привлечения инвестиций в возобновляемые источники энергии:

– централизованные системы энергоснабжения охватывают лишь 1/3 территории страны и приблизительно 10-20 млн человек проживает вне этих систем;

– более половины административных районов энергодефицитны (пользуются

электро- и энергоресурсами из других регионов);

– газифицировано в 2016 г. лишь 62% населенных пунктов страны, что не сильно отличается от 2014 г., когда было 60%.

Таким образом, надежное энергообеспечение отдаленных районов - сложная и дорогостоящая для государства задача. В таких условиях целесообразней и эффективней было бы развивать энергетику на основе местных возобновляемых энергоресурсов.

В 2013 г. государством был утвержден механизм поддержки проектов на возобновляемых источниках энергии на оптовом рынке, инвесторы которых получили гарантированный возврат вложенных средств. По правилам на отечественных предприятиях должно быть произведено не менее половины комплектующих солнечных и ветроэлектростанций. Это поможет выйти России из положения «страны-Полупериферии», зависимой от технологий и продукции, в положение «страны-Центра».

В России до 2020 г. планируется ввести порядка 6 ГВт мощностей на основе возобновляемых источников энергии. В 2015-2016 гг. введены в эксплуатацию солнечные электростанции в Оренбургской области, Хакасии, Башкортостане, Якутии, где например, в пос. Батагай построена крупнейшая в мире за Полярным кругом такая электростанция с мощностью первой очереди 1 МВт [Министерство энергетики, 2016]. Минэнерго планирует масштабное строительство ветроэлектростанций на Дальнем Востоке с суммарной установленной мощностью десятков мегаватт. Программы по развитию возобновляемой энергетики существуют и для других регионов, областей и районов, находящихся вне централизованного энергоснабжения.

Выводы:

– постоянное увеличение инвестиций в возобновляемую энергетику ставит ее в мировой энергетике и в энергобалансе отдельных стран выше привычного статуса второстепенного источника энергии;

– высокие темпы роста инвестиций в находящуюся на восходящей фазе технологического развития возобновляемую энергетику, и экспоненциальный рост патентной деятельности демонстрируют существенный потенциал совершенствования, и возобновляемую энергетику можно считать высокотехнологичной инновационной отраслью;

– в отличие от инвестиций в другие секторы мировой экономики, возобновляемая энергетика не претерпела какого-либо спада и успешно преодолела финансово-экономический кризис 2008-2010 гг., достигнув новых максимумов по объемам инвестиций и темпам роста установленной мощности;

– в посткризисный период избыточное предложение, снижение издержек производства и большой объем мощностей возобновляемых источников энергии приводит к уменьшению капиталоемкости, поэтому в развитых странах поток инвестиций от крупных государственных программ переходит к частным;

– произошел географический сдвиг в инвестициях в возобновляемую энергетику: развивающиеся страны превысили по абсолютному уровню инвестиций развитые страны, прежде всего за счет Китая;

– по показателю объема инвестиций в возобновляемую энергетику на душу населения составлена карта «География инвестиций в возобновляемую энергетику мира», выделены и охарактеризованы четыре типа стран, в том числе и Россия.

Литература

Акимова В.В. Типология стран по уровню развития солнечной энергетики // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 4. С. 89-95.
Безруких П.П. Возобновляемая энергетика: сегодня – реальность, завтра – необходимость. – М.: Лесная страна, 2007. 120 с.
Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А., Соловьев А.А. География инноваций в сфере традиционной и возобновляемой энергетик мира // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 1. С. 28-32.
Валлерстайн И. Миросистемный анализ. – М.: Изд. дом «Территория будущего», 2006. 248 с.
Глобальная энергетика и устойчивое развитие. Мировая энергетика-2050 / Под ред. В.В. Бушуева, В.В. Каламанова. М.: Изд. дом «Энергия», 2011. 360 с.
Киушкина В.Р. Возобновляемые источники энергии в распределенной генерации малой энергетики // Молодой ученый. 2016. № 26. С. 45-47.
Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения / Сост. Ю.В. Яковец. – М.: Экономика, 2002. 768 с.
Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации / https://minenergo.gov.ru/node/489 (дата обращения 29.09.2017).
Стребков Д.С., Харченко В.В. Роль и место ВИЭ в развитии глобальной энергетики // Малая энергетика. 2011. № 3-3. С. 3-12.
Doom J. Developers Will Invest 1.9 Trillion in Clean Energy Over Next Five Years // Renewable Energy World. 2013. № 1. P 22-33. Global Trends in Renewable Energy Investment. Frankfurt School. - Frankfurt am Main, 2014.
Renewables 2015 Global status report. REN21. Paris, 2016.
World Energy Outlook 2014. OECD/IEA. Paris, 2015.

ЭКОНОМИКА ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

К.С.ДЕГТЯРЕВ

В силу широты используемых видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и недостатка информации о всех, исследование ограничено главным образом солнечными фотовольтаическими и ветроэлектростанциями. Кроме того, рассмотрены только внутренние затраты на строительство и работу станций различных типов, без использования показателей внешних издержек. Вопрос экономической эффективности или неэффективности использования ВИЭ поднимается часто. Основной показатель, используемый в обсуждениях по этому вопросу, – стоимость единицы (например, 1 кВт·ч) произведённой энергии при производстве энергии на основе ископаемых энергоносителей и при использовании ВИЭ. Существуют различные оценки, но вначале отметим, что это интегральный показатель, и кратко остановимся на исходных составляющих, из которых он складывается.

Прежде всего выделяются две основные группы затрат:

- Инвестиционные затраты (инвестиции, капиталовложения) – на строительство объекта. Основная часть инвестиционных затрат, как правило, приходится на оборудование, строительство зданий и сооружений, приобретение земельного участка, создание инфраструктуры.
- Операционные затраты (эксплуатационные затраты, текущие затраты) – связанные уже непосредственно с выпуском продукции – в нашем случае, с выработкой электроэнергии на уже построенной электростанции. Это затраты на сырье, материалы и комплектующие для производства продукции, оплату труда персонала, разного рода сопутствующие затраты и платежи.

В свою очередь, операционные затраты разбиваются на следующие группы:

– Постоянные затраты, не зависящие от объёмов производства продукта, которые необходимо нести даже при отсутствии производства продукта.

– Переменные затраты, зависящие от объёмов производства продукта, увеличивающиеся с ростом объёмов производства и уменьшающиеся при их снижении.

В структуру постоянных затрат обычно входит существенная часть затрат на оплату труда управленческого персонала, обслуживание оборудования, охрану и обеспечение безопасности предприятия. В структуру переменных затрат входят, прежде всего, сырье, материалы и комплектующие для производства продукции, значительная часть затрат на оплату труда основного производственного персонала. Основное и достаточно очевидное различие в структуре затрат между станциями на ископаемом сырье и на ВИЭ в том, что в первом случае переменные затраты будут высоки, во втором – практически отсутствовать.

Существенную долю затрат при работе станций на ископаемом сырье составляет исходный энергоноситель – газ, нефть, уголь, ядерное топливо. Его стоимость может составлять до 80% и выше от всех операционных затрат предприятия, при этом резко меняться в зависимости от конъюнктуры цен на энергоносители. В случае с возобновляемыми источниками энергии (за исключением станций, работающих на биоресурсах) исходное сырье – воздух (ветер), солнечная энергия, текущая вода или приливные волны, геотермальная энергия и т.д., можно считать бесплатным или «условно бесплатным». В этом на данный момент главное экономическое преимущество ВИЭ, позволяющее говорить об их большей экономической эффективности в долгосрочном плане.

В то же время, есть и недостатки, обусловленные прежде всего также самой природой энергоносителя – низкопотенциального (с низкой плотностью энергии, приходящейся на единицу площади) и недостаточно стабильного. Режим солнечного освещения резко меняется в течение суток и сезонов, изменения скорости ветра могут быть просто непредсказуемыми, и даже изменения речного стока могут быть резким

На практике это означает отчуждение больших площадей, в частности, для строительства солнечных (СЭС) и ветростанций (ВЭС), большой расход материалов и комплектующих в пересчёте на единицу установленной мощности и, в дальнейшем, произведённой энергии, дополнительные затраты на аккумуляцию энергии и балансирование системы, особенно если речь идёт об автономной (изолированной) станции (табл. 1).

Таблица. 1. Структура инвестиционных затрат для солнечных фотовольтаических систем, в %. [Копылов, 2015].

Тип установки	Ф/в ячейка	Ф/в модуль	Балансирование систем	Пректирование/ установка	Соружение/ земля
300 Вт изолированная установка	25	10	35	25	5
3 кВт в энергосистеме	39	20	18	16	7

В итоге это выливается в более высокие инвестиционные затраты и впоследствии – в несколько более высокие постоянные операционные затраты. Именно инвестиционная составляющая ведёт к снижению ценовой конкурентоспособности ВИЭ в целом.

Запуск электростанции на ВИЭ практически всегда существенно дороже, чем запуск станции на ископаемом сырье, вырабатывающей то же количество энергии. Однако далее обслуживание (операционные затраты) для станции на ВИЭ практически всегда дешевле из-за отсутствия затрат на энергоносители и, чем выше цены на ископаемое энергетическое сырье, тем больше преимуществ получают ВИЭ.

Теоретически станция на ВИЭ всегда – раньше или позже, окупится относительно станции на ископаемом топливе, практически же срок окупаемости и не всегда может превысить срок службы оборудования, то есть окупаемость просто не успеет наступить, даже если речь идёт о простом, а не дисконтированном сроке окупаемости.

Снижение инвестиционных затрат для ВИЭ является вопросом научно-технического прогресса, развития технологий, позволяющих более полно и с меньшими затратами использовать естественные энергетические потоки. В последние десятилетия здесь достигнуты впечатляющие результаты, прежде всего в солнечной энергетике, где инвестиционные затраты снизились в несколько раз (хотя они остаются выше, чем у ветроэлектростанций). Тем не менее, на данный момент они в среднем остаются выше или даже существенно выше по сравнению с затратами на строительство электростанций на ископаемом топливе.

Обычно при сравнении экономической эффективности в открытых источниках даются относительные показатели – затраты на единицу установленной мощности и на единицу выработки электроэнергии. Однако, для лучшего понимания реальной экономической составляющей, важно перевести это на язык абсолютных цифр, что мы и сделаем ниже.

Подробно экономические аспекты, включая инвестиционные затраты, рассматриваются также в [Дегтярёв и др., 2016].

В данном случае для иллюстрации сопоставим показатели экономической эффективности для трёх наиболее «ходовых» типов электростанций, использующих невозобновляемые и возобновляемые источники энергии – «обычную» теплоэлектростанцию (ТЭС) на газе, ветростанцию на суше (ВЭС) и солнечную фотовольтаическую (СЭС) станцию (табл. 2), используя данные US EIA для США:

1) о расчётных инвестиционных, постоянных и переменных операционных за-

тратах, от 2012 г. для электростанций, вводимых в действие в 2013 г.;

2) о расчётных выровненных затратах на электроэнергию для нового поколения мощностей, вводимого в 2019 г.

Таблица 2. Структура расчетных затрат [US EIA, 2017].

Тип станции	Ном. мощность, МВт	КИУМ %	Инвестиционные затраты, $/кВт	Постоянные операционные годовые затраты, $/кВт	Переменные операционные затраты без учёта топлива, $/кВт·ч	Переменные операционные затраты с учетом топлива, $/кВт·ч
ТЭС на газе, обычная с комбинированным циклом	620	87	917	13.2	0.006	0.05
Ветряная (на суше)	100	35	2213	39.55	0	0
Солнечная фотовольтаическая	150	25	3873	26.69	0	0

Видно, что инвестиционные затраты в расчёте на единицу установленной мощности у ВЭС и ТЭС заметно выше. Если же говорить об общих инвестиционных затратах, разница будет ещё выше, при этом существенно. Если мы исходим из того, что станция на ВИЭ должна вырабатывать столько же электроэнергии, сколько и ТЭС, мы должны брать в расчёт коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) разных типов станций. Мы видим, что у газовой ТЭС он составит 87%, к ВЭС – 35%, у СЭС – 25%. При данном КИУМ, газовая ТЭС (в нашем примере – мощностью 620 МВт) произведёт в год электрическй энергии: 620 МВт x 8760 ч x 87% = 4725 ГВт·ч.

Для годовой выработки того же количества электроэнергии на станциях, использующих ВИЭ, с учётом КИУМ, потребуется возвести: 620 МВт x 87% / 35% = 1541 МВт ВЭС и: 620 МВт x 87% / 25% = 2157 МВт СЭС.

Таким образом, общие инвестиционные затраты составят, для газовой ТЭС – 620 МВт x $ 917 тыс. / 1 МВт = $569 млн;

1) для ВЭС –

1541 МВт x $ 2213 тыс. / 1 МВт = $ 3411 млн (на $ 2842 млн выше);

2) для СЭС –

2157 МВт x $ 3873 тыс. / 1 МВт = $ 8356 млн (на $ 7788 млн выше).

Далее ВЭС или СЭС будут давать положительный экономический эффект за счёт менее высоких переменных операционных затрат.

Параллельно мы можем примерно рассчитать цены на газ, заложенные в показатели переменных затрат по газовой ТЭС. Собственно, затраты на топливо составляют: 0,05 - 0,004 = $0,046 за 1 кВт·ч.

Исходя из того, что на выработку 1 кВт·ч уходит примерно 0,3 $м^3$ газа, стоимость 1 $м^3$ газа составит: 0,046/0,3 = $0,15 за 1 $м^3$ или $150/1000 $м^3$, или при курсе рубля 55,0 – 2,72 руб/$м^3$.

В случае с газовой ТЭС постоянные операционные затраты составят $ 13,2 на 1кВт установленной мощности в год или всего: $13,2 x 620 000 МВт = $8 млн в год. Суммарные переменные затраты при годовой выработке 4725 ГВт-ч составят: $0,05 x 4725 ГВт·ч = $236 млн в год.

Суммарные операционные затраты для газовой ТЭС составят: $8 + $236 = $244 млн в год.

Сравним их с суммарными операционными затратами (включающими только постоянные) ВЭС, вырабатывающей то же количество энергии: $ 39,55 / 1 кВт x 1541 МВт = $ 61 млн

Станции на ВИЭ до сих пор требуют в большинстве случаев мер поддержки. Окупаемость в течение нескольких десятков лет обычно не является для частного инвестора привлекательной. Существенным препятствием являются и высокие инвестиционные затраты.

Таким образом, превышение инвестиционных затрат на строительство ВЭС над газовой ТЭС составляют: $3411 млн - $569 млн = $2842 млн

В свою очередь, ежегодная экономия на операционных затратах ВЭС по сравнению с газовой ТЭС составит: $244 млн - $61 млн = $183 млн Отсюда можно вычислить простой срок окупаемости ВЭС относительно ТЭС: $2842 млн / $183 млн в год = 15,5 лет.

Таблица 3. Сопоставление основных экономических параметров ТЭС, ВЭС и СЭС [US EIA, 2017]

	Газовая ТЭС	ВЭС	СЭС
КИУМ, %	87	35	25
Номинальная мощность. МВт	620	1541	2158
Выработка электроэнергии в год. МВт·ч	4725144	472514	4725164
Инвестиционные затраты. $/1 кВт	917	2213	3873
Инвестиционные затраты (млн $), всего	569	3611	8356
Постоянные операционные затраты. $/МВт	13200	39550	24690
Постоянные операционные затраты, млн $	8	61	53
Переменные операционные затраты. $/МВт·ч	50	0	0
Переменные операционные затраты, млн $	236	0	0
Операционные затраты (млн $), всего	244	61	53
Превышение инвестиц. затрат относит. газовой ТЭС, млн $	-	2842	7788
Экономия на операц. затратах относит, газовой ТЭС, млн $ в год	-	183	191
Простой срок окупаемости относительно газовой ТЭС, лет	-	15.5	40.7

Аналогичные расчёты можно провести и для СЭС – в данном случае простой срок окупаемости составит 40,7 лет (табл. 3). В этом случае срок окупаемости рассматривается без учёта дисконтирования. При введении в расчёты ставки дисконтирования всего 5% (заведомо заниженная величина для проектов такого рода) срок окупаемости ВЭС вырастет до примерно 30 лет, а СЭС – до величины порядка нескольких тысяч лет, что делает рассмотрение лишённым смысла.

Из этого примера следует, что станции на ВИЭ, безусловно, до сих пор требуют в большинстве случаев существенных мер поддержки. Окупаемость в течение нескольких десятков лет, как правило, не является для частного инвестора привлекательной. Серьезным препятствием являются и высокие инвестиционные затраты как таковые. В связи с этим более эффективной будет поддержка именно на инвестиционной стадии, связанная с компенсацией инвестиционных затрат, и, в меньшей степени, определённые льготы, связанные с тарифным и налоговым режимом уже на эксплуатационной стадии, что в сущности можно сказать про любой инвестиционный проект.

На основе данных табл. 1 мы можем рассчитать и выровненные затраты на единицу произведённой энергии (Levelized Costs of Energy, LCoE). Это все затраты, включая инвестиционные и операционные, равномерно распределённые на некотором интервале времени, составляющем жизненный цикл станции (обычно в интервале 20-40 лет).

Рассмотрим их на 30-летнем интервале (табл. 4). За это время каждая станция произведёт 141,7 млн МВт·ч (141,7 млрд кВт·ч) электроэнергии.

Таблица 4. Расчет выровненных затрат (LCoE) для ТЭС, ВЭС и СЭС на 30-летнем интервале (расчёт автора)

Показатель	Газовая ТЭС	ВЭС	СЭС
Производство злектрозиергии за 30 лет, МВт ч	141754 320	141754320	141754320
Инвестиционные затраты, всего, млн $	569	3411	8356
Выровненные инвестиционные затраты на 1 кВт·ч. $	0.004	0.024	0.059
Выработка злектрозкергии в год, МВт·ч	4725144	4725144	4725144
Постоянные операционные затраты в год, млн $	8	61	53
Выровненные постоянные операционные затраты на 1 кВт·ч. $	0.002	0.013	0.011
Переменные операционные затраты иа 1 кВт·ч. $	0.050	0.000	0.000
Выровненные затраты, всего иа 1 кВт·ч. $	0.056	0.037	0.070

Для газовой ТЭС инвестиционные затраты на 1 кВт·ч составят:

$569 млн / 141,7 млрд кВт·ч = $0,004. Постоянные операционные затраты $ 8 млн в год при годовом производстве электроэнергии 4725 млрд кВт·ч в пересчёте на 1 кВт·ч составят:

$8 млн / 4725 млрд кВт·ч = $0,002. Переменные затраты (не требующие

трансформации и уже выраженные в $ / кВт·ч) составляют $ 0,05.

Таким образом, общие выровненные затраты составят:

$0,004 + $0,002 + $0,05 = $0,056, то есть 5,6 центов/кВт·ч или по курсу 55,0 – 3,08 руб/кВт·ч.

Отметим, что в общей структуре выровненных затрат доля инвестиционной составляющей для ТЭС составила всего 7,1 %, тогда как для ВЭС и СЭС – 64,9 и 84,3 %о, соответственно.

Это упрощённый расчёт, в более полном виде формула расчёта выровненных затраты может выглядеть так [1]:

$$LEC = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

где LEC (Levelized Energy Costs) – выровненные затраты за данный период; I_t – инвестиционные затраты в год t; M_t – эксплуатационные и ремонтные затраты в год t; F_t – затраты на топливо в год t; E_t – объём производства энергии в год t; r – ставка дисконтирования денежных потоков; n – продолжительность данного периода (жизненного цикла генерирующей станции), лет.

Таблица 5. Данные по средним мировым выровненным затратам на 2016 г. [IRENA, 2017]

Тип энергоносителя/станции / выровненные затраты, $/кВт·ч	Средние	Мин.	Макс.
Электростанции на биомассе	0.081	0.061	0.17
Геотермальные	0.064	0.043	0.113
Гидроэлектростанции	0.051	0.018	0.246
Солнечные фотовольтаические	0.131	0.053	0.279
Солнечные тепловые	0.242	0.182	0.312
Ветростанции на суше («офшорные»)	0.056	0.024	0.141
Ветряные в море («офшорные»)	0.208	0.068	0.227
На углеводородном сырье	0.045	-	-

Отметим также, что показатель выровненных затрат на определённом (и достаточно длительном) интервале времени даёт определённое представление об общих экономических параметрах. В то же время это весьма «сглаженный» показатель, не дающий представления о динамике затрат во времени. Так, в нашем примере выровненные затраты на 30-летнем интервале для ВЭС оказываются существенно ниже, чем для углеводородной ТЭС, что, однако, совсем не означает однозначной целесообразности инвестиционного решения в пользу ВЭС.

По выровненным затратам большой массив данных приводит Международная ассоциация возобновляемой энергетики (International Renewable Energy

Association, IRENA). Средние мировые величины выровненных затрат, по данным этой организации, варьируются в очень широком диапазоне (табл. 5). По этим данным мы видим, что на данный момент средние затраты на производство электроэнергии остаются наименьшими у станций, работающих на ископаемом углеводородном сырье.

В то же время, в ряде случаев дешевле оказываются станции на ВИЭ, а диапазон затрат на производство единицы энергии у них очень широк. В частности, затраты для фотовольтаических СЭС могут различаться в пять раз, для ВЭС на суше – почти в шесть раз.

Это в огромной степени связано с зависимостью потенциала ВИЭ от местных географических, природных, отчасти и хозяйственных условий. О географических закономерностях ВИЭ и развития энергетики на их основе подробно говорится в [Дегтярёв, 2015]. Экономическая эффективность станций на ВИЭ и сама целесообразность их размещения в существенно большей степени зависит от условий данного места, чем в случае со станциями на ископаемых энергоносителях. Географический фактор играет существенно более важную роль. Это также ключевой момент, связанный с экономической спецификой ВИЭ.

Говорить об их эффективности или неэффективности «вообще», в отрыве от определённых условий, вряд ли имеет смысл, а основной задачей становится выбор оптимальных ниш (прежде всего, физико-географических и экономико-географических) для размещения станций и развития энергетики на возобновляемых источниках энергии.

Экономика электростанций на ВИЭ в России. На данный момент информации об экономической составляющей ВИЭ в России недостаточно. Реализованных проектов, во всяком случае крупных, пока очень немного – при этом больше заявленных проектов. По информации [Администратор торговой системы, 2017], инвестиционные затраты для проектов ВИЭ, прошедших конкурсный отбор в 2013-2016 гг., составляют:

1) для проектов солнечной энергетики – от 95 тыс. (СЭС «Рудник» в Белгородской области) до 130 тыс. руб/кВт (Алтайская «СЭС-5» в Республике Алтай);

2) для проектов ветроэнергетики – от 65 тыс. до 155 тыс. руб/кВт.

В данном случае, речь идёт о плановых затратах. Что касается фактических инвестиционных затрат – на уже пущенные в эксплуатацию электростанции на ВИЭ, есть некоторые данные по солнечным электростанциям, приводимые в отраслевых источниках (табл. 6).

По информации «Хевел» и «ЕвроСибЭнерго», при строительстве СЭС использовались, большей частью, отечественное оборудование, материалы и комплектующие – на 70 и 55 %, соответственно, в соответствии с требованиями по локализации производства на территории России. При этом «Хевел» располагает собственным производством солнечных панелей (город Новочебоксарск Республики Чувашия), а «ЕвроСибЭнерго» в ходе строительства Абаканской СЭС создало собственное производство мультикристаллического кремния и инверторов.

Есть также данные о выработке электроэнергии рядом солнечных станций, введённых в эксплуатацию в последние годы (табл. 7).

Таблица 6. Инвестиционные затраты на крупные солнечные электростанции (по данным отраслевых источников)

СЭС место, проектная компания	Дата и стадия строительства	Мощность станции, МВт	Общий объем инвести-ций, руб.	Инвестиции на кВт установленной мощности, руб.
Усть-Канская, Республика Алтай, ГК «Хевел»	введена в эксплуатацию 09.2016	5.0	более 500	>100 000
Онгудайская, Республика Алтай	введена в эксплуатацию 09.2017	5.0	500	100 000
Бугульчанская, Башкортостан, ГК «Хевел»	введена в эксплуатацию 12.2015	5.0; общий планируемый объём – 64.0	оценка – более 6000	100 000
Орская, Орск, Оренбургская обл., «Т-Плюс» («Реново»)	введена в эксплуатацию 12.2015	25.0	2000	120 000
Абаканская, Хакасия, АО «ЕвроСибЭнерго»	введена в эксплуатацию 12.2015	5.2	600	115 000
Нариманово, Астраханская обл., ООО «Солар Менеджмент»	введена в эксплуатацию 12.2015	0.25	70	280000

Таблица 7. Данные о выработке электроэнергии СЭС на территории России (по данным отраслевых источников)

СЭС, регион	Период	Мощ-ность станции, МВт	Выработка электро-энергии за период, МВт·ч	Выра-ботка электро-энергии за год, МВт·ч	Фактич. КИУМ %
Кош-Агачская, Республика Алтай	04.2015-11.2016 (1.6 года)	5.0	12000	7500	17.1
Бугулочаиская, Башкирия	01.2016-07.2016 (0.6 года)	5.0	4500	7500	17.1
Абаканская, Хакасия	12 2015-11.2016 (0.8 года)	5.2	6000	7500	15.8
Орская, Оренбург-ская область	12.2015-06 2016 (1.5 года)	25.0	55000	36667	16.7
Четыре СЭС «Саха-энерго», Якутия	2016 год	0.1 (общая)	100	0.1	11.4

Отсюда мы можем вычислить выровненные инвестиционные затраты на выработку 1 кВт·ч электроэнергии на российских солнечных электростанциях (табл. 8). Они составляют 2,2-2,7 руб/кВт·ч; мы можем принять среднюю величину в 2,5 руб/кВт·ч.

Ещё меньше информации об операционных затратах российских станций на ВИЭ. По данным различных европейских и американских источников [Копылов, 2015], операционные затраты отличаются большим разбросом, составляя:

1) для солнечных станций мощностью от 5 МВт, от 21 до более 80 евро/кВт при средних значениях 40-70 евро/кВт в год;

2) для солнечных станций мощностью от 100 кВт – 60-90 евро/кВт;

3) для ветростанций – 29-80 (среднее – 40-60) евро/кВт.

Таблица 8. Расчет выровненных инвестиций на интервале 30 лет (без учета дисконтирования) (расчёт автора)

СЭС, регион	Объём инвестиций, млн руб.	Годовая выработка электроэнергии, МВт·ч	Выработка электроэнергии за 30 лет, МВт·ч	Выровненные инвестиционные затраты на 1 кВт·ч, руб.
Кош-Агачская, Республика Алтай	500	7500	225000	2.2
Бугульчаисиая, Башкирия	500	7500	225000	2.2
Орская, Оренбургская обл.	3000	36667	1100010	2.7
Абаканская, Хакасия	600	7500	225000	2.7

По имеющимся российским солнечным станциям есть отдельные данные о численности персонала. В частности, по имеющимся данным, на Абаканской СЭС мощностью 5,2 МВт задействовано шесть сотрудников; на Кош-Агачской СЭС мощностью 5 МВт – примерно десять сотрудников. Иными словами, мы можем говорить о необходимости привлекать примерно одного-двух (в среднем полтора) работников на 1 МВт установленной мощности.

Допустим, средняя зарплата работника станции (с учётом НДФЛ) – 35 тыс.

руб. в месяц или 420 тыс. руб. в год. Общая сумма выплат на одного работника с учётом социальных отчислений (30,2 %) составит величину:

420 000 x 1,302 = 547 тыс. руб. в год.

Соответственно, на шесть сотрудников (вариант Абаканской СЭС) она составит:

547000 x 6 = 3,282 млн руб. в год; на десять сотрудников (вариант Кош-Агачской СЭС):

547 тыс. x 10 = 5470 тыс. руб/год.

Данные станции должны произвести 7500 МВт·ч в год электроэнергии каждая. Соответственно, выровненные затраты на оплату труда в пересчёте на 1 кВт·ч составят от 3282/7500 до 5470/7500 = 0,44-0,73 руб/кВт·ч.

Операционные затраты, конечно же, не исчерпываются затратами на оплату труда, но, в случае с электростанциями на ВИЭ, составляют существенную их часть. По данным западных источников, затраты на ремонт оборудования и оплату труда составляют более 70 % операционных затрат, а для ветростанций затраты только на оплату труда персонала – примерно 36-39 % [Копылов, 2015].

Можно предполагать, что, в случае с СЭС, доля затрат на ремонт оборудования будет ниже; соответственно, доля затрат на оплату труда персонала – выше. Можно допустить, что она составит около 50 %, то есть для СЭС сумма всех операционных затрат составит 0,88-1,46 руб/кВт·ч, в среднем 1,2 руб/кВт·ч.

По данным для Куликовской ВЭС в Калининградской области – практически единственной крупной станции на ВИЭ, работавшей в Российской Федерации достаточно длительное время, средневзвешенные операционные затраты оценены в 0,46 руб/кВт·ч.

Это заметно меньше, однако это другой тип станции, затраты относятся к периоду работы станции, включавшему 1990-е и 2000-е гг. и, кроме того, остаётся вопрос о методике расчёта.

Мы можем также провести сопоставление с западными данными (см. выше). Согласно им, операционные затраты для СЭС мощностью от 5 МВт составляют 40-70 евро/кВт в год. При КИУМ станции, составляющем 17 %, годовая выработка электроэнергии на 1 кВт станции составит 8760 х 17 % = 1489 кВт·ч.

Таким образом, операционные затраты в пересчёте на 1 кВт·ч составят от 40/1489 до 70/1489 = 0,03-0,05 евро/кВт·ч.

При курсе евро 60 руб. это эквивалентно 1,8-3,0 руб/кВт·ч, что уже превышает рассчитанные нами показатели для российских СЭС.

Продолжая расчёт выровненных затрат по действующим солнечным электростанциям, складываем инвестиционные (табл. 7) и операционные затраты, и получаем суммарную величину: 2,5 + 1,2 = 3,7 руб/кВт·ч. Этот показатель сопоставим со средними мировыми данными.

Следующий аспект экономики ВИЭ касается малой автономной энергетики. Она ориентируется на низовой уровень, начиная от отдельных хозяйств (в том числе отдельных домохозяйств), включая отдельные предприятия и отдельные населённые пункты. С точки зрения затрат, минусом автономных систем по сравнению с сетевыми являются дополнительные затраты на системы аккумуляции энергии. Плюсом же является конкуренция не с оптовыми, а с более высокими розничными ценами на электроэнергию, с которыми сталкиваются отдельные, частные потребители энергии.

В случае с сетевой энергетикой для оценки эффективности работы ВЭС, СЭС или другой станции на ВИЭ мы привязываемся к оптовым ценам продажи энергии на рынке и рассматриваем ситуацию с позиций прибыли для инвестора.

В случае с автономной энергетикой мы подходим с позиций потребителя, выбирающего между покупкой энергии по розничной цене (в ряде случаев также с затратами на технологическое подключение к сети) и установкой собственной автономной системы, позволяющей ему в дальнейшем исключить или снизить затраты на приобретение энергии.

Делаем расчёт. Солнечный фотовольтаический комплекс небольшой мощности (100 Вт) в сборе, включающий солнечную панель, аккумулятор, инвертор, предлагается на рынке в системе розничной продажи по ценам около 20 тыс. руб.

(примерно 20 тыс. руб/кВт номинальной мощности). При КИУМ, равном 17 %, годовая выработка электроэнергии составит:

0,1 x 8760 x 17 % = 149 кВт·ч, то есть округлённо 150 кВт·ч.

При розничных ценах на электроэнергию на уровне 4 руб/кВт·ч, использование комплекса позволит потребителю сэкономить в год 150 x 4 = 600 руб. Таким образом, простой срок окупаемости для него составит 20 000 / 600 = 33 года. Это, с точки зрения прямого финансового эффекта, не имеет смысла для пользователя, хотя бы потому, что превосходит предполагаемый срок службы комплекса.

Выровненные затраты (в данном случае, будем считать, что они ограничены инвестиционными затратами) составят на 30-летнем интервале:

20 000 / (150 x 30) = 4,4 руб/кВт·ч.

Если заложить в модель ежегодный рост розничных тарифов на электроэнергию на 10 % (что соответствует тенденции последних лет), то простой срок окупаемости сокращается до 13-15 лет, но это также вряд ли является достаточно интересным предложением с точки зрения прямой экономии средств. Однако в данном случае имеется некоторая перспектива, тем более, с учётом вероятного продолжения снижения стоимости фотовольтаических комплексов.

В случае с установкой ветрогенератора небольшой мощности данная перспектива обозначается ещё отчётливее. Цены на комплекс на основе ветрогенерации примерно в полтора-два раза ниже: 100-150 тыс. руб/кВт номинальной мощности. При той же величине КИУМ и, соответственно, выработке электроэнергии простой срок окупаемости ветрогенератора составит, в зависимости от динамики роста цен на электроэнергию, от 20-25 до 10-12 лет. Выровненные затраты составят:

150 000 / (150 x 30) = 3,0 руб/кВт·ч.

Дополнительный и очень мощный фактор конкурентоспособности автономных станций на ВИЭ включается в случае полного отсутствия сетевого энергоснабжения. В этом случае потребитель должен платить за технологическое подключение к сети, цена которого может составить несколько сотен тысяч рублей или даже более высокую сумму. В ряде случаев сами затраты на установку автономных систем на основе ВИЭ оказываются ниже стоимости технологического подключения; тем более, если речь идёт о прокладке ЛЭП на расстояния до нескольких или даже нескольких десятков километров.

Это особенно актуально для сельских территорий, с преобладанием небольших населённых пунктов и отдельных отдалённых хозяйств, где сетевое энергоснабжение означает прокладку и последующее обслуживание протяжённых линий электропередач, при этом обслуживающих небольшое число потребителей.

Стоимость прокладки ЛЭП составляет от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов рублей на 1 км (табл. 9). Стоимость прокладки кабельных линий (КЛ) 6-10 кВ – от 700 тыс. до 2,2 млн руб/км. Кроме того, предусматриваются сопутствующие затраты: 3,3 % – временные здания и сооружения; 5,0-6,0 % – прочие работы и затраты; 2,6-3,18 % – содержание службы заказчика-застройщика, строительный контроль; 7,5-8,5 % – проектно-изыскательские работы; затраты на проведение экспертизы проектной документации и авторский надзор (при осуществлении нового строительства – 8%). Общая сумма дополнительных сопутствующих затрат – около 20 % от стоимости собственно прокладки сети. Базисные показатели стоимости

трансформаторных подстанций (ПС) от 35/10 до 220/110/10 кВ – от 20,7 млн до 390,1 млн руб. ПС 10/0,4 кВ – 100-300 тыс. руб. Иными словами, в реальной ситуации общая сумма инвестиционных затрат на сетевое энергообеспечение вряд ли может быть ниже 1 млн руб. на 1 км сетей.

Таблица 9. Базисные показатели стоимости высоковольтных линий [Укрупнённые стоимостные показатели ..., 2012]

Напряжение, кВ	Характеристика промежуточных опор	Провода сталеалюминиевые сечением, мм^2	Количество цепей на опоре, шт.	Базисные показатели стоимости (тыс. руб/км), для опор стальных ж/б	
35	свободностоящие	до 150	1/2	912/1307	658/1109
110	свободностоящие	до 150	1/2	987/ 1495	799/1081
		185-240	1/2	1100/ 1687	893/1551
220	свободностоящие	300	1/2	1231/2063	1053/-
		400	1/2	1382/2275	1175/-
	двухстоечные, свободностоящие	300	1/2	-/-	1072/ 1993
		400	1/2	-/-	1217/2181

В настоящее время 1 млн руб. – это стоимость примерно 7 кВт электроэнергетических мощностей на основе ВИЭ, если рассматривать комбинированную систему, включающую солнечные и ветроэнергетические установки, средней стоимостью из расчёта 150 тыс. руб/кВт установленной мощности.

Эти 7 кВт мощности выработают за год – при среднем КИУМ, равном 15-20% – примерно 9-12 тыс. кВт·ч электроэнергии, что сопоставимо с годовым потреблением электроэнергии тремя-четырьмя домохозяйствами, отдельной животноводческой точкой или малым сельскохозяйственным предприятием. В данном случае необходимость прокладки 1 км ЛЭП означает, что даже объём инвестиций при выборе, в качестве альтернативы, автономного энергообеспечения на ВИЭ, будет ниже. Кроме того, далее экономический эффект достигается за счёт отсутствия платы за электроэнергию.

Соответственно, при большей удалённости точки потребления прямой положительный эффект от использования автономных ВИЭ будет сильнее, а их использование окажется целесообразным не только для отдельных домохозяйств или крестьянских хозяйств, но и для целых населённых пунктов и более крупных промышленных и сельскохозяйственных объектов. Точный ответ о большей целесообразности того или иного способа энергоснабжения может быть дан уже в каждом конкретном случае после исследования местных условий.

Отметим, что в последние годы популярность автономных систем на ВИЭ в России растёт; общий объём продаж только солнечных установок составляет 6 МВт в год – в данном случае позиция потребителей сама по себе говорит об экономической целесообразности ВИЭ в определённых ситуациях и наличии в нашей стране перспективных ниш для развития возобновляемой энергетики.

Сейчас 1 млн руб. – это стоимость примерно 7 кВт электроэнергетических мощностей на основе ВИЭ, если рассматривать комбинированную систему.

Выводы

Интегральные относительные показатели экономической эффективности работы электростанции, такие, как стоимость единицы установленной мощности и произведённой электроэнергии, не отражают в достаточной степени реальные экономические характеристики станции. Для выводов и принятия решений об экономической целесообразности того или иного варианта энергообеспечения требуется анализ фактических инвестиционных и операционных затрат и их распределения во времени.

Проведенный анализ показывает, что на данный момент в большинстве случаев электростанции на основе ВИЭ остаются дорогостоящими и отличаются высокими сроками окупаемости относительно станций на ископаемых энергоносителях, что неприемлемо для потенциального частного инвестора при отсутствии достаточно мощной внешней финансовой поддержке проекта.

В то же время показатели экономической эффективности станций на ВИЭ существенно различаются – в ряде случаев на порядок, что говорит о различающихся условиях возведения и работы станций, в том числе географических и природных условий. В связи с этим ключевой задачей является выбор условий, при которых электростанции на ВИЭ были бы экономически эффективны.

В России опыт строительства и работы станций на ВИЭ пока невелик, и информации, позволяющей оценивать их экономические параметры, немного. Имеющиеся данные говорят о сопоставимости экономических параметров российских станций и средних мировых.

На основе анализа имеющейся информации мы также можем сделать вывод о наличии экономически перспективных ниш развития энергетики на ВИЭ в России. В частности, такой нишей является малая автономная возобновляемая энергетика, ориентированная на обслуживание отдалённых районов с небольшим объёмом энергопотребления и испытывающих трудности с сетевым энергоснабжением.

Литература

Администратор торговой системы (АТС) [Элект. ресурс]. Режим доступа: atse-nergo.ru/vie/proresults. (Дата обращения 25.09.2017).

Дегтярёв К.С. Географические факторы развития возобновляемой энергетики // Журнал С.О.К. 2015. №6. С. 86–95.

Дегтярёв К.С., Залиханов А.М., Соловьёв А.А., Соловьёв Д.А. К вопросу об экономике возобновляемых источников энергии // Энергия, экономика, техника, экология. 2016. №10. С.10-20.

Копылов А.Е. Экономика ВИЭ. – М.: Грифон, 2015. – 364 с.

Укрупнённые стоимостные показатели линий электропередачи и подстанций напряжением 35–1150 кВ / Сб. 324 ТМ-Т1 для электросетевых объектов ОАО «ФСК ЕЭС». Дата введения: 09.07.2012.

IRENA [Элект. ресурс]. – resourceirena. irena.org/gateway/dashboard. (Дата обращения 25.09.2017).

US EIA [Элект. ресурс]. – eia.gov/forecasts/aeo. (Дата обращения 25.09.2017).

US EIA [Элект. ресурс]. – eia.gov/forecasts/capitalcost. (Дата обращения 25.09.2017).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СТРАНАХ АФРИКИ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ И СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Л.В.НЕФЕДОВА

Исследование географических аспектов освоение ВИЭ в странах африканского континента, куда в настоящее время направляются значительный потоки международных инвестиций и идет активный трансфер технологий возобновляемой энергетики из экономически развитых стран мира, является весьма важной и актуальной темой. Данное исследование было проведено с целями оценки и формулирования факторов освоения ВИЭ в странах мира, находящихся на разных стадиях экономического и политического развития, анализа процессов, способствующих использованию ВИЭ в Африке, экономико-географических различий в данном процессе, а также анализа дифференциации стран Африки южнее Сахары (АЮС) по современному уровню и планам освоения ВИЭ.

Экономическому анализу развития стран Африки южнее Сахары посвящены работы В.Н.Шитова, Л.Н.Калиниченко, сотрудников Института Африки РАН [Шитов, 2010; Калиниченко, 2012; Бессонов и др., 2014]. Данное исследование базируется на статистических материалах международных экологических организаций, данных многосторонних банков развития, энергетических ассоциаций, на государственных планах и отчетах африканских стран, материалах международных конференций.

В XXI веке использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) стимулируется в экономически развитых странах стремлением экологически направленного развития энергетики и необходимостью обеспечения энергетической безопасности государств. В развивающихся странах освоение возобновляемых энергоресурсов является определяющим рычагом преодоления бедности и стимулом развития экономики этих государств. Безуглеродный путь развития энергетики в Африке – важный вклад в решение таких проблем человечества, как глобальное потепление, выбросы парниковых газов, уничтожение лесов. Проблема доступа к электроснабжению является одним из приоритетных условий экономического и социального развития стран Африки. Ряд международных экологических и финансовых организаций, отдельных развитых стран мира проводят программы по поддержке использования ВИЭ африканских в странах, преимущественно в беднейшем регионе континента – Субсахарской Африке. На энергетические программы странами региона была получена официальная финансовая помощь в период 1995-2005гг. в объеме около 8 млрд долл США [Шитов, 2010]. По программе UNEP оценки ресурсов ВИЭ «SWERA» на основе данных NASA, начатой в 2001г., для стран Африки были составлены открытые базы данных и карты гелиоресурсов и энергии ветра, на настоящий момент создана геоинформационная система «SWERA RREX» (http://swera.unep.net/). По Программе Содействия Управлению Энергетическим Сектором (ESMAP) Всемирного Банка (WB) ведется уточнение данных и картографирование ресурсов гелио-, ветро-, био- и малой гидроэнергетики в развивающихся странах. Программа развития ВИЭ в Африке (AFREA) проводится WB с 2009г. для финансирования проектов распределенной энергетики

[Meeting Africa's Energy Needs ..., 2012]. В беднейших странах Африки проводится программа развития энергетики сельских районов Африки (AREED) в рамках UNEP с финансированием в 250 млн долл. США. В рамках программы развития возобновляемой энергетики в странах с низким уровнем доходов (SREP WB) из климатических инвестиционных фондов (CIF) выделяются значительные объемы финансирования для пилотных стран в Африке: Кении и Эфиопии [Climate Investment Funds, 2018]. Большое значение придается международными структурами развитию геотермальной энергетики в странах, расположенных в зоне Восточно-Африканского разлома. Геотермальная программа африканской рифтовой зоны (ARGeo), созданная в 2003 г. при поддержке GEF, финансируется WB и направлена на координацию мировой поддержки изучения геотермальных ресурсов в странах зоны Восточно-Африканского разлома. В 2012 г. по Программе Содействия Управлению Энергетическим Сектором (ESMAP) Всемирного Банка начат проект «Глобального Плана развития геотермальной энергетики в странах Великого Африканского разлома» общей суммой финансирования 500 млн долл. США на 25 проектов крупномасштабного разведочного бурения более 100 скважин [Adinet Pierre, 2012]. С 2013 г. действует программа США по инициативе Барака Обамы «Энергия Африке» о создании в регионе электростанций суммарной мощностью 30 ГВт., с планируемым финансированием 7 млрд долл. США из государственных и частных инвестиций.

Факторы использования ВИЭ. Помимо фактора экономической эффективности, который подробно анализируется в работах ведущих российских специалистов по возобновляемой энергетике [Безруких и др., 2002; Николаев, 2011] и определяется соотношением соответствия пространственно-временной изменчивости потенциала конкретного ресурса ВИЭ и технических характеристик установок, стимулом для использования ВИЭ в качестве определяющих выступает ряд других факторов.

Энергетический фактор обеспечения независимости от импорта энергоносителей (страны Европы, островные государства); в масштабах одной страны – снижение завоза топлива, уменьшение потерь в сетях.

Топливный фактор – сохранение запасов органического топлива для будущих поколений (США, страны Ближнего Востока). Для стран ОПЕК, возобновляемые источники энергии – часть долгосрочной стратегии по сохранению их самого ценного ресурса, чем больше солнечной энергии будет произведено для внутренних нужд, тем больший объем нефти отправится на экспорт. ОАЭ проводят крупные инвестиции в объекты на ВИЭ и планируют довести долю ВИЭ в выработке электроэнергии к 2020г.: Абу-Даби – до 7 %, Дубаи – до 5% [Renewables ..., 2017].

Экологический фактор – уменьшение загрязнения атмосферы оксидами азота, серы, углекислого газа с выбросами ТЭС. В странах Европы уже на настоящий момент в соответствии с рекомендациями Киотского протокола 20,6% потребляемой энергии производится на объектах ВИЭ. Определяющее значение данный фактор имеет в районах критической экологической обстановки, рекреационных зон, охраняемых природных территорий.

Социальный фактор – улучшение условий жизни населения, обеспечение надежного гарантированного доступа к электроснабжению для сельских и отдаленных районов, создание новых рабочих мест. Установка PV батарей для энергообеспечения медицинских и учебных центров в беднейших странах Африки опре-

деляется только их социальной значимостью. В 2011г. ООН объявлена инициатива «Устойчивая энергия для всех», направленная на достижение к 2030г. основных целей: обеспечение всеобщего доступа к современным энергетическим услугам и увеличение доли возобновляемых источников энергии в мире до 30%. Данный фактор является определяющим для развивающихся стран Африки, Азии и Латинской Америки. Важных успехов достиг в этой области Китай, развернув широкомасштабную работу по производству и установке в сельских районах МГЭС, ВЭС и солнечных батарей, выйдя на первое место в мире по суммарной мощности ВЭС и МГЭС, обеспечив полный доступ населения к электроэнергии. Такой вид электрификации сельских районов высокоэффективен, приближая выработку электроэнергии к потребителям, позволяет избегать строительства протяженных ЛЭП и сокращать потери в сетях. Важное социальное значение имеет снижение безработицы. Развитие возобновляемой энергетики привело к созданию в мире к 2016 г. 9,8 млн новых рабочих мест [Renewables, 2017].

Коммерческий фактор определяет привлекательность объекта, компании для населения, поскольку компания производит или использует именно экологически чистый вид энергии. Данный фактор особенно важен в жилищном строительстве, гостиничном бизнесе, при трудоустройстве.

Политический фактор важен для государств, которые путем технической и финансовой помощи другим странам расширяют свое политическое влияние в данных регионах. Евросоюз и Китай активно финансируют программы по ВИЭ африканских стран. США для усиления своего присутствия на африканском континенте летом 2013 г. во время турне Барака Обамы по континенту, объявили о начале программы «Энергия Африке», указав на необходимость участия США в повышении доступности электроэнергии для жителей Субсахарского региона Африки. ОАЭ наращивают количество рычагов влияния по всему миру путем финансирования энергетических проектов в Европе, Африке и Азии. Компания Masdar (Дубаи) инвестировала создание ВЭС 6 МВт на Сейшеллах, крупный проект по освоению ВИЭ Шотландии, планирует строительство СЭС в Королевстве Тонга, которая сможет удовлетворить 13% всех энергетических потребностей тихоокеанского островного государства.

Важнейшими проблемами стран Африки, и особенно стран Африки южнее Сахары (АЮС), являются дефицит выработки электроэнергии и слабое развитие энергетической инфраструктуры, которое лишает доступа к электроэнергии жителей сельских районов. Установленная мощность электростанций в регионе составляет лишь 90 ГВт, половина из которых – в ЮАР. Электроснабжение даже в городах характеризуется частыми отключениями и перебоями, что требует установки дублирующих дизель-генераторов. Электросети находятся в ветхом состоянии и характеризуются потерями в 2-3 раза выше стандартов. К югу от Сахары в целом, только 290 млн из 915 млн чел. имеют доступ к электричеству. Усилия по развитию электрификации набирают обороты, но отстают от роста населения. По данным Программы ООН по окружающей среде (UNEP) в Африке около 600 миллионов сельского населения в Африке не имеет доступа к сетевой электроэнергии, из которых 99,6% сосредоточено в субсахарском регионе. Доступ к источникам электроэнергии в странах региона варьируется от 3% в Бурунди до 100% на Маврикии. Доступ к электроэнергии – крайне низкий, по состоянию на 2012г. – в среднем по Субсахарской Африке – 31.8%. В 30 странах рассматриваемый показа-

тель составляет от 11 до 39%, а в 10 странах – менее 10%, и их шансы обеспечить население электроэнергией в полном объеме в ближайшие два десятилетия невелики. Уровень электрификации в сельских районах Субсахарской Африки не превышает 10%, в то время как в целом в развивающихся странах эта цифра увеличилась в последние годы до 50% [Africa Energy Outlook, 2014]. Значительных успехов достигли Гана и Сенегал, проводившие последние годы успешные программы по созданию мини-сетей в сельских районах на дизель - генераторах или местных энергоресурсах (МГЭС, фотоэлектрические установки, биотопливо). В Гане доступ к электроэнергии составил к 2012г. в целом – 72%, в сельской местности – 45%, к 2020г. планируется полное подключение к электроэнергии всех сельских общин. Приближение производства электроэнергии к потребителям, уменьшение потерь в сетях, создание дублирующих мощностей для уменьшения нагрузок – эти задачи могут быть решены с помощью освоения ВИЭ. Хотя инвестиции в топливно-энергетический комплекс расширяются, по оценкам специалистов Международного энергетического Агентства два из каждых трех долларов, введенных в энергетическом секторе к югу от Сахары с 2000 г. были использованы на освоение и добычу топливных ресурсов для экспорта [Africa Energy Outlook, 2014].

Анализ ресурсов ВИЭ. Страны Африки характеризуются весьма высоким потенциалом возобновляемых энергоресурсов со значительной дифференциацией в зависимости от географического положения. Поступление солнечной радиации составляет порядка 2200-2600 кВт.ч/ $м^2$ в год, за исключением региона экваториальной Африки и стран Гвинейского залива и севернее. По экспертным оценкам на территории стран АЮС выделены отдаленные от ЛЭП районы, где использование фотоэлектрических батарей экономически более эффективно, чем дизель-генераторов на импортном топливе [Renewable energies in Africa ..., 2011]. Высокие ветроэнергетические ресурсы (среднегодовые скорости ветра более 6-8 м/с) приурочены к открытым пространствам саванн и полупустынь, прибрежным и горным районам. Геотермальные ресурсы – к зоне Восточно-Африканского разлома, имеющей протяженность около 6 тыс. км. Зона разлома проходит по территории Эритреи, Джибути, Эфиопии, Кении, Уганды, Руанды, Танзании, Замбии. Геотермальный энергетический потенциал зоны Восточно-Африканского разлома (Rift Vally) экспертным оценкам составляет 20 тыс. МВт, освоение технического потенциала данного ресурса потребует по современным ценам около 15 млрд долл. США. Наибольших успехов в геотермальной энергетике достигла Кения, заняв к 2017 г. восьмое место в мире по суммарной установленной мощности ГеоЭС. С 1999 г. в Эфиопии работает пилотная ГеоЭС Алуто Лангано, мощностью 7,3 МВт, планы страны по дальнейшему освоению данного возобновляемого энергоисточника колоссальны. Высокий коммерческий интерес к инвестициям, поставкам оборудования и проведению работ по освоению геотермальных ресурсов Восточной Африки, и в первую очередь – Кении и Эфиопии, проявляют фирмы из США, Японии, Исландии, имеющие большой опыт работ в этой отрасли. Американская компания «OrPower» выдала кредит около 310 млн долл. США на развитие проектов ГеоЭС Олкария-III в Кении.

Среди возобновляемых источников энергии наиболее значимыми для Субсахарской Африки являются гидроресурсы, на которые приходится около 12% их мирового объема, хотя в настоящее время эксплуатируются примерно 7% потенциала. Коэффициент, показывающий отношение производства электроэнергии к

техническому потенциалу гидроэнергетики, составляет всего 4,5%, в то время как средний мировой показатель – 17,2%. Гидроэнергопотенциал стран АЮС сконцентрирован преимущественно в бассейнах рек Конго, Замбези, Нил, Нигер, Лимпопо, Оранжевая, Сенегал. Вместе с тем есть области, где поверхностный сток вод почти отсутствует. Они занимают площадь более 8 тысяч кв. км. Эти районы практически лишены запасов гидроэнергии, например, Чад, Нигер, Мали. ГЭС составляют более 90% в энергобалансах следующих стран Африки южнее Сахары: ДРК, Эфиопия, Мозамбик, Намибия и Замбия. Более 70% электроэнергии вырабатывается на ГЭС в этих пяти странах, а также: в Анголе, Камеруне, Судане, Того и Зимбабве, т.е. всего в 10 странах. Наиболее крупными ГЭС в регионе являются: ГЭС Кабора Басса в Мозамбике на р. Замбези (3,6 ГВт), ГЭС Инга I в ДРК на р. Конго (1,42 ГВт), ГЭС Мероэ на р. Нил в Судане (1,25 ГВт), ГЭС Кариба на р.Замбези 1,32 ГВт Зимбабве и Замбия). В Эфиопии введены в строй ГЭС на р.Омо: Гильгель Гибе I и II, III (184 МВт, 420 МВт, 1,87 ГВт), ведется строительство на р.Голубой Нил крупнейшей в Африке ГЭС Великой Эфиопской плотины Возрождения, мощностью 5,25 МВт [Scaling - Up Renewable Energy ..., 2012].

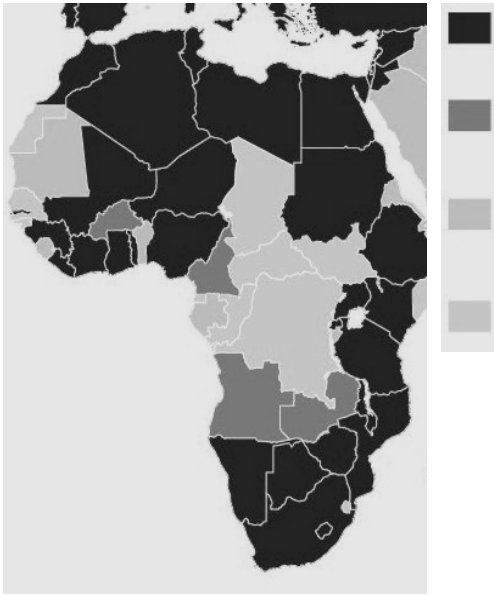


Рис. 1. Карта-схема позиций стран Африки по государственной политике поддержки ВИЭ и планам их освоения [Renewables, 2017]

Эфиопия экспортирует и планирует расширять экспорт электроэнергии после ввода в строй данных энергообъектов своим восточноафриканским соседям (Кения, Джибути, Судан, Южный Судан, Эритрея, Сомали, Танзания, Йемен). На строительство ЛЭП 400 kV для передачи электроэнергии в Судан (212 км) и в Кению (434 км) Эфиопией получены 231 млн долл. США от AfDB. Сооружение крупных гидроэнергетических узлов в странах Субсахарской Африки, с одной

стороны, представляется необходимым условием для обеспечения насущных потребностей хозяйства и населения, а с другой – может нанести непоправимый вред окружающей среде. Поэтому там, где это возможно и рентабельно, более рационально в соответствии с принципами устойчивого развития, сооружение и установка малых ГЭС, которые приближены к потребителю и снижают затраты и потери при передаче электроэнергии.

Состояние и перспективы использования ВИЭ. В связи с более высокой стоимостью и значительными первичными затратами при использовании ВИЭ, требуется поддержки государства, которая может быть выражена в льготном налогообложении, повышенных тарифах, обязательных объемах реализации и др. законодательно введенных мерах [Копылов, 2015]. Все экономически развитые страны при освоении ВИЭ применяли те или иные меры поддержки. Ряд стран Африки также уже применяют государственные меры поддержки и подготовили государственные планы освоения возобновляемых энергоисточников (рис. 1).

В планы включены как создание крупных энергообъектов с подключением их к энергосетям, так и размещение фотоэлектрических установок для обеспечения электроэнергией удаленных распределенных энергопотребителей в сельских районах, гелиоколлекторов для подогрева воды или же для применение биотоплива в транспорте (табл. 1).

В ряде случаев датой выполнения планов указан 2017 г., однако действительность показала, что далеко не все страны ставили реальные планы по освоению ВИЭ и готовы к из реализации. Наиболее крупные государственные программы по использованию возобновляемых источников энергии в Субсахарской Африке (без ЮАР, занимающей особое экономическое положение в регионе и проводящей масштабные программы освоения ВИЭ), разворачиваются последние годы в Эфиопии и Кении – двух соседних крупнейших странах Восточной Африки.

Таблица 1. Планы ряда стран Африки по освоению ВИЭ [Renewables, 2017].

	Вид ВИЭ для электрификации	Год планирования	План (мощность или доля общей выработки)
1	2	3	4
Алжир	Всего ВИЭ, в т.ч.: БиоЭС на отходах ГеоЭС PV ЭС СЭС концентр. ВЭС	2030	22 ГВт 1ГВт 15 МВт 13,5 ГВт 2 ГВт 5 ГВт
Бенин	Сельские районы	2025	50%
Джибути	PV на селе	2018	30%
Египет	ВЭС ГЭС PV системы (<500 кВт) PV системы (0,5-50 МВт) СЭС концентр	2020 2020 2020 2020 2030	7,2 ГВт (12%) 2,8 ГВт 300 МВт 2 ГВт 2,8 ГВт

1	2	3	4
Гана	ВИЭ	2020	10%
Гвинея	PV установки ВЭС	2025 2025	6% 2%
Кения	ГеоЭС ВЭС PV установки БиоЭС ГЭС	2030 2020 2018 2020 2020	2330 МВт 800 МВт 423 МВт 120 МВт 794 МВт
Лесото	Всего ВИЭ	2030	260 МВт
Ливия	PV установки СЭС концент. ВЭС	2025	844 МВт 375 МВ 1 ГВт
Марокко	ГЭС, ВЭС, СЭС	2020	по 2 ГВт
Мозамбик	ВЭС ГЭС PV установки Биогазовые уст Ветр. Насосы	2030	2 ГВт 2 ГВт 82 тыс. 1 тыс. 3 тыс.
Намибия	ВИЭ (без ГЭС>30 МВт)	2020	40 МВт
Нигерия	ВЭС PV установки МГЭС БиоЭС	2025 2025 2025 2025	40 МВт 500 МВт 2,0 ГВт 400 МВт
Руанда	МГЭС БиоЭС ГеоЭС PV установки	2018 2017 2017 2017	42 МВт 300 МВт 310 МВт 5 МВт
Судан	ВЭС ГЭС PV установки СЭС концентр. БиоЭС (биогаз+биомасса)	2031 2031 2031 2031 2031	680 МВт 63 МВт 667 МВт 50 МВт 122 МВт
Тунис	БиоЭС, СЭС, ВЭС	2030	4,6 ГВт (40%)
Уганда	МГЭС, БиоЭС, ГеоЭС Гелиоколлекторы Биогаз.уст.	2017	160 МВт 30 тыс. кв.м 100 тыс.шт.
Эритрия	ВЭС	2020	50%
Эфиопия	ВЭС ГЭС ГеоЭС БиоЭС(багасс)	2030 2030 2018 2030 2018	7000 МВт 22000 МВт 450 МВт 1000 МВт 103,5 МВт
ЮАР	Всего ВИЭ	2030 2010-2030	17,8 ГВт 42% новых ЭС

Эфиопия. По оценкам Эфиопской электроэнергетической корпорации (EEPCo), выполненным при содействии иностранных специалистов, суммарный технический потенциал ВИЭ на территории страны составляет 60000 МВт, из которых 45000 МВт – гидроэнергия, 10000 МВт – ветроэнергетические ресурсы и 5000 МВт – геотермальные ресурсы [Scaling - Up Renewable ..., 2012]. В стране уже введены в строй три крупные ветроэлектростанции (ВЭС) – Адама I (52 МВт – 2013 г.), Ашегода (120 МВт – 2013 г.) и Адама II (153 МВт – 2015 г.) при с помощью Vergnet SA (Франция), HydroChina (Китай). Начаты работы по проектам ВЭС Аселла (100 МВт) и геотермальной электростанции (ГеоЭС) Алуто Лангано II, мощностью 75 МВт. Все ВЭС являются сетевыми. В стране действует пока одна ГеоЭС Алуто Лангано I (7,3 МВт), подготовлены проекты на сооружение еще шести ГеоЭС, суммарной мощностью 450 МВт. Для проведения электрификации в сельской местности с использованием более дешевого отечественного оборудования в 2015 г. был построен завод по производству фотоэлектрических панелей мощностью 100 МВт панелей в год (Sky Energy International и эфиопская компания METEC).

Кения. К 2017 г. общая всех электростанций Кении составляла 2422 МВт, из них установленная мощность ГеоЭС – 596 МВт, около 26% общей установленной мощности ЭС, а ГЭС – 821 МВт, или 34%. Руководство страны широко привлекает к осуществлению проектов как иностранные инвестиции, так и зарубежные компании путем проведения тендеров. В Кении принят ряд мер обеспечения экономической эффективности проектов ВИЭ для привлечения иностранного капитала и технологий в возобновляемую энергетику. Государственная электрогенерирующая компания Кении (KenGen) активно привлекает как международное финансирование в рамках углеродных фондов, так и частные иностранные инвестиции. В стране при содействии иностранных компаний выявлено более 14 перспективных участков для создания ГеоЭС, суммарная мощность которых по прогнозным оценкам составляет около 10 тыс. МВт. В стране к 2014 г. ГеоЭС около 200 МВт. В 2014 г. введены строй две новые ГеоЭС: блоки 4 и 5 Олкария I и блоки 1 и 2 Олкария IV – суммарной мощностью 280 МВт. Стоимость данных двух проектов составила около 1 млрд долл. США [The Geothermal Development Company, 2014].

Строительство совместно финансировали: правительство Кении, электрогенерирующая компания страны (KenGen), Всемирный банк, Европейский инвестиционный банк, фонды развития Франции, Германии и Японии. В сооружении принимали участие специалисты Hyundai Engineering и Toyota Tshusho. Все ГеоЭС подключены к национальным энергосетям. В результате государственных программ расширения использования геотермальных ресурсов стоимость энергии с 2014 г. для потребителей снизилась более чем на 30%. По планам министерства энергетики Кении в ближайшие четыре года планируется ввести в строй еще 560 МВт ГеоЭС (4 блока по 140 МВт) [Ministry of Energy & Petroleum Kenya]. Осуществляется также разработка на разных стадиях других перспективных проектов освоения геотермальных полей: Менengай – технический потенциал (ТП) 400МВт, Силали-Богория – ТП 800 МВт, Сусва – ТП 750 МВт, Лонгонот – ТП 700 МВт [Ruth Musembi, 2014]. С 2011 г. ведется строительство мощной ВЭС «Туркана» – 300 МВт в провинции Марсабит (стоимость проекта – 873 млн долл США), ввод в строй – к концу 2017 г., первая очередь ВЭС в 90 МВт работает с 2015 г. На разной

стадии разработки находятся еще три проекта ВЭС, суммарной мощностью 250 МВт.

Среднее значение поступления солнечной радиации в Кении – около 4,5-5,5 кВт.час/м^2 в сут. Суммарная мощность солнечных фотоэлектрических установок составляет в настоящее время около 20 МВт. В стране ставятся цели по увеличению суммарной мощности таких установок до 100 МВт с годовой выработкой около 220 ГВт.час электроэнергии к 2020 г. и до 500 МВт к 2030 г. [Ministry of Energy & Petroleum Kenya]. Программы размещения фотоэлектрических установок, как и в других странах Африки к Югу от Сахары (АЮС), проводятся преимущественно в сельской местности при международной финансовой поддержке и техническом оснащении европейскими фирмами. Мощности установок составляют 10-50 кВт, для снабжения изолированных потребителей (школы, медпункты, теплицы). В 2015 г. в Кении вблизи г. Найваша открыта крупнейшая в Африке сетевая БиоЭС, мощностью 2,5 МВт, которая работает на биогазе, полученном от переработки сельскохозяйственных отходов.

На основании современного состояния использования ВИЭ и перспективных планов по их освоению была проведена типология стран Африки (табл.2).

Таблица 2. Типология стран Африки по использованию ВИЭ.

№ типа	Характерные признаки типа	Страны
1	Действующие объекты на ВИЭ. В планах – доля ВИЭ более30%	Алжир, Египет, Ливия, Эфиопия, Кения, Мозамбик, Мадагаскар, Намибия, Нигерия, Руанда, ЮАР, Танзания
2	В планах – доля ВИЭ более 30% в энергетическом комплексе	Бенин, Джибути, Эритрия, Лесото, Судан, Уганда
3	Планы электрификации сельской местности с использованием фотоэлектрических установок	Ботсвана, Буркина Фасо, Бурунди, Камерун, Гана, Гвинея, Мали, Мавритания, Зимбабве
4	В планах по ВИЭ – ведущая роль гидроэнергетики	ДРК, Кот-д-Ивуар, Экваториальная Гвинея, Габон, Малави, Нигер, Сьерра Леоне
5	Островные государства с обширыми планами использования ВИЭ	КабоВерде, Коморские о-ва, Маврикий, Сейшеллы
6	Страны без государственной поддержки ВИЭ и четких планов из использования	Ангола, ЦАР, ЧАД, Конго, Гвинея Биссау, Либерия, Сенегал, Сомали, Свазиленд, Гамбия, Того, Замбия

Устойчивое развитие региона. Подчеркивая важность состояния развития энергетики для устойчивого развития, Генеральная Ассамблея ООН объявила период 2014–2024 гг. «Декадой устойчивой энергии для всех» и призвала страны-члены объединить усилия, чтобы обеспечить всеобщий доступ к энергии. Почти в каждой африканской стране, за исключением нескольких государств, наблюдается

зависимость между использованием электричества на душу населения в год и индексом развития человеческого потенциала (ИРЧП). Недостаток доступа к энергии влияет на темпы развития страны, оказывая негативный эффект на общее состояние здоровья населения, безопасность, образование, окружающую среду. Международное сообщество обеспечивает инвестиции и трансфер технологий для новых проектов на ВИЭ путем предоставления кредитов и грантов. При международной финансовой поддержке, в том числе и углеродных фондов, введены в строй крупные проекты по сооружению ГеоЭС в Кении (суммарная мощность 596 МВт) и ВЭС (Эфиопия – 325 МВт, Кения – 300 МВт), что обеспечивает устойчивое развитие в регионе без наращивания эмиссии парниковых газов. В ряде стран Африки уже начаты и разработки крупных гелиопроектов: Джибути – СЭС 200 МВт, Танзания – СЭС 45 МВт, а также инициатива «Миллион солнечных домов», Нигерия – СЭС 50 МВт, стоимостью 100 млн долл. США, Замбия – две СЭС по 50 МВт, проекты распределенной солнечной энергетики в Бенине, Зимбабве, Танзании и других странах. Анализ опыта стран Африки южнее Сахары за последние два года показал возрастание значимости автономных решений, в том числе домашних солнечных электростанций и создания кооперативных мини-сетей, работающих от ВИЭ, преимущественно на базе фотоэлектрических установок, что обусловлено заметным мировым снижением стоимости PV-элементов. Лидером в этом процессе выступает Кения (табл. 3). Программы размещения фотоэлектрических (PV) установок проводятся в сельской местности при международной финансовой поддержке и техническом оснащении европейскими фирмами. Развивается движение кредитного приобретения фотоэлектрических систем сельскими кооперативами.

Таблица 3. Объемы продаж автономных солнечных систем в ведущих странах АЮС в 2015-2017 гг. [Renewables, 2017; Global Off-Grid Solar ..., 2018].

Страна	*2015 г.*	*2016 г.*	*2017 г. Реализовано GOGLA*
Кения	800 тыс. шт.	1200 тыс.шт.	900 тыс.шт.
Эфиопия	600 тыс. шт.	500 тыс. шт.	400 тыс.шт.
Танзания	600 тыс. шт.	400 тыс шт.	400 тыс шт.
Уганда	200 тыс шт.	400 тыс. шт.	500 тыс. шт.
Демократическая Республика Конго	10 тыс. шт.	100 тыс.шт.	300 тыс. шт.

Особенно большие перспективы для повышения доступа африканского населения к электричеству открываются при создании автономных мини-сетей в одном или нескольких поселках и общинах, повышающих надежность энергоснабжения. Основные финансовые структуры и структуры, создающие фонды, начали активное движение в сторону рынков развивающихся стран, поскольку компании (особенно производители солнечных панелей) и инвесторы входят на эти рынки за высокой прибылью, даже несмотря на высокие риски. Расширение использования внесетевых установок на ВИЭ требует разработок различных адаптированных моделей финансирования с учетом возможностей конечного пользователя. Позитивными рыночными трендами и ростом инвестиций в возобновляемую энергетику Африки отмечены 2016-2017 гг. [Renewables, 2017].

Экологические аспекты освоения ВИЭ в Африке. Большинство стран региона для преодоления дефицита электроэнергии и увеличения доступа населения к электроснабжению планируют рост в 3-5 раз установленной мощности электростанций и выработки электроэнергии к 2030 г. Например, Ангола к 2025 г. собирается увеличить объём ежегодно производимой электроэнергии с 1800 до 9000 МВт. Очевидно, что такие масштабы наращивания (в 5-10 раз) электрогенерирующих мощностей, необходимых для экономического развития региона, при использовании углеродного топлива будут иметь колоссальные экологические и климатические последствия. Необходимо отметить, что уже в последние годы увеличение выбросов CO_2 странами Африки идет крайне быстро и достигло к 2014 г. более 823 млн т в год (рис. 2). Альтернативой является расширение освоения ВИЭ именно в странах Субсахарского региона Африки.

Рис. 2. Увеличение поступления углекислого газа (млн т) в атмосферу из стран АЮС в период 1960-2014 гг. (по Carbon Dioxide Information Analysis Center).

На IV Ассамблее, созванной Международным агентством по возобновляемой энергии (IRENA) в Абу-Даби в январе 2014 г., министры энергетики из 19-ти африканских стран приняли решение по созданию в Африке «Коридора чистой энергии» стран Восточного и Южного энергетических бассейнов африканского континента, что будет стимулировать развертывание деятельности по использованию возобновляемых источников энергии и поможет удовлетворить растущий спрос на энергию в странах восточной Африки южнее Сахары, снизить использование биомассы для приготовления пищи и соответственно – сведение лесов. Данная инициатива ориентирована на расширение международной финансовой и технической поддержки процесса освоения ВИЭ, а также трансфера технологий, что особенно важно для экономического развития стран региона [IRENA & LBNL, 2015]. На особый уровень выйдет решение проблем бестопливного развития энергетики в Африке после принятия Парижского соглашения в декабре 2015 г. о выделении мировым сообществом фонда в 100 млрд долл. США на освоение ВИЭ в развивающихся странах и ежегодном распределении этих средств с 2020 г. В результате Соглашений в Париже была образована Африканская Инициатива по во-

зобновляемой энергетике (AREI), которая и будет координировать процесс освоения ВИЭ на континенте, как одну из основных проблем современности, вследствие особой уязвимости региона к последствиям изменения климата

Выводы. Страны Африки, в том числе расположенные южнее Сахары, имеют очень высокий потенциал ресурсов ВИЭ. Основным фактором для его освоения является дефицит электроэнергии и крайне низкий доступ населения к электричеству, освоение данных ресурсов необходимо для устойчивого социально-экономического развития региона. По сценарию ускоренного прогресса ПРООН наибольший прогнозируемый рост Индекса человеческого развития в мире к 2050 г. произойдет в Африке к югу от Сахары [Доклад о человеческом развитии, 2013]. Растут потребности в электроэнергии и в промышленности развивающихся стран в весьма крупных масштабах. Строительство новых крупных угольных ТЭС в требуемых объемах приведет к серьезным экологическим и климатическим последствиям. Процесс освоения ВИЭ в регионе возможен только при поддержке международных экологических и финансовых структур, которые уже ведут активные действия в данном направлении. Ряд стран региона ввели государственные меры поддержки выработки электроэнергии на ВИЭ и составили планы их использования. Две страны региона имеют значимые результаты по освоению ВИЭ: Кения – лидер геотермальной энергетики на Африканском континенте и Эфиопия – лидер Субсахарской Африки по ветроэнергетике. В настоящее время все более широко признаётся значимость автономных решений электрификации, в том числе домашних солнечных электростанций и кооперативных мини-сетей в Африке, работающих от возобновляемых источников энергии, преимущественно на базе фотоэлектрических установок. При международной финансовой поддержке, в том числе и углеродных фондов, разрабатываются крупные проекты по сооружению солнечных электростанций, ГеоЭС и ВЭС в странах Африки, что обеспечивает устойчивое развитие в регионе без наращивания эмиссии парниковых газов.

Литература

Безруких П.П., Арбузов Ю.Д., Виссарионов В.В. и др. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.

Бессонов С.А., Брагина Е.А., Дейч Т.Л. и др. Африка: пути модернизации экономики (отв.ред. Е.В. Морозенская) / – Институт Африки РАН Москва, 2014. – С. 274.

Доклад о человеческом развитии 2013. Возвышение Юга: человеческий прогресс в многообразном мире // Программа развития Организации Объединенных Наций (ПРООН) / United Nations Development Programme. – New York, USA, 2013. – 216 pp.

Калиниченко Л.Н. Настоящее и будущее африканской энергетики// Азия и Африка сегодня. 2012. №12. С.6-12.

Копылов А.Е. Экономика ВИЭ. М.: Грифон, 2015. – 364с.

Николаев В.Г. Ресурсное и технико-экономическое обоснование широкомасштабного развития и использования ветроэнергетики в России. М.:АТМОГРАФ, 2011. – 502 с.

Шитов В.Н. Факторы и тенденции развития Африки южнее Сахары. М.: МГИМО (У) МИД России, 2010. – 148 с.
Adinet Pierre. Global Geothermal Development Plan // ESMAP – World Bank Knowledge Exchange Forum with Bilateral Agencies AFD, Nov.27-28. – Paris, 2012, pp.19.
Africa Energy Outlook. A focus on energy prospects in Sub-Saharan Africa World Energy Outlook Special Report / International Energy Agency. – Paris, France, 2014. – 242 pp.
Carbon Dioxide Information Analysis Center, Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, United States. CO_2 emissions (kt) – http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT
Climate Investment Funds /The Program on Scaling-Up Renewable Energy in-low Income Countries (SREP) – http://www.climateinvestmentfunds.org/cif/srep.
Global Off-Grid Solar Market Report / Global Off-Grid Lighting Association. – The Netherlands, 2018. – 60 pp.
IRENA & LBNL, 2015. Renewable energy zones for the Africa clean energy corridor/ The International Renewable Energy Agency and Lawrence Berkeley National Laboratory, October 2015, 96 pp.
Meeting Africa's Energy Needs and Widening Access to Sustainable Energy in Sub-Saharan Africa / AFREA, The World Bank, 2012. – www.worldbank.org/afr/energy.
Ministry of Energy & Petroleum Kenya. Официальный сайт Мин-ва энергетики и топлива Кении – http://www.energy.go.ke/
Renewable energies in Africa- current knowledge. Scientific and technical Report // The European Commission Joint Research Center, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. – 60 pp.
Renewables 2017. Global Status Report / REN21 Secretariat. – Paris, France, 2017. – 305 pp.
Ruth Musembi. GDC's geothermal development strategy for Kenya: Progress & Opportunities // POWER AFRICA-Africa Union Commission geothermal roadshow. September-October 2014.
Scaling - Up Renewable Energy Program / Ethiopia Investment Plan (Draft Final), Federal Democratic Republic of Ethiopia, Ministry of Water and Energy / January 2012. – 81 pp.
The Geothermal Development Company (GDC). Официальный сайт геотермальной компании Кении – http://www.gdc.co.ke/
The SWERA Renewable energy Resource EXplorer (RREX). – http://swera.unep.net/

РАЗДЕЛ 4

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ

ПРОИЗВОДСТВО БИОТОПЛИВА ИЗ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

Н.И. ЧЕРНОВА, С.В. КИСЕЛЕВА

Среди возобновляемых источников энергии биомасса всегда находила наиболее широкое применение. В последние десятилетия наблюдается значительный и устойчивый рост масштабов применения биомассы в энергетике, расширение спектра способов её преобразования. Поэтому актуальной задачей стал поиск новых видов биомассы, новых технологий её переработки и – особенно – технологий комплексного использования. Из интересных и перспективных направлений назовём биотехнологии энергетического применения микроводорослей.

Традиционно водоросли относят к растениям. Микроводоросли (МКВ) – это микроскопические фотосинтезирующие организмы, обитающие как в морских и пресноводных, так и почвенных экосистемах. Размеры МКВ колеблются от 1 мкм (некоторые диатомеи), до сотен мкм. Водоросли, как группа организмов различного происхождения, объединены следующими признаками: наличие хлорофилла и фотоавтотрофного питания, обитание в водной среде или во влажных условиях (в почве, сырых местах и т п.). С точки зрения систематики, к водорослям относят различное число (в зависимости от классификации) отделов эукариот, многие из которых не связаны общим происхождением. Кроме того, к водорослям по-прежнему причисляют сине-зелёные водоросли или цианобактерии, являющиеся прокариотами.

Интерес к выращиванию МКВ и их использованию имеет давнюю историю. Некоторые области их применения, способы культивирования, возможности сокращения энергозатрат при выращивании были рассмотрены нами в предыдущих работах [Raslavičius, Semenov, Chernova, Keršys, Kopeyka, 2013; Chernova, Kiseleva, Popel', 2014]. На слуху в то время была в основном сине-зеленая водоросль спирулина/артроспира: к 2010 г. мировое производство составляло уже более 10000 т в год. Спирулина по-прежнему удерживает первенство, однако помимо неё и хлореллы список перспективных микроводорослей пополнили *Dunaliella salina, Aphanizomenon flos-aquae, Haematococcus pluvialis, Crypthecodinium cohnii, Shizochytrium* др., нашедшие применение в пищевом и кормовом производстве, косметике, фармацевтике [Brennan, Owende, 2010]. В России имеются лишь единичные примеры полупромышленного культивирования МКВ и цианобактерий для производства биологически активных добавок к пище и кормам.

Возникновение интереса к микроводорослям как сырью *для производства топлива* связано с энергетическим кризисом 1970-х гг., хотя еще в 1950-е гг. была показана принципиальная возможность выращивания МКВ в массовой культуре в производственных масштабах. Крупные промышленные установки были созданы в Германии, Японии, Чехословакии, СССР, Польше, Болгарии, Франции, Мексике и ряде других стран [Пиневич, Верзилин, Михайлов, 1970]. Несмотря на высокую научную результативность исследований, в 80-е – начале 90-х гг. стало очевидно, что применение биомассы МКВ для энергетических целей является малоэффек-

тивным в силу дороговизны по сравнению с ископаемыми видами топлива. Поэтому в тот период, как сказано выше, в области водорослевых технологий безусловное лидерство получили исследования, связанные с неэнергетическими приложениями.

Таблица 1. Продуктивность некоторых перспективных видов водорослей (показаны значения продуктивности, полученные в конкретных условиях эксперимента)

Виды водорослей	*Scenedesmus dimorphus*	*Prymnesium parvum*	*Euglena gracilis*	*Chlorella vulgaris*	*Dunaliella salina*	*Haematococcus pluvialis*	*Tetraselmis suecica*	*Isochrisis galbana*	*Nannochloropsis sp.*	*Stichococcus sp.*	*Botryococcus braunii*
Содержание липидов	16… 40%	22… 38%	14… 20%	14... 22%	16… 44%	25… 45%	20… 30%	22… 38%,	33… 38%	40… 59%	до 80%

Однако ситуация изменилась в конце 1990-х гг. в связи с востребованностью жидких моторных биотоплив, развитием биотехнологий, поисками новых сырьевых ресурсов для биоэнергетики и т.д. В настоящее время можно говорить об очередной серьёзной смене приоритетов в использовании водорослей: в последние два десятилетия значительно вырос объём научных исследований и количество осуществляемых проектов в области *водорослевой биоэнергетики*. Биоэнергетический потенциал водорослей привлекает огромное внимание производителей биотоплива, инвестирующих значительные средства в исследовательские программы. И это не случайно: биомасса МКВ имеет ряд привлекательных свойств и удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к растительному энергетическому сырью:

- изъятие культивируемой биомассы МКВ для нужд энергетики не нарушает естественную консервацию органического вещества в биосфере; при этом плантации МКВ служат эффективным краткосрочным стоком антропогенного CO_2, конвертируя его в энергию высокой плотности;
- водоросли являются фотоавтотрофами: для их роста и развития нужен солнечный свет, CO_2 и вода с небольшим количеством минеральных солей;
- продуктивность МКВ по биомассе и маслу на порядки превышает продуктивность наземных, в том числе масличных растений (табл. 1 и 2);
- для выращивания водорослей не нужны пахотные земли, плантации можно размещать на поверхности водоёмов или на непригодных для земледелия почвах (засолённых, пустынных и др.), причём площадь выращивания МКВ значительно меньше – по сравнению, например, с канолой (рапсом) в 20–100 раз (табл. 1);
- водоросли требуют намного меньше воды, чем традиционные зерновые культуры, их можно выращивать и в солёной воде, и на сточных водах, ослабляя давление на ресурсы чистой воды;

Таблица 2. Сравнение рапса и микроводоросли Haematococcus pluvialis как энергоисточников [Huntley, Redalje, 2007; Чернова и др., 2008]

Культура	Продуктивность биомассы, т/га/год	Энергосодержание общее, ГДж/га/год	Продуктивность по маслу, т/га/год	Энергосодержание по маслу, ГДж/га/год	Площадь, необходимая для производства $300 \cdot 10^{18}$ Дж/год энергии, Гга*
Рапс (Германия, семена)	3,1	75,6	1,2	44,7	6,7
Рапс (Финляндия, семена)	1,6	39,0	0,65	24,2	12,4
Озимый рапс (Россия, семена)	1.0-2,5	24.0-61,0	0.3- 0,75	11.1-28,0	10,7-20,7
Haematococcus pluvialis (в среднем)	38,2	763	13,8	422	0,71
Haematococcus pluvialis (максимально)	91,8	1836	33,2	1014	0,3

* $300 \cdot 10^{18}$ Дж/год энергии - прогнозы потребления моторных топлив в 2020 г.

По современным оценкам общая площадь земель в мире, потенциально пригодных для выращивания сельскохозяйственных культур составляет около 2, 6 Гга, к 2050 г. около половины из них будет использоваться для пищевых целей. Оставшиеся 1,3 Гга могут быть заняты энергетическими культурами. Как видно из таблицы, для производства требуемого количества моторного топлива из рапса потребуется примерно в 5-9 раз больше пахотных земель, тогда как для топлива из биомассы МКВ – 0,3-0,7 Гга в зависимости от продуктивности культуры.

- один из возможных путей сокращения стоимости биотоплива из МКВ – одновременное получение из них ценных сопутствующих продуктов для химической, фармацевтической, медицинской, пищевой и кормовой промышленности (бета-каротин, астаксантин, фикоцианин, хлорофилл, глицерин и т.д.), а также использование при их культивировании отходов других производств;
- при существующих в мире технологиях становится возможным крупномасштабное выращивание биомассы МКВ круглогодично не только в условиях тропического и субтропического климата, но и в умеренных климатических условиях, даже при отрицательных зимних температурах;
- МКВ не являются традиционным пищевым и кормовым сырьем;
- биоразнообразие МКВ (известно более 40 000 видов, из которых лишь несколько процентов находится в коллекциях живых культур, и только у нескольких сотен штаммов определён биохимический состав, продукционные и иные характеристики) даёт практически неисчерпаемый источник для

селекционной работы, генных исследований и обеспечивает возможность получения высокоэнергетических культур.

В связи с последним обстоятельством следует заметить, что МКВ в полной мере способствуют преодолению обозначившегося в 2005–2008 гг. конфликта в природопользовании, связанного с широким использованием зерновых и масличных культур для производства биоэтанола и биодизеля (так называемое биотопливо первого поколения). Это вызвало не только негативное отношение к биоэнергетике как к масштабному потребителю пищевых ресурсов [Chernova, Kiseleva, Popel', 2014], но и послужило стимулом к разработке технологий получения биотоплива из непищевого сырья и отходов (биотопливо второго поколения), представленных, прежде всего целлюлозой. Кроме того ЕС принял поправки в нормативы на биотоплива, увеличив обязательную его долю из непищевого сырья. В терминологическом плане это привело к выделению *биотоплива третьего поколения* (топливо, производимое из специально выращиваемых для энергетических целей водорослей) и *биотоплива четвертого поколений* (из генетически модифицированных водорослей – продуцентов углеводородов, конвертирующих CO_2 непосредственно в топливо).

Поиски новых видов сырья для биоэнергетики – в том числе высокоэнергетических видов МКВ – будут актуальными и в дальнейшем, поскольку доля моторных топлив в структуре мирового топливно-энергетического баланса остаётся стабильно высокой.

Технологии преобразования водорослей в энергоносители. С водорослями, прежде всего, связывают производство биодизеля переэтерификацией содержащихся в них триацилглицеридов (ТАГ) жирных карбоновых кислот. Реакция переэтерификации идёт между низкомолекулярными спиртами (метанол, этанол) и жирными кислотами в присутствии щелочных или кислотных катализаторов. В результате образуется биодизель, который по своему химическому составу не имеет ничего общего с дизелем из нефти, однако по физико-химическим характеристикам близок (или даже превосходит) дизельное топливо ГОСТ 305-81 Л/3. Основной объём мирового производства биодизеля получают из растительных масел. Кислотный состав МКВ близок к растительным маслам традиционных масличных культур и определяется условиями их выращивания. Так, например, в состав водорослей *Desmodesmus sp*. из беломорского гидроида входят в основном мононенасыщенные олеиновая (C18:1, 50–60%), пальмитолеиновая (C16:1, 0–15%) и насыщенная пальмитиновая (C16:0, 25–30%) кислоты; полиненасыщенные линолевая (C18:2) и линоленовая (C18:3) кислоты входят в незначительных (менее 10%) количествах [Соловченко, Чивкунова, Семенова, 2013].

Разработка новых подходов к переработке исходного водорослевого сырья позволяет ныне из одной и той же биомассы получать различные виды топлива. При определенных условиях культивирования МКВ (как селекционные, так и генно-модифицированные штаммы) способны синтезировать биоэтанол и водород [Deng, Coleman, 1999]. Ряд МКВ синтезируют в процессе роста углеводороды. Так, зелёные одноклеточные колониальные водоросли *Botryococcus braunii* обладают замечательной способностью образовывать и аккумулировать жидкие углеводороды (до 86% от веса сухой биомассы). Углеводороды, экстрагируемые из биомассы *B.braunii*, можно рассматривать как источник транспортного топлива после гидрокрекинга. Например, продукт перегонки, полученный из водорослевой массы

B.braunii из Darwin River Reservoir (Австралия) содержал следующие фракции: бензин 67%, авиационное топливо 15%, дизельное топливо 15%, смазочное масло 3% [Hillen et al., 1982]. К синтезированным водорослями ТАГ, а также к биодизелю, полученному путём переэтерификации, применяют так называемый процесс гидротермального сжижения HTL (hydrotermal liquefaction) [Zhu, Albrecht, Elliott et al., 2013]. Затем гидрогенизацией и деоксигенацией (осуществляется в нефтехимии декарбоксилированием, декарбонилированием или гидрогенолизом) получают возобновляемый дизель. Дополнительная операция гидрокрекинга, которой подвергается уже полученное топливо, позволяет повысить выход целевого продукта – биодизеля, содержащего углеводороды с короткими углеводородными цепочками (не более 10 атомов углерода) [Trusov, Gordienko, Prokudina, 2013]. Масштабный показательный проект получения топлива из МКВ для военно-морского флота и авиации осуществила с использованием данной технологической схемы компания Solazyme (Сан-Франциско, США) в 2008–2010гг. [Доступно: http://solazyme.com/fuels.]. Водоросли с высоким содержанием крахмала и углеводов путем аэробной или анаэробной ферментации можно переработать в биоэтанол, биобутанол и водород. Кроме того, этанол из водорослей можно получать одновременно с биодизельным топливом: после извлечения масла оставшаяся часть биомассы зачастую содержит достаточное количество крахмала и других углеводов.

Таким образом, в настоящее время можно говорить о существовании спектра технологий получения битоплива третьего поколения из *продуктов биосинтеза микроводорослей*: биосинтез этанола и водорода; углеводов (с последующим спиртовым или ацетоно-бутиловым сбраживанием до биоэтанола и биобутанола), углеводородов (с последующим гидрокрекингом до керосина, бензина, дизеля, мазута и др.), ТАГов (с получением переэтерификацией биодизеля, гидрогенизацией и деоксигенацией – возобновляемого (зеленого) дизеля и дополнительно гидрокрекингом – биокеросина). В настоящее время большое внимание уделяется получению из липидосодержащей биомассы *возобновляемого дизеля* (renewable diesel, green diesel) – топлива, близкого по составу к традиционному дизельному топливу из нефти [Raslavičius et al., 2014]. При этом отходы переработки биомассы также могут служить сырьём для производства биотоплива (метана, водорода, бионефти, жидких биотоплив) (рис. 1).

Проблема переработки МКВ в биотопливо связана, в первую очередь, с их высокой влажностью (80–90 % по массе). Для переработки влажной биомассы в биотопливо наилучшим образом подходят так называемые гидротермальные технологии (вообще под «гидротермальным процессом» понимается любой процесс, который осуществляется в присутствии воды или водяного пара при температуре выше 100°C [Vlaskin et al., 2016; Vlaskin et al., 2017; Chernova et al., 2017]. В случае с МКВ наибольший интерес представляет технология HTL с получением в качестве основного продукта – сырой бионефти [Vlaskin et al., 2017; Chernova et al., 2017]. Одним из основных преимуществ технологии HTL является отсутствие стадии предварительной сушки исходного сырья. МКВ могут подаваться в реактор во влажном состоянии, например, в виде водной суспензии. Еще одним преимуществом является то, что в процессе гидротермального сжижения вклад в выход бионефти вносят не только липиды, но также углеводы и белки, что повышает суммарный выход продукта [Elliott, 2016].

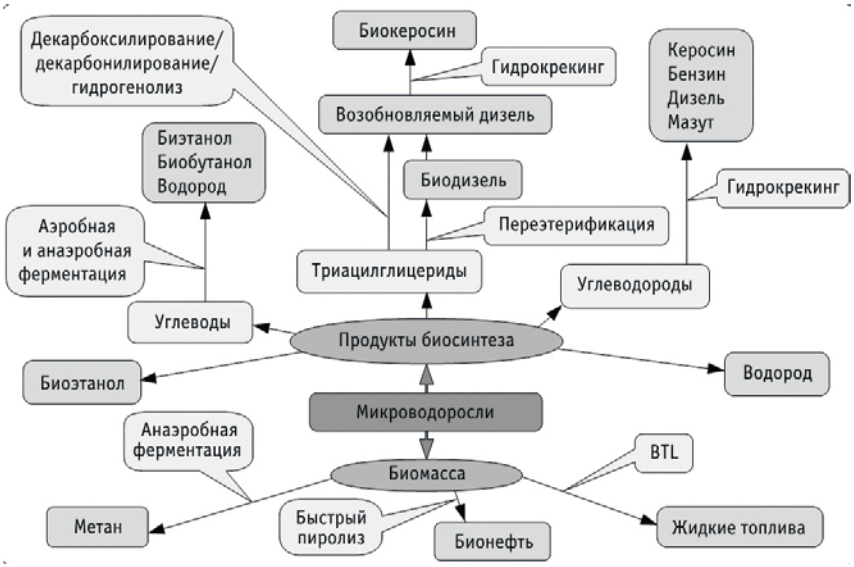


Рис. 1. Современные технологии переработки микроводорослей в энергетические продукты

Несмотря на то, что по ряду физических свойств бионефть, получаемая в результате HTL МКВ, схожа с традиционной нефтью, химический (элементный) состав продукта гидротермальной обработки сильно отличается. Одним из основных отличий бионефти является большое содержание азота и кислорода. Увеличение температуры процесса приводит к уменьшению количества кислорода и увеличению количества азота [Valdez et al., 2012; Jena et al., 2011], что связывают с более полной конверсией белковой составляющей МКВ. В работе [Sudasinghe, 2014] было показано, что в состав бионефти, полученной в результате HTL *Nannochloropsis salina* при температуре 350 °C, входит большое количество гетероатомных азотсодержащих соединений, наиболее распространенными среди которых являются пирролы, пиридины, пиразины, имидазолы и их производные, являющиеся продуктами разложения белков.

Изучение химического состава бионефти представляет большой интерес с точки зрения выбора оптимального пути ее переработки и оптимизации самого процесса гидротермального сжижения. Например, в работе [Jazrawi et al., 2015] был предложен двухстадийный процесс гидротермального сжижения микроводорослей *Chlorella.* На первой стадии при температуре не выше 200 °C удаляется водный раствор азотсодержащих соединений. Оставшаяся биомасса превращается в бионефть на второй стадии при температуре 250-350 °C. За счет этого содержание азота было снижено с 7,5 до 3,4 %, однако при этом выход бионефти уменьшился с 24,7 % (для одностадийного процесса с максимальной температурой 300 °C) до 12.7 %.

Итак, если в 1995 г. основной технологией крупномасштабного производства биодизельного топлива была переэтерификация ТАГов, то в середине 2000-х гг.

начали развиваться технологии гидрооблагораживания (восстановление ненасыщенного соединения с присоединением атомов водорода по кратной связи) липидов и получаемого биодизеля до возобновляемого дизеля. Прогнозы дальнейшего развития показывают, что к 2015–2020 гг. лидирующими могут стать технологии гидротермического сжижения липидов и биодизеля (HTL), а также преобразование биомассы газификацией с последующим процессом Фишера-Тропша (табл. 3).

Таблица 3. Прогноз развития технологий получения биодизельного топлива из водорослей

Этапы развития технологии	Процесс	Продукт	
		Название (коммерческий продукт)	Химическое соединение
~ 1995 …	Переэтерификация	Биодизель (FAME - Fatty acid methyl esters)	Эфир
~ 2007 …	Гидрооблагораживание	Возобновляемый дизель (HVO RD – Hydrotreated Vegetable Oil Renewable Diesel)	C_nH_{2n+2}
~2015-2020…	Гидротермическое сжижение; Газификация + Фишер-Тропш	Возобновляемый дизель (HTL bio-oil; FT-BTL)	C_nH_{2n+2}

Проблемы получения биомассы микроводорослей. Использование МКВ для производства энергоносителей ставит задачу не только крупномасштабного культивирования, но и культивирования биомассы с заданными свойствами, например, с высоким содержанием липидов, углеводов, углеводородов и т.д. Однако внедрение перспективных штаммов-продуцентов липидов в производство биотоплив осложняется следующим известным обстоятельством: одновременное достижение высокой продуктивности по биомассе и по липидам при культивировании МКВ невозможно. Интенсивный рост биомассы МКВ идёт в оптимальных для них условиях, а индукция биосинтеза и аккумулирования липидов может быть достигнута путем создания физиологического стресса (например, лимитирование или голодание по азоту и/или фосфору; максимальные или минимальные значения интенсивности светового потока, pH, температуры; облучение ультрафиолетом; воздействие тяжелых металлов и других химических веществ; осмотический стресс и др.). Поэтому одним из возможных путей максимального накопления биомассы МКВ с оптимальным содержанием липидов является проведение культивирования в две стадии [Chernova, Korobkova, Kiseleva, 2010]. Первая стадия включает в себя максимальное получение биомассы в оптимальных условиях роста. На второй стадии культивирования полученная биомасса МКВ переводится в стрессовые условия для индукции синтеза и аккумулирования липидов. Но для водорослевой индустрии нужны промышленные культуры МКВ, которые должны быстро расти, синтезировать и аккумулировать значительные количества липидов в виде ТАГ и жидких углеводородов.

а б

Рис. 2. а – обрастание камня микроводорослями; б – циано-бактериальные маты на поверхности термальных Малкинских источников (Камчатка)

\

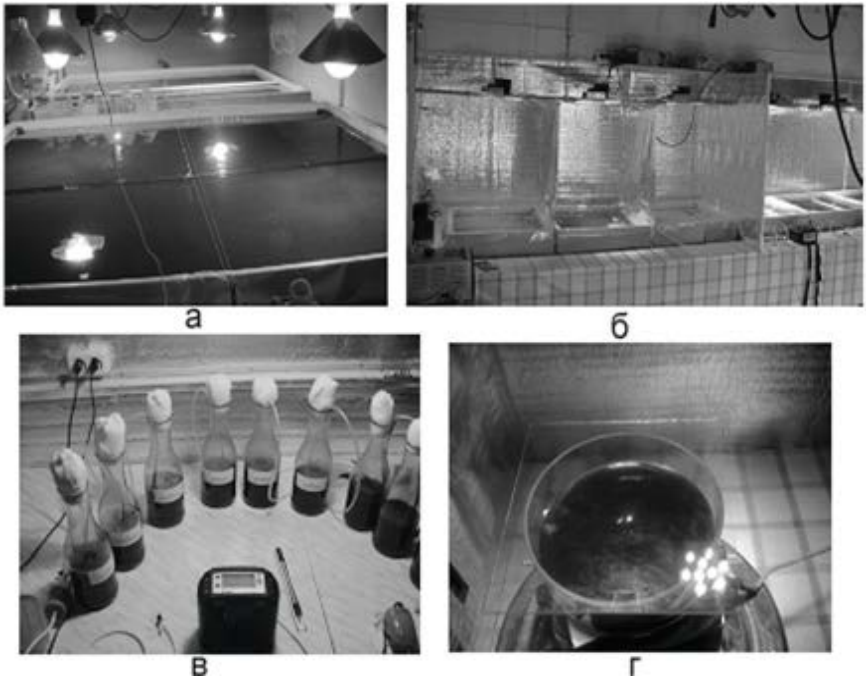


Рис. 3. а – открытые плоскостные культиваторы НИЛВИЭ; б – культиваторы со светодиодной системой освещения; в – закрытые ФБР с подачей углекислого газа; г – культивирование микроводорослей в стрессовых по освещенности условиях.

К настоящему времени созданы коллекции микроорганизмов, в том числе микроскопических водорослей, в разных странах мира. Одна из крупнейших коллекций, коллекция UTEX, принадлежащая Техасскому университету (Остин, США), насчитывает более 3000 штаммов, а коллекция CCMP, собранная в Лаборатории океанологии имени Бигелоу (West Boothbay Harbor, штат Мэн, США), содержит около 2600 штаммов МКВ и цианобактерий. а одна из самых крупных коллекций водорослей и простейших микроорганизмов CCAP, находящаяся в Шотландском институте моря (Обан, Шотландия), включает в себя более 2500 штаммов, в том числе микроводорослей и цианобактерий. Интересным примером коллекции МКВ, использующихся в качестве потенциальных источников липидов, выделенных из пресных и солёных водоёмов, является коллекция SERI/NREL (Solar Energy Research Institute/National Renewable Energy Laboratory, US). По некоторым данным, напротив, после завершения в 1996 г. 18-летней программы ASP в связи с неконкурентоспособностью полученного водорослевого биотоплива, тысячи исследованных штаммов коллекции были потеряны [Биелло, 2011]. Наиболее крупная российская коллекция МКВ, собранная в ИФР им. К.А. Тимирязева РАН, насчитывает около 300 штаммов МКВ и цианобактерий. Однако российские коллекции не ориентированы на штаммы, перспективные для целей энергетики, и – тем более – для производства жидких биотоплив. Таким образом, создание коллекций промышленных штаммов энергетического назначения, в том числе толерантных к выращиванию при низких температурах, а также разработка эффективных систем их культивирования являются, безусловно, актуальными. Перечень регионов наших экспедиционных работ достаточно широк: от Валдая, Карелии до Камчатки, где проводился поиск и выделение из природных источников штаммов МКВ в первую очередь – продуцентов липидов. Привлекательность Карелии определяется хорошо развитой гидрографической сетью, относящейся к бассейнам Белого (57%) и Балтийского морей (43%). Существенным аргументом при выборе района явилось видовое разнообразие диатомовых и зеленых водорослей, поскольку оба типа превалируют в списке продуцентов липидов. Камчатка, характеризующаяся исключительными природными факторами (экстремальные климатические условия; выходы термальных источников; вулканическая деятельность, изолированность от материка, определяющая возможность существования эндемичных видов и т.д.), – также весьма продуктивный регион для такого рода исследований (рис. 2).

Во всех отобранных пробах с использованием цитохимических методов окрашивания липидов в клетках суданновыми красителями (Судан черный Б, Судан III) была выделена серия кандидатных липидосодержащих штаммов МКВ, идентифицированных нами до рода или вида. Для количественного определения липидов в отобранных штаммах МКВ необходимо вырастить некоторое количество биомассы нужного качества. Оптимальный способ выращивания, как уже отмечалось выше, двухстадийное культивирование в фотобиореакторе (ФБР). ФБР закрытого типа позволяют стабильно выращивать те водоросли, которые не могут расти в открытых культиваторах, обеспечивая непрерывную поставку высококачественной биомассы. Перемещение выращенной биомассы в открытые культиваторы с большой степенью инсоляции и в питательную среду, лимитированную по азоту, позволяет создать так называемый физиологический стресс для МКВ, при котором почти прекращается их рост и в клетках аккумулируются липиды. Для работ по культивированию микроводорослей-продуцентов целевых продуктов в НИЛ ВИЭ

географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова был разработан и смонтирован такой экспериментальный модуль фотобиореактора со светодиодной системой освещения и контролируемой подачей углекислого газа (рис. 3).

Выращиваемые культуры оценивались по скорости роста и содержанию ТАГ на 1-й и 2-й стадиях выращивания. Содержание ТАГ в полученной биомассе определяли на спектрофлуориметре (окраску биомассы проводили селективным на нейтральные липиды флуоресцентным красителем Нильским красным). Анализ содержания ТАГ в биомассе показал, что из 15 выделенных кандидатных штаммов положительную реакцию на стресс обнаружили 8 штаммов: *Chlorococcum sp. rsemsu* Ccc-7/11 (с 25,2 до 35,2%); *Chlorella vulgaris rsemsu* Chv-20/11 (с 21,0 до 33,0%); *Haematococcus pluvialis rsemsu Hp-1/11* (с 4,0 до 16,8%) и др., *Arthrospira platensis rsemsu1/02-T* (с 36,1 до 47,1% ТАГ) и *Chlamydomonas sp. rsemsu Chlam-15/*11 (с 58,3 до 68,1% ТАГ). Причем последние две культуры могут быть кандидатами для получения биодизеля вследствие очень высокого содержания ТАГ в них. У двух штаммов содержание ТАГ не изменилось, а у пяти – снизилось (например, у *Chlorococcum schwarzii rsemsu Chcc-14/11-ПК* с 43,2 до 34,0%; *Chlorella sp. rsemsu Chl-1/11-B* с 31,1 до 22,5%). Таким образом, реакция на созданный стресс является видо- и штаммоспецифичной, и параметры стресса требуют подбора для разных культур. Выделенные культуры из природных источников были включены в коллекцию МКВ энергетического назначения НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ (рис. 4).

Конечно, важно понимать, насколько востребованными в настоящее время могут быть результаты такого рода исследования – в целом и для России в частности. Здесь важно отметить, что рентабельного процесса производства топлива из МКВ достигнуть не удалось ни в одном из проектов. Экономические оценки производства водорослевого биодизеля, выполненные исследователями Британской Колумбии тоже дают достаточно пессимистичные результаты [Alabi, Tampier, Bibeau, 2009]. Они были сделаны как для открытых культиваторов, так и для закрытых ФБР. Рассматривалась круглогодичная и сезонная (с апреля по сентябрь) эксплуатация культиваторов (во втором случае двукратно снижались капитальные затраты и отсутствовала необходимость подогрева воды). Продуктивность по биомассе варьировалась в диапазоне от 10 до 25 г/м^2/год с содержанием липидов в диапазоне от 15 (культиваторы) до 25–35% (биореакторы). Было показано, что даже при самых высоких показателях продуктивности микроводорослей и содержания в них липидов ни один из методов их культивирования не привёл к паритетным по сравнению с ископаемым сырьём и топливом из наземных масличных растений (канола) затратам для сходных климатических условий. В итоге себестоимость 1 л водорослевого масла для открытых культиваторов оценивалась примерно в 2.5 долл./л, а для фотобиореакторов – около 7 долл./л. Улучшение экономических показателей производства биотоплива из водорослей может быть достигнуто в случае одновременного производства энергоносителей и особо ценных сопутствующих продуктов, перечень которых постоянно растёт, например, астаксантина, фикоцианина и фикоэритрина, β-каротина, хлорофилла, арахидоновой кислоты и смеси полиненасыщенных жирных кислот; пищевых и кормовых добавок, в том числе корма для дорогостоящих аквариумных рыб; функциональных продуктов, натуральных пищевых красителей, биополимеров, биопластика и т.д. Этот рынок продуктов из микроводорослей и цианобактерий уже в середине 2000-х гг. дости-

гал около 7 млрд долл. Для России рентабельным энергетическим продуктом из МКВ могут стать биодобавки к бензину, которые позволят получить моторное топливо, соответствующее требованиям стандартов Евро 4, 5 и выше. Согласно некоторым оценкам, потребление бензина в России в 2018 г. может достигнуть 40 млн т/год, при этом дефицит составит около 6 млн т [Третьяков, 2013].

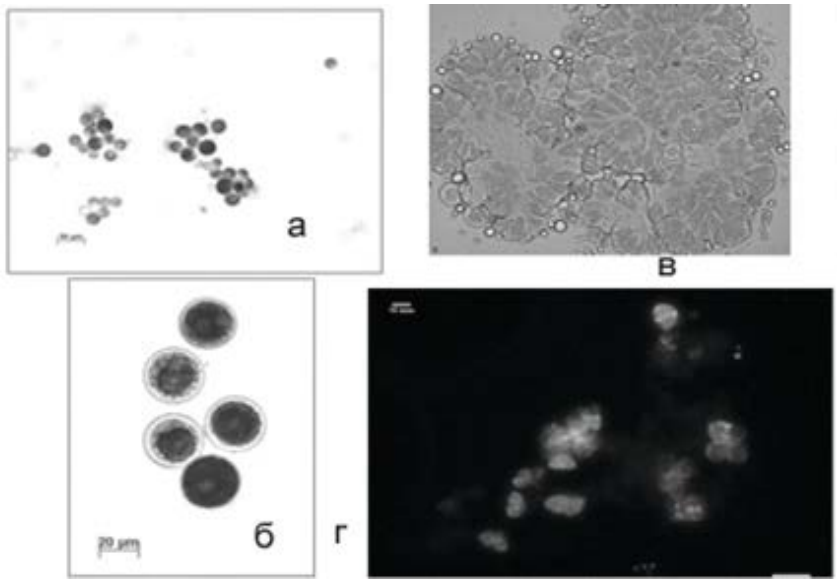


Рис. 4. Примеры штаммов микроводорослей из коллекции НИЛ ВИЭ МГУ. Haematococcus pluvialis rsemsu Hp-1/11 а – посевная культура, б – в стадии образования масла и астаксантина. Botryococcus braunii rsemsu (видны капельки масла): в – в световом микроскопе, г – в люминесцентном микроскопе (культура, окрашенная Нильским красным).

Заключение

Работа посвящена новым нетрадиционным источникам непищевого возобновляемого сырья для биотоплива третьего поколения – биомассе микроводорослей. Рассмотрены методы выделения, скрининга и экспериментальной индукции в микроводорослях (МКВ) липидов. Обсуждается подбор стрессоров при двухстадийном культивировании МКВ. Показаны результаты современных исследований кандидатных штаммов МКВ - продуцентов липидов. Представлен обзор современного состояния и направлений исследований в области гидротермального сжижения МКВ. Отсутствие необходимости предварительной сушки исходного сырья и относительно высокий выход продукта (отношение массы готового продукта к массе исходного сырья) за счет конверсии в биотопливо всех компонентов МКВ (липиды, белки и углеводы) делает этот способ привлекательным и перспективным.

Литература

Биелло Д. Биотопливо: призрачные надежды // В мире науки. 2011. № 10. С. 23–31.

Пиневич В.В., Верзилин Н.Н., Михайлов А.А. Изучение Spirulina platensis – нового объекта для высокоинтенсивного культивирования // Физиология растений, 1970. Т.17, Вып. 5, С. 1037-1046;

Соловченко А.Е., Чивкунова О.Б., Семенова Л.Р. и др. Влияние стрессов на содержание пигментов и жирных кислот липидов в клетках микроводоросли Desmodesmus sp. из беломорского гидроида // Физиология растений. 2013. Т.60. № 3. С. 1–10.

Третьяков В.Ф. Конверсия биоэтанола в автомобильный бензин и реактивное топливо. Доклад на Межд. конгрессе «Биомасса: топливо и энергия – 2013» (16-17 апреля 2013 г.). Доступно: http://biorosinfo.ru/Archive% 20EurasiaBio/Treck%202%20Fuel%20and%20Energy/Tretiakov.pdf

Чернова Н.И., Киселева С.В., Коробкова Т.П., Зайцев С.И. Микроводоросли в качестве сырья для получения биотоплива// Альтернативная энергетика и экология, 2008. № 9.С.68-74.

Alabi A.O., Tampier M., Bibeau E. Microalgae technologies for biofuels/bioenergy production in British Columbia: current Technology and Barriers to implementation. Final Report to the British Columbia Innovation Council. Seed Science. January, 14, 2009. Доступно: http://www.globalbioenergy.org/uploads/ media/ 0901_Seed_Science_- Microalgae_technologies_and_processes_for_ biofuels-bioenergy_production_in_British_Columbia.pdf. 24.09.2010.

Brennan L., Owende Ph. Biofuels from microalgae – a review of technologies for production, processing and extraction of biofuels and co-products // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, V. 14, P. 557-577.

Chernova N.I., Kiseleva S.V., Vlaskin M.S., Rafikova Y.Y. Renewable energy technologies: enlargement of biofuels list and co-products from microalgae // MATEC Web Conf. 2017. vol. 112. № p. 10010.

Chernova N.I., Korobkova T.P. and Kiseleva S.V. Use of Biomass for producing liquid Fuel: Current State and Innovation // Thermal Engineering, 2010. Vol. 57. No. 11. P. 937–945.

Chernova N. I., Kiseleva S. V., Popel' O. S. Efficiency of the biodiesel production from microalgae // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika), 2014. Vol. 61, no. 6. P. 399–405.

Deng M., Coleman J.R. Ethanol synthesis by genetic engineering in Cyanobacteria // Applied and Environmental Microbiology. 1999.Vol.65, № 2. P.523-528.

Elliott D.C. Review of recent reports on process technology for thermochemical conversion of whole algae to liquid fuels // Algal Research. 2016. vol. 13. № p. 255-263.

Hillen L.W. et al. Hydrocracking of the Oils of *Botryococcus braunii* to Transport Fuels // Biotechnology and Bioengineering, 1982, 24 (1): 193–205.

Huntley M., Redalje D. CO_2 mitigation and renewable oil from photosyntetic microbes: a new appraisal // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2007. Vol.12. P.573–608.

Jazrawi C., Biller P., He Y., Montoya A., Ross A.B., Maschmeyer T., Haynes B.S. Two-stage hydrothermal liquefaction of a high-protein microalga // Algal Research. 2015. vol. 8. № p. 15-22.

Jena U., Das K.C., Kastner J.R. Effect of operating conditions of thermochemical liquefaction on biocrude production from Spirulina platensis // Bioresource Technology. 2011. vol. 102. № 10. p. 6221-6229.

Raslavičius L, Semenov VG, Chernova NI, Keršys A, Kopeyka AK. The promise and challenges of algae for transportation biofuels. In: Proceedings of the 17th International Conference Transport Means‘2013. Kaunas, Lithuania: Technologija; 2013. p. 83–86.

Raslavičius L., Semenov V.G., Chernova N.I., Keršys A., Kopeyka A.K. Producing transportation fuels from algae: In search of synergy // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. vol. 40. № p. 133-142.

Sudasinghe N., Dungan B., Lammers P., Albrecht K., Elliott D., Hallen R., Schaub T. High resolution FT-ICR mass spectral analysis of bio-oil and residual water soluble organics produced by hydrothermal liquefaction of the marine microalga Nannochloropsis salina // Fuel. 2014. vol. 119. № p. 47-56.

Trusov L.I, Gordienko A.A, Prokudina N.A. Advances of catalytic processing of a renewable high energy biomass towards liquid fuels and other valuable commodities // Problems of Modern Science and Education (e-journal), 2013. Доступно: http://www.science-education.ru/108-a8728.

Valdez P.J., Nelson M.C., Wang H.Y., Lin X.N., Savage P.E. Hydrothermal liquefaction of Nannochloropsis sp.: Systematic study of process variables and analysis of the product fractions // Biomass and Bioenergy. 2012. vol. 46. № p. 317-331.

Vlaskin M.S., Chernova N.I., Kiseleva S.V., Popel’ O.S., Zhuk A.Z. Hydrothermal liquefaction of microalgae to produce biofuels: state of the art and future prospects // Thermal Engineering. 2017. vol. 64. № 9. p. 627-636.

Vlaskin M.S., Grigorenko A.V., Zhuk A.Z., Lisitsyn A.V., Sheindlin A.E., Shkol’nikov E.I. Synthesis of high-purity α-Al2O3 from boehmite obtained by hydrothermal oxidation of aluminum // High Temperature. 2016. vol. 54. № 3. p. 322-329.

Zhu Y., Albrecht K.O., Elliott D.C. et.al. Development of hydrothermal liquefaction and upgrading technologies for lipid-extracted algae conversion to liquid fuels // Algal Research, 2 (2013), 455–464.

БИОТОПЛИВО ИЗ ВОДОРОСЛЕЙ: ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ, СПОСОБЫ ЭКСТРАКЦИИ ЛИПИДОВ И КОНВЕРСИЯ БИОМАССЫ

Н.И. ЧЕРНОВА, С.В. КИСЕЛЕВА

В работе систематизированы и проанализированы разработанные к настоящему времени технологии культивирования и трансформации биомассы в биотопливо. Рассмотрены классификация и основные параметры этих технологий, а именно, затраты энергии, возможности получения ценных сопутствующих продуктов, секвестирование выбросов CO_2 в процессе получения топлива, стоимостные показатели и др. Наиболее оптимальной по энергоэффективности среди рассмотренных технологий экстракции и переработки биомассы является гидротермальное сжижение (HTL). Для переработки отходов биомассы после экстракции липидов предпочтительной является технология пиролиза.

Интерес к биомассе микроводорослей в последние годы обусловлен их высоким потенциалом в качестве сырья для производства моторного топлива, а также для фармацевтической, химической и пищевой промышленности. В мире активно ведутся поисковые и селекционные работы с целью получения высокопродуктивных штаммов микроорганизмов. Интерес к выращиванию микроводорослей и их использованию имеет давнюю историю. Некоторые области их применения, способы культивирования, возможности сокращения энергозатрат при выращивании были рассмотрены в наших предыдущих публикациях [Чернова и др., 2008; Chernova, Kiseleva, Popel', 2014; Raslavičius et al., 2013; Чернова, Киселева, 2014; Chernova, Korobkova, Kiseleva, 2010; Чернова Н.И. и др., 2015]. Следует отметить, что если в 1995 г. основной технологией крупномасштабного производства биодизельного топлива была переэтерификация триацилглицеридов, то в середине 2000-х годов начали развиваться технологии гидрооблагораживания (восстановление ненасыщенного соединения с присоединением атомов водорода по кратной связи) липидов и получаемого биодизеля до возобновляемого дизеля. Прогнозы дальнейшего развития показывают, что к 2020 гг. лидирующими могут стать технологии гидротермического сжижения липидов и биодизеля (HTL), а также преобразование биомассы газификацией с последующим процессом Фишера-Тропша.

В этой работе нами был проведен анализ и классификация методов культивирования и трансформации биомассы МКВ в биотопливо. В настоящее время применяются и развиваются следующие методы культивирования, предобработки и конверсии биомассы МКВ [Weissman, 1987; Benemann, Oswald, 1996; Kovacevic, Wesseler, 2010; Lundquist et al., 2010; Jonker, Faaij, 2013; Amer, Adhikari, Pellegrino, 2011; Davis, Aden, Pienkos, 2011; Alabi, Tampier, Bibeau, 2009; Rogers et al., 2014]:

1) культивирование: открытые бассейны, закрытые биореакторы, гибридные системы;

2) сбор: гравитационное осаждение, флотация; флокуляция, фильтрация, центрифугирование;

3) конверсия: газификация, пиролиз, ферментация, анаэробное сбраживание, гидротермальное сжижение (HTL - hydrothermal liquefaction), экстракция масла.

В работе [Amer, Adhikari, Pellegrino, 2011] дана характеристика методов конверсии биомассы МКВ в биотоплива, используемых и разрабатываемых в настоящее время (табл. 1).

Таблица 1. Основные методы конверсии микроводорослей в биотоплива

Метод конверсии	**Предподготовка биомассы**	**Основные продукты конверсии**
Прямое сжигание	Сушка	Тепловая энергия
Газификация	Сушка	Синтез-газ (H_2, CH_4, CO_2, NH_3)
Низкотемпературная каталитическая газификация	Не требуется	Синтез-газ (H_2, CH_4, CO_2, NH_3)
Пиролиз	Сушка	Бионефть
Гидротермальное сжижение	Не требуется	HTL-нефть
Гидрогенизация	Сушка	Нефть, богатый углеводородами газ
Ферментация	Сушка	Этанол
Сухая экстракция	Сушка, разрушение клеток	Водорослевое масло (триацилглицериды (ТАГ), жирные кислоты)
Важная экстракция	Разрушение клеток	Водорослевое масло (триацилглицериды (ТАГ), жирные кислоты)
Отжим (повторная экстракция, «доение»)	Не требуется	Углеводороды

Как и в других исследованиях [Lopez Barreiro et al., 2013] было показано, что технология гидротермального сжижения (HTL) в настоящее время представляется наиболее многообещающей технологией: она не требует высокого исходного содержания липидов для достижения высокого выхода биодизеля. Однако реализация технологии в промышленном масштабе наталкивается на целый ряд технических проблем.

Рассмотрим некоторые характерные черты влажной экстракции и экстракции масла методом отжима («доения», «milking»). ***Влажная экстракция*** относится к методам, связанным с разрушением клеток МКВ. **«Разрушающими» методами** являются также: гомогенизация влажной биомассы под давлением и разрушение клеточных стенок ультразвуком; микроволновой нагрев; автоклавирование; осмотический шок; лиофилизация; кислотная обработка и др.

При влажной экстракции в качестве растворителей используются: диметиловый эфир, суперкритический CO_2, смесь метанола и хлороформа, гексан и др.

Выбор наиболее результативного метода экстракции играет большую роль, поскольку при достижении высокого содержания масла в биомассе важно далее с минимальными потерями извлечь масло из МКВ. Полученное в процессе влажной экстракции масло обычно преобразовывается в биодизель путем переэтерификации, которая является в настоящее время хорошо отработанным промышленным методом.

Неразрушающий метод извлечения липидов или других компонентов из МКВ называют ***«доением» или отжимом*** [Sofia Chaudry et al., 2015]. Многократное «доение» биомассы возможно использовать для получения масла лишь из нескольких видов МКВ, в частности *Botryococcus braunii*. Связано это с тем, что *B. braunii* обладает уникальными свойствами: а) они продуцируют длинноцепочечные углеводороды; б) основную часть масла эти МКВ накапливают в экстрацеллюларных матриксах, с внешней стороны клеточной стенки. Это их отличает от большинства МКВ, которые накапливают липиды внутри клетки. Содержание масла в *B. braunii* варьируется от 25 до 75 % по а.с.в. Выделенное масло затем может быть преобразовано гидрокрекингом в бензин, авиационное топливо, дизель, смазочное масло. Для экстракции липидов из МКВ без разрушения используются некоторые биосовместимые (biocompatible) растворители.

Рассмотрим результаты сравнения перечисленных выше методов конверсии биомассы: гидротермального сжижения, влажной экстракции и «доения» по следующим параметрам:

а) качество топлива и количество получаемого масла

Максимально возможное количество получаемого масла, а также его удельное энергосодержание представлено в табл. 2.

Таблица 2. Качество масла, полученного различными технологиями [Sofia Chaudry et al., 2015].

Источник масла	Продуктивность по маслу (% от а.с.в.)	Энергосодержание, МДж/кг
Botryococcus braunii	-	49,0
Chlorella (HTL)	35,0	35,1
Nannochloropsis (HTL)	33,0	34,5
Chlorella (HTL)	83,0	34,2
Nannochloropsis (HTL)	55,0	31,5
Scenedesmus (HTL)	45,0	35,5
Spirulina (HTL)	36,0	35,8
Dunaleilla tertiolecta (HTL)	33,5	34,0
Spirulina platensis (HTL)	40,0	35,27
Botryococcus braunii (HTL)	52,9	47,5

Методы HTL обеспечивает максимальное (среди рассмотренных методов) количество масла, поскольку он позволяет конвертировать и липиды, и другие компоненты (углеводы и белки) в масло. Однако, наличие иных, кроме липидов компонентов в исходном сырье увеличивает содержание азота в получаемом масле. Следует учитывать, что как производительность по маслу, так и качество масла изменяется в зависимости от состава микроводорослей.

Нефть, получаемая при «доении» (многократном неразрушающем отжиме) *B.braunii.* в основном состоит из прямых углеводородных цепей. Азот и кислород содержатся в очень незначительном количестве и не представляют проблемы для гидрокрекинга, поэтому масло из *B.braunii*. может быть легко доведено до высококачественного возобновляемого биотоплива.

Вследствие различного состава масла, получаемого указанными тремя методами, средняя производительность производства нефти и дизеля варьируется в пределах 35% для влажной экстракции, HTL и отжима [Vasudevan et al., 2012; Jones et al., 2014] (табл. 3).

Таблица 3. Удельная величина получаемого масла из биомассы микроводорослей различными технологиями экстракции [17]

Технология	Среднее содержание масла в биомассе (% от а.с.в.)	Среднее количество получаемого масла после экстракции (% от а.с.в.)*	Среднее количество получаемого топлива (биодизеля) (% от а.с.в.) **	Максимально возможное количество получаемого топлива (биодизеля) (% от а.с.в.)
Влажная экстракция	35	31	24,8	25
HTL	35	45	32,6	37
«Доение»	40	36	28	35

* Принималась эффективность экстракции для влажной экстракции и доении 90%

** Среднее количество получаемого топлива рассчитывалось на основе опубликованных данных

б) со-продукты (сопутствующие продукты).

Следует отметить, что после использования экстракции **методом HTL** образуется в качестве побочных продуктов газ (23%), жидкость (32%) и твердая фаза (5%). Твердая фаза содержит неорганические твердые вещества, которые могут быть отфильтрованы из жидкой фазы. Газообразные продукты представлены в основном CO_2, H_2 и следами N_2, а также углеводородами. Жидкая фаза содержит растворенные органические вещества с очень высокой концентрацией кислорода (81%), которые могут быть далее преобразованы каталитической гидротермальной газификацией для получения биогенных веществ (для дальнейшего культивирования МКВ) и получения биогаза. Влажная экстракция образует в качестве сопродуктов биомассу водорослей, богатую белками и углеводами, которая может быть преобразована для получения энергии и питательных веществ, или быть продана в качестве кормовых добавок.

«Доение» (отжим) также приводит к получению биомассы (после нескольких повторений отжима), которая подобна биомассе после использования влажной экстракции.

в) повторное использование биогенных элементов

Вторичное использование биогенных элементов, особенно N и P – важная составляющая каждого метода экстракции, поскольку позволяет увеличить **общую энергетическую эффективность** получения топлива из МКВ и уменьшить эмиссию парниковых газов. Однако выделение биогенных элементов часто требует дополнительных затрат энергии. В частности, удаление азота из масла, полученного путем *HTL*, обеспечивается процессом гидрооблагораживания этого масла; при этом N водной фазы преобразуется в газообразный аммиак, который в свою оче-

редь может быть использован повторно для выращивания водорослей. Оборудование для проведения гидрооблагораживания требует дополнительных капитальных вложений (порядка 30% от полных капитальных вложений на все оборудование для конверсии биомассы). Кроме того, использование азота, полученного таким образом, экспериментально пока не апробировано в качестве биогенного элемента при культивировании.

Для получения биогенных элементов из биомассы *после влажной экстракции* требуется провести либо анаэробное сбраживание (при подходящем соотношении C/N в биомассе), либо HTL. Альтернативой является продажа биомассы после экстракции как кормовой добавки.

г) энергоэффективность технологий экстракции

Энергоэффективность каждой их технологий является важнейшим вопросом, определяющим перспективы ее использования. Общим качественным выводом проанализированных работ является следующий: с точки зрения энергозатратности (и стоимости) наиболее дешевым методом выращивания является культивирование открытым способом; наиболее затратным методом сбора является сушка, наименее – экстракция целевого продукта из влажной биомассы; наиболее энергоэффективным методом конверсии - гидротермальное сжижение биомассы.

д) стоимость

Оценка стоимости получаемого топлива, подобно оценке энергозатрат, очень зависит от выбора технологий, входных данных и вида конечного продукта. Оценки стоимости топлива из микроводорослей варьируются от 0,36 $/л [Benemann, Oswald, 1996] до 194 $/л [Amer, Adhikari, Pellegrino, 2011]. Вариации определяются экономическими предположениями (ставка рефинансирования, период окупаемости), принятыми характеристиками МКВ (продуктивность, содержание липидов, источник CO_2, вторичное использование биогенных элементов), технологиями выращивания (открытые культиваторы, закрытые биореакторы, или гибридные системы) и экстракции (сухая или влажная). В обзоре [Sun et al., 2011], объединившем многие оценки, стоимость топлива из водорослей была оценена в 3,23 $/л при продуктивности 20 г/м^2 и содержании липидов 25%. При удвоении продуктивности и содержании липидов стоимость может уменьшиться до 1,1 $/л. Кроме того, технико-экономические исследования показали, что капитальные затраты на процесс очень высоки [Davis, Aden, Pienkos, 2011; Klein-Marcuschamer et al., 2013]: более чем 50% общей стоимости топлива определяется именно капитальными затратами. Сокращение количества этапов обработки, например, при одновременной экстракции и переэтерификации масла, уменьшении затрат на сбор урожая и использовании более дешевых технологий выращивания (открытые культиваторы вместо ФБР) значительно уменьшают стоимость продукции.

Многие исследования проводят оценку стоимости при влажной экстракции и только некоторые – при HTL. Минимальная стоимость топлива при влажной экстракции –0,36 $/л [Benemann, Oswald, 1996] при очень оптимистичных предположениях о продуктивности (60 г/м^2/день) и содержании липидов (50%). При этом не учитывается преобразование водорослевого масла в топливо. Наивысшая стоимость – 16,08 $/л – была получена при низкой продуктивности (9,38 г/м^2/сутки) и содержании липидов 15%.

В технико-экономических исследованиях прогнозировалась минимальная стоимость топлива, полученного с использованием метода HTL, в 1,26 $/л для

2022 г. [Jones et al., 2014]. В этом исследовании стоимость собранной биомассы МКВ была оценена как 430 $/т сухой биомассы при продуктивности и содержании липидов 30 г/м^2/день и 50%, а также более чем 90%-ном вторичном использовании биогенных элементов из отходов биомасссы. Все эти предположения весьма оптимистичны. В двух других работах стоимость топлива была оценена как 3,1 $/л для HTL [Delrue et al., 2013] и 3,4 $/л для влажной экстракции [Delrue et al., 2012]. Оба эти исследования рассматривали гибридную систему культивирования водорослей (двухстадийное культивирование), дающую более высокую стоимость полученной биомассы, чем открытые системы. При этом в обоих исследованиях рассматриваются одинаковые материалы и равное удельное потребление энергии, одинаковые операционные расходы на единицу массы исходного масла и одинаковые капитальные затраты для этапов улучшения топлива, полученного по методу HTL и влажной экстракции. Хотя в общем случае эти характеристики могут существенно отличаться в зависимости от состава биомассы МКВ. Из результатов работы сделан вывод о том, что стоимость топлива при технологии HTL меньше в связи с более высоким выходом масла.

Основательных исследований стоимости топлива их МКВ при применении метода «доения» (отжима) практически нет; для этого случая требуются детальные данные и технико-экономические обоснования.

Заключение

Анализ рассмотренных методов экстракции и конверсии липидов в топливо показал, что гидротермальное сжижение (HTL) обеспечивает получение наибольшего (удельного) количества липидов. Однако помимо целевого продукта, липидов в данном случае, остается большое количество побочных веществ (нецелевых продуктов) в виде остаточной биомассы после извлечения липидов, а также биогенных элементов, но в меньшем количестве, которые могут быть повторно использованы для культивирования МКВ по сравнению с технологией влажной экстракции. Процесс сжижения (HTL) требует б***о***льшего количества невозобновляемого топлива и производит больше выбросов парниковых газов, чем влажная экстракция. В целом, более высокий выход топлива при применении HTL-технологии нельзя интерпретировать как достаточное обоснование выгодности производственного процесса с точки зрения затрат энергии и стоимости. Следует учитывать более высокое содержание азота в топливе (по сравнению с методом влажной экстракции и «доения»), что требует дополнительных этапов переработки топлива.

Таким образом, систематизированы и проанализированы разработанные к настоящему времени способы культивирования и трансформации биомассы в биодизельное топливо. Рассмотрены основные параметры технологий, а именно, затраты энергии, возможности получения ценных сопутствующих продуктов, секвестирование выбросов CO_2 в процессе получения топлива, стоимостные показатели и др. Наиболее оптимальной по энергоэффективности среди рассмотренных технологий экстракции и переработки биомассы является гидротермальной сжижение (HTL). Для переработки отходов биомассы после экстракции липидов предпочтительной является технология пиролиза.

Литература

Чернова Н.И. и др. Штамм Arthrospira platensis (Nordst.) Geitl. rsemsu T/05-117 – продуцент липидосодержащей биомассы. Пат. РФ № 2539766 С2. // Б.И. №3. 27.01.2015.

Чернова Н.И., Киселева С.В. Биотопливо из водорослей: технологии, продуктивность, перспективы // Энергия: экономика, техника, экология, 2014. №8.С.24-32.

Чернова Н.И., Киселева С.В., Коробкова Т.П., Зайцев С.И. Микроводоросли в качестве сырья для получения биотоплива // Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 9. С.68-74.

Alabi A.O., Tampier M., Bibeau E. Microalgae technologies and processes for biofuels and bioenergy production in British Columbia: current technology, suitability, and barriers to implementation. Columbia: British Columbia Innovation Council; 2009.

Amer L, Adhikari B, Pellegrino J. Techno-economic analysis of five microalgae- to-biofuels processes of varying complexity // Bioresours Technol, 2011; 102(20): 9350–9.

Benemann J.R., Oswald W.J. Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO2 to biomass. Berkeley, CA: University of California; 1996.

Chernova N.I., T.P.Korobkova, and S.V. Kiseleva. Use of Biomass for producing liquid Fuel: Current State and Innovation // Thermal Engineering, 2010. Vol. 57. No. 11. P. 937–945.

Chernova N.I., Kiseleva S.V., Popel' O.S. Efficiency of the Biodiesel Production from Microalgae // Thermal Engineering, 2014, Vol. 61, № 6, P.399-405.

Davis R., Aden A, Pienkos P.T. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production // Appl Energy 2011; 88: 3524–31.

Delrue F, Setier PA, Sahut C, Cournac L, Roubaud A, Peltier G, et al. An economic, sustainability, and energetic model of biodiesel production from microalgae // Bioresour Technol 2012; 111:191–200.

Delrue F., Li-Beisson Y., Setier P.A., Sahut C., Roubaud A., Froment A.K., et al. Comparison of various microalgae liquid biofuel production pathways based on energetic, economic and environmental criteria // Bioresour Technol 2013; 136(0):205–12.

Jones S, Zhu Y, Anderson D, Hallen R, Elliot D, Schmidt A, et al. Process design and economics for the conversion of algal biomass to hydrocarbons: whole algae hydrothermal liquefaction and upgrading. A Report Prepared for the U.S. Department of Energy Bioenergy Technologies Office, Pacific Northwest National Laboratory, 2014.

Jonker J.G.G., Faaij A.P.C. Techno-economic assessment of microalgae as feedstock for renewable bio-energy production // Appl Energy, 2013; 102(0): 461–75.

Klein-Marcuschamer D., Turner C., Allen M., Gray P., Dietzgen R.G., Gresshoff P.M., et al. Techno-economic analysis of renewable aviation fuel from microalgae, Pongamia pinnata, and sugarcane. // Biofuels, Bioprod Biorefin 2013; 7(4):416–28.

Kovacevic V, Wesseler J. Cost-effectiveness analysis of algae energy production in the EU // Energy Policy, 2010; 38:5749–57.

Lopez Barreiro D., Prins W., Ronsse F., Brilman W. Hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae for biofuel production: state of the art review and future prospects // Biomass Bioenergy 2013; 53:113–27.

Lundquist T.J., Woertz I.C., Quinn N.W.T., Benemann J.R. A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. Berkeley, California: Energy Biosciences Institute; 2010.

Raslavičius L, Semenov VG, Chernova NI, Keršys A, Kopeyka AK. The promise and challenges of algae for transportation biofuels. In: Proceedings of the 17th International Conference Transport Means'2013. Kaunas, Lithuania: Technologija; 2013. P. 83–86.

Rogers J.N., Rosenberg J.N., Guzman B.J., Oh V.H., Mimbela L.E., Ghassemi A., et al. A critical analysis of paddle wheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales // Algal Res. 2014; 4(0): 76–88.

Sofia Chaudry, ParisaA.Bahri, Navid R.Moheimani. Pathways of processing of wet microalgae for liquid fuel production: A critical review// Renewable and Sustainable Energy Reviews 52 (2015) 1240–1250.

Sun A., Davis R., Starbuck M., Ben-Amotz A., Pate R., Pienkos P.T. Comparative cost analysis of algal oil production for biofuels // Energy 2011; 36(8):5169–79.

Vasudevan, V., R.W. Stratton, M.N. Pearlson, G.R. Jersey, A.G. Beyene, J.C. Weissman, M. Rubino, and J.I. Hileman. Environmental performance of algal biofuel technology options // Environmental Science and Technology. 2012. 46(4): 2451-2459.

Weissman J.C., Goebel R.P. Design and analysis of microalgal open pond systems for the purpose of producing fuels. // Solar Energy Research Institute; 1987.

ГЕОГРАФИЯ АЛЬГОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

О.Ю. КАЛИНИНА, Ф.В. САПОЖНИКОВ

Одно из направлений исследований, в которых ставится задача эффективное культивирование микроводорослей для целей энергетики, является изыскание в природной среде видов микроводорослей , отличающихся потенциально высокой продуктивностью по биомассе и нейтральным липидам. Для этого существующая в лаборатории возобновляемых источников энергии коллекция штаммов микроводорослей , кандидатных для выращивания с целью производства биодизеля, систематически пополняется после:

- тестирования специфическим на нейтральные липиды красителем Nile red в процессе выделения в чистые культуры из природных источников обитания,
- определения видовой принадлежности (в том числе методами молекулярной биологии).
- оценку влияния стрессирующих факторов (отсутствия биогенов, холодового стресса и продолжительной повышенной инсоляции) на выделение липидов микроводорослей.

С целью отбора проб для исследования микроводорослей на возможность производить нейтральные липиды в большом количестве, в 2014-2017 гг. были предприняты морские экспедиционные работы в зонах Арктики и Антарктики, а также на остаточных водоёмах Аральского моря (рис. 1).

Микроводоросли – эффективные продуценты многих органических веществ, в том числе липидов. Благодаря их обильному развитию в водах высоких широт, чему способствует существенный приток биогенов в фотическую зону водной толщи за счёт зимней конвекции, их численность и биомасса здесь существенно выше, чем в широтах более низких, где подъём биогенов с глубины происходит лишь в районах поднятия глубинных вод на поверхность. Известно, что необходимым условием синтеза жирных кислот является наличие достаточного количества молекулярного кислорода, концентрация которого – равно как и его способность растворяться в воде - увеличивается с понижением температуры. Следовательно, виды, обитающие в высоких широтах, способны к синтезу жирных кислот в больших количествах, чем виды умеренных и тропических широт.

Обитание водорослей в условиях низких природных температур, высокой солнечной инсоляции полярного дня, низкой освещенности короткого зимнего светового дня (или полярной ночи), и в условиях повышенной солености – все эти обстоятельства способствуют формированию ряда полезных для выживания приспособлений, таких как увеличение продолжительности жизни, размеров таллома, объема хлоропластов, и выработке большого количества жироподобных веществ в качестве антифризов клетки. Эти механизмы выживания в условиях резких колебаний факторов среды закреплены генетически и обуславливают высокую эврибионтность микроводорослей высоких широт(способность существовать в широком диапазоне условий среды).

С понижением температуры, межмолекулярные водородные связи внутриклеточной воды стабилизируются, и вода превращается в лед, смещая клеточные органеллы, разрывая клеточные стенки и, в конечном итоге, приводя клетку к гибели. Чтобы этого не происходило, в условиях обитания при низких температурах, в

клетках микроводорослей вырабатываются механизмы холодоустойчивости: понижение точки замерзания внутриклеточной жидкости за счёт выработки антифризов, уменьшение осмотического перехода внутриклеточной жидкости в межклеточное пространство и повышение общей концентрации внутриклеточных веществ.

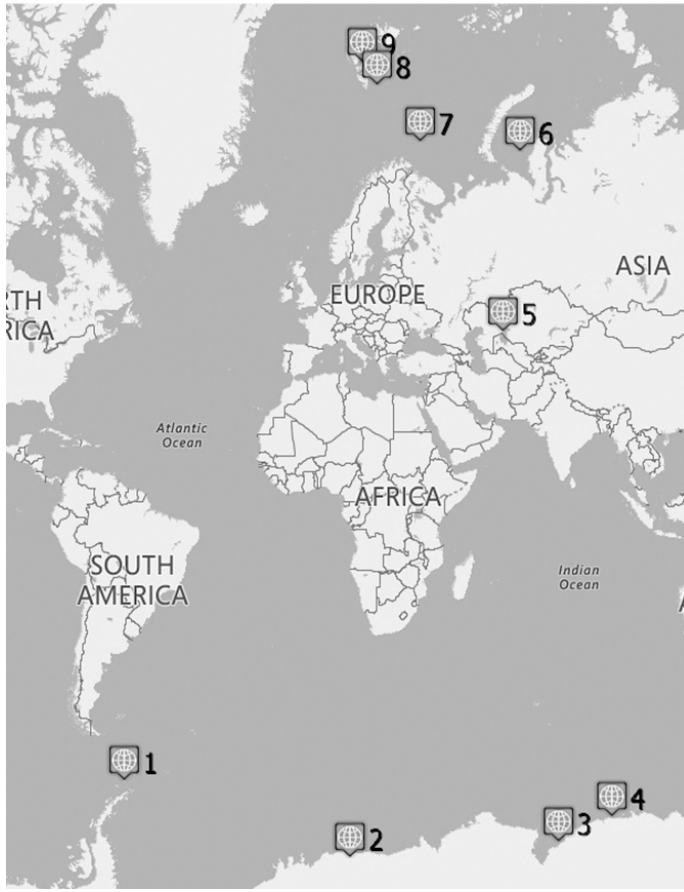


Рис. 1. Карта исследовательских работ по поиску кандидатных штаммов микроводорослей для производства биодизеля за период 2014-2017 гг. Районы отбора проб: 1 – остров Кинг-Джордж, район Российской Антарктической станции (РАС) Беллинсгаузен, 2 – район РАС Новолазаревская, 3 – море Дэвиса в районе РАС Мирный, 4 – район РАС Прогресс, 5 – Большое Аральское море, 6 – Западная часть Карского моря, 7 – Баренцево море в районе работ по программе «Кольский меридиан», 8 – Юго-Восточная часть прибрежных вод архипелага Шпицберген, 9 – Грин-Фьорд, Западный Шпицберген.

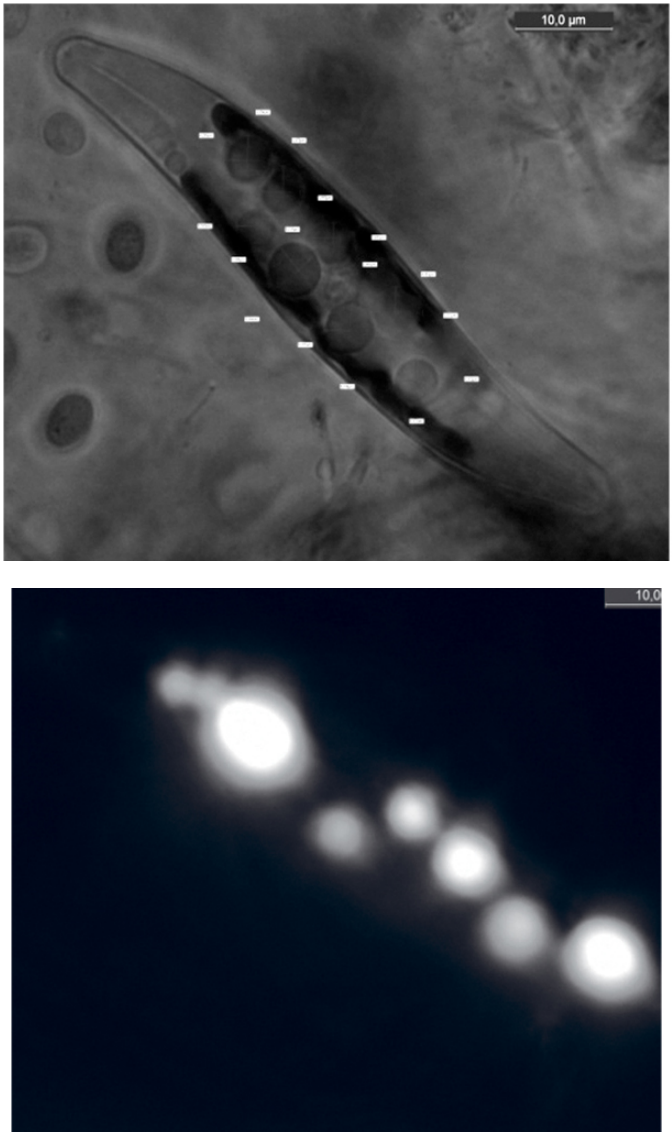


Рис. 2. Пример синтеза большого количества нейтральных липидов в клетке диатомеи. Световые и флуоресцентные микрофотографии диатомеи из рода Gyrosigma sp., окрашенной Nile red. На световых микрофотографиях визуализированы жировые вакуоли, на флуоресцентных эти вакуоли ярко светятся.

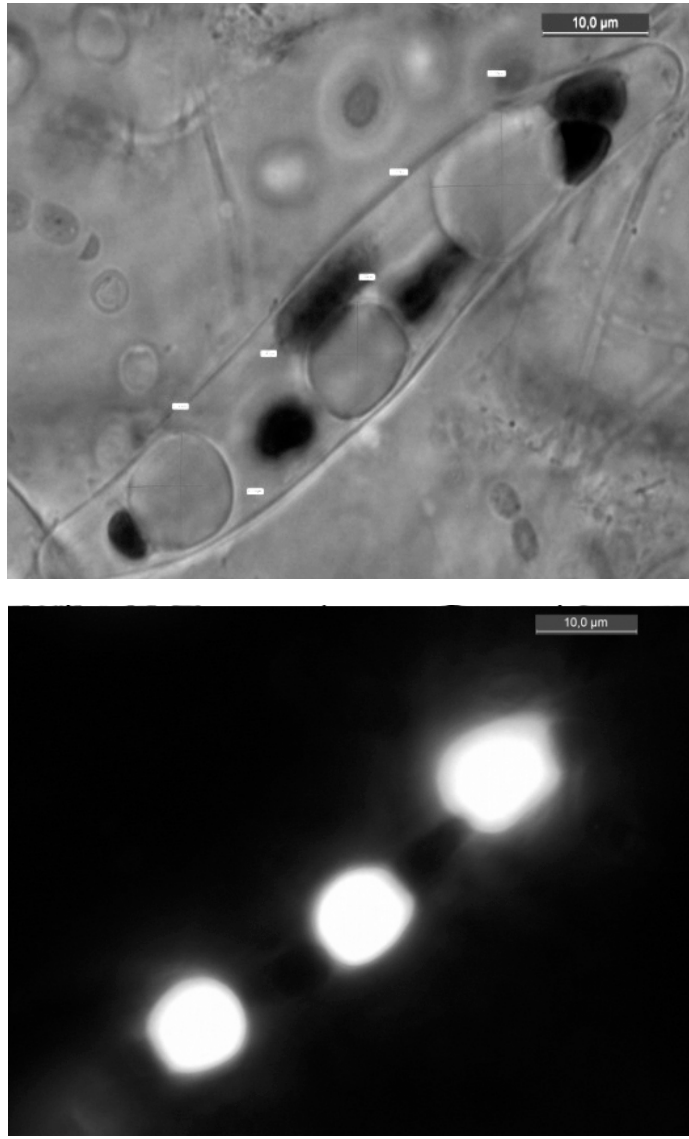


Рис. 2 (продолжение)

В условиях сильной инсоляции полярного дня криофлора производит интенсивное накопление питательных веществ, которые затем расходуются популяциями клеток длительной полярной ночью. Увеличение площади хлоропластов во время полярной ночи [Сапожников, Калинина, 2016] есть следствие накопления большего количества фотосинтезирующих пигментов, что является приспособлением не только к условиям низкой освещенности, но – опять же - и к низким температурам.При перепадах солёности, отдельные виды микроводорослей синтезируют существенное количество осмолитиков, в том числе триацилглицеридов.

Нами взяты в исследования водоросли, обитающие в толще воды, у кромки льда на поверхности морских вод, а также водоросли, населяющие снег и каналы в толще морских льдов, и донные литоральные формы. Микроводоросли высоких широт, обитающие в толще вод в открытой части моря, живут в узком диапазоне низких температур при медленном его изменении – они обладают низкой температурной резистентностью. У тех видов, что населяют поверхность снега, это свойство проявлено ещё более ярко. В свою очередь, водоросли, живущие на границе вода-лед, обладают повышенной устойчивостью к перепадам солёности. То же относится к микроводорослям, живущим в гипер- и ультрагалинных условиях остаточных водоёмов Аральского моря [Сапожников м др., 2016]. Формы, населяющие морскую литораль, в силу приливо-отливных явлений обитают на стыке условий суши, морских и пресных вод, при охлаждении – нагревании в течение коротких интервалов времени. Все эти виды обладают комплексами адаптивных механизмов, позволяющих им выживать как в стабильно экстремальных, так и в экстремально меняющихся условиях – в том числе за счёт синтеза нейтральных липидов.Пример обильного накопления нейтральных липидов в клетке диатомовой водоросли из рода Gyrosigma приведён на рис. 2.

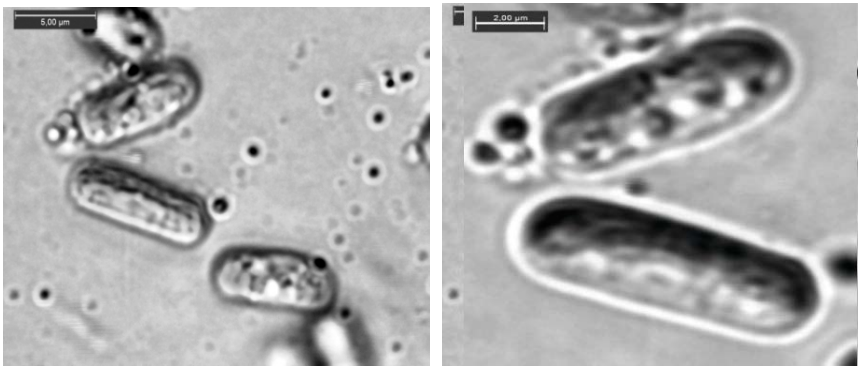


Рис. 3. Световые фотографии Stichococcus bacillaris штамм SK-14, сделанные с помощью микроскопа Leica DM 2500.

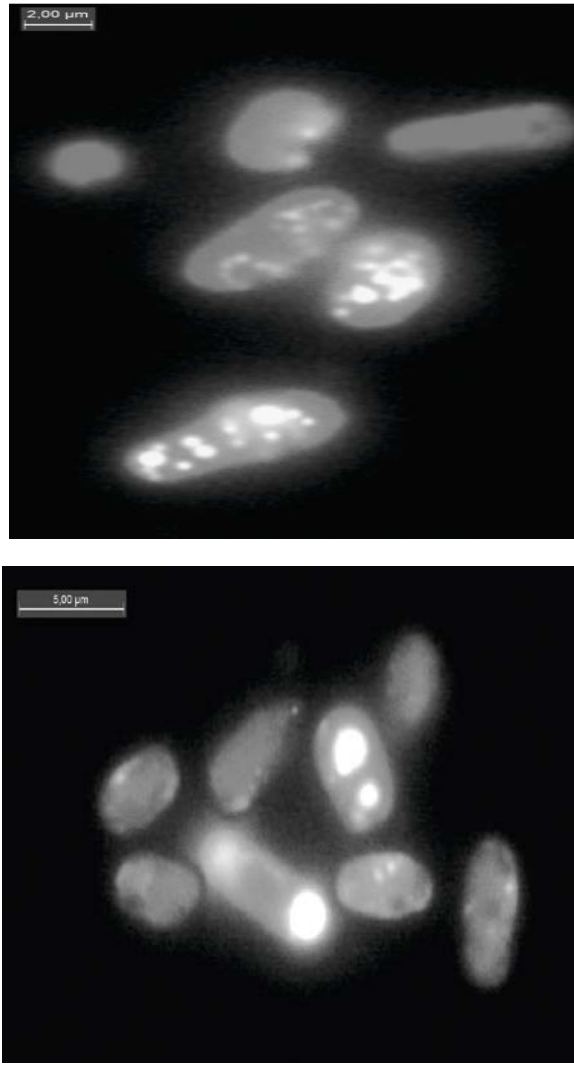


Рис. 4. Флуоресцентные микрофотографии Stichococcus bacillaris штамм SK-14. Окрашивание клеток штамма красителем Nile red. Микроскоп Leica DM 2500. На фото желтая флуоресценция (самый светлый яркий цвет) липидов штамма SK-14

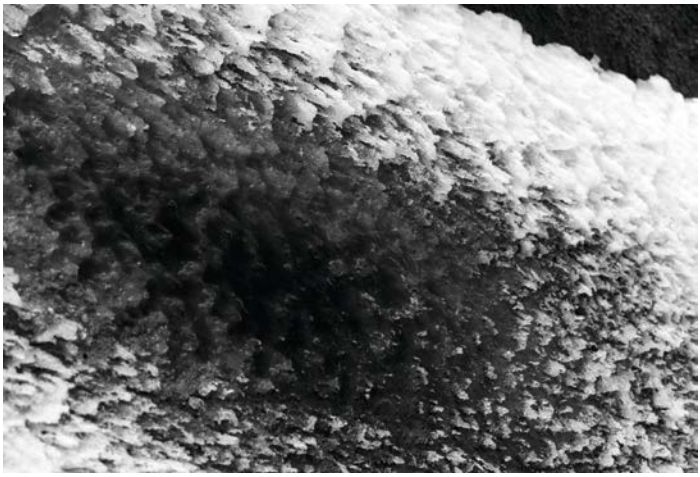


Рис. 5. Снежный покров с обильно размножившимися на его поверхности криофильными водорослями. Место исследования: о. Кинг-Джордж, Антарктика.

По оценкам [Голлербаха, 1977], криофлора микроводорослей составляет около 100 видов, по другим данным 200 [Мельников, 1989]. Флора галотолерантных микрофитов, способных населять переосолонённые биотопы Большого Аральского моря, насчитывает также свыше 100 видов [Завьялов и др., 2012]. Таким образом, экологическое пространство для поиска видов и выделения штаммов микроводорослей, способных к синтезу большого количества нейтральных липидов, довольно обширно.

В 2014-2017 гг., в ходе многочисленных экспедиций, были взяты и проанализированы пробы в высоких широтах Северного и Южного полушарий. В частности, исследованиями Лаборатории были охвачены акватории Норвежского, Гренландского, Баренцева и Карского морей. В ходе экспедиционных работ в Баренцевом море в апреле-мае 2016 г. отобрали для изучения пробы микрофитопланктона кромки льда в районе Земли Франца Иосифа - с целью пополнения коллекции холодолюбивыми штаммами северных широт. В рамках исследования открытых ото льда прибрежных зон Антарктиды – в 2016-2017 гг. - были взяты пробы из Южного океана, с побережья Фьорда Нелла, Моря Дэвиса (район острова Буромского), и из пролива Дрейка, с литорали острова Кинг-Джордж. В 2013-2016 гг., во время экспедиций на водоёмы Аральского моря, был отобран живой материал из биотопов, минерализация которых составляла от 54,5 ppt до 238 ppt. Карта расположения мест отбора проб приведена на рис. 1.

В результате проведенных изысканий 2015-2017 гг., из прибрежной зоны о-ва Белый Карского моря был выделен штамм Stihococcus bacillaris. В 2014 г. мы уже выделили другой штамм Stihococcus bacillaris SK14 KU961673 из оз. Круглого, расположенного в Тверской области. В свою очередь, весной 2017 г. развитие St. bacillaris было отмечено в накопительных культурах, полученных из районов Антарктического прибрежья. В настоящее время стоит задача сравнительного анали-

за этих трёх линий вида на молекулярно-генетическом уровне, а также их способности к синтезу нейтральных липидов. Штамм Stichococcus bacillaris SK14 KU961673 прошел тест с красителем Nile red: было визуализировано содержание большого количества липидов (рис. 3 и 4).

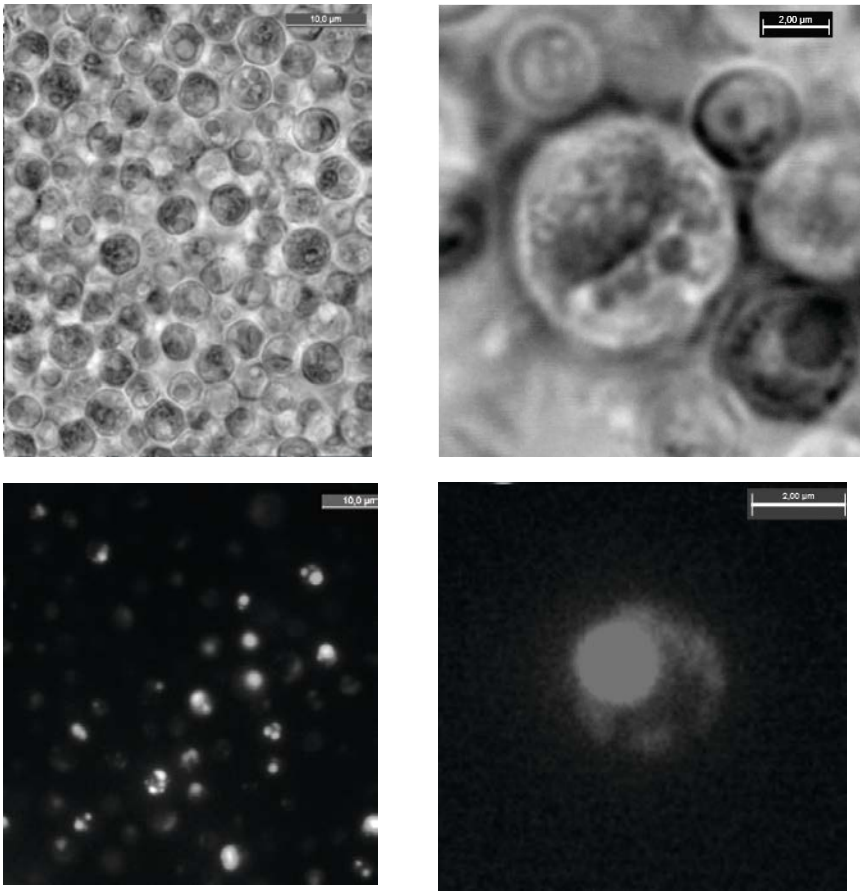


Рис. 6. Представители семейства Chlorococcaceae (Антарктика). Световые и флуоресцентные микрофотографии. Микроскоп Leica DM 2500.

Согласно обзору тематических интерактивных публикаций последних лет, данный вид рассматривается как перспективный для получения сырья при производстве биодизеля [Ganapathy et al., 2014; Olivieri et al., 2013; Olivieri et al., 2012; Olivieri et al., 2011].

В 2016-2017 гг., в ходе Российской Антарктической Экспедиции, из прибрежных ценозов Южного континента были выделены в накопительные культуры не-

сколько видов, в том числе представители сем. Chlorococcaceae и Vischeria spp. Все микроводоросли, отмеченные в пробах из естественных водоёмов Антарктической области, жили там при температурах, близких к 0^0C. Для этих видов было также отмечено обильное накопление липидов при росте на питательной среде (рис. 5, 6 и 7).

Из проб сильно минерализованной (свыше 120 ppt) воды, взятых в Западном бассейне Аральского моря в 2014 г., удалось вывести в накопительную культуру два вида диатомей: Halamphora normanii и Nitzschia communis. Микроскопирование их клеток, развивавшихся в составе биофильмов, с использованием Nile red выявило существенное накопление липидов при длительной экспозиции на ярком свету.

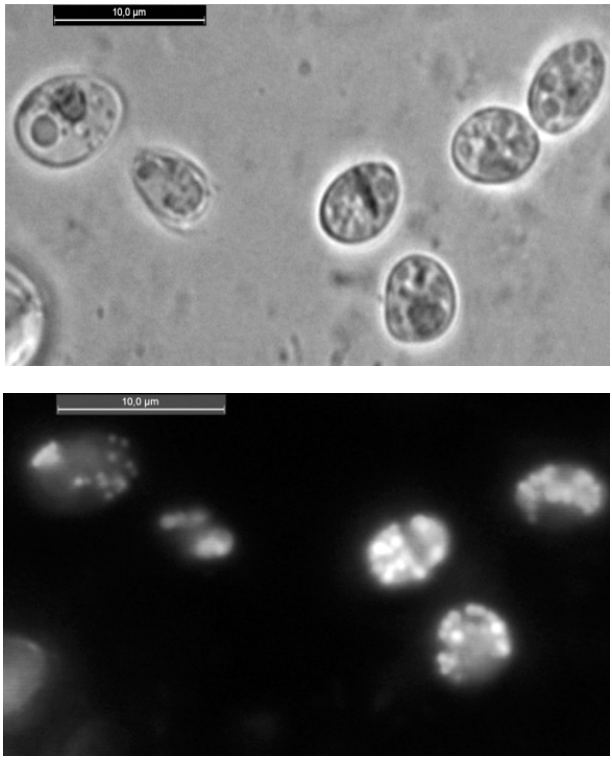


Рис.7. Представители рода Visheria, выделенные из прибрежных альгоценозов Антарктики. Световая и флуоресцентная фотографии. Микроскоп Leica DM 2500.

В процессе изучения разнообразия альгофлоры накопительных культур, выращенных из проб, отобранных в Арктике и Антарктике получают развитие новые виды перспективные для получения высоких концентраций нейтральных липидов (рис. 6 и 7).

Результаты первичных тестов с Nile red и скрининга изолятов продемонстрировали наличие активного синтеза липидов у холодолюбивых, криотолерантных и галотолерантных видов. Тестирование всех выделенных штаммов будет продолжено в камеральных условиях на лабораторных установках с моделированием воздействия различных форм стресса.

Заключение

Представленные результаты исследований проб микроводорослей из районов Арктики, Антарктики и Аральского моря, получены в экспедициях 2014-2017 г.г. Сборы материала проводились с целью выделения культур микроводорослей для тестирования их на способность обильно синтезировать нейтральные липиды – для дальнейшего изучения в целях поиска штаммов микроводорослей высокоэффективных для производства биодизеля.

Литература

Голлербах М.М. Водоросли снега и льда. // Жизнь растений. М.: Просвещение. 1977. Т. 3. с. 68-70.

Завьялов П.О. Большое Аральское море в начале XXI века: физика, биология, химия / Завьялов П.О. (ред.), Арашкевич Е.Г., Бастида И., Гинзбург А.И., Дикарев С.Н., Житина Л.С., Ижицкий А.С., Ишниязов Д.П., Костяной А.Г., Кравцова В.И., Кудышкин Т.В., Курбаниязов А.К., Ни А.А., Никишина А.Б., Петров М.А., Сажин А.Ф., Сапожников Ф.В., Соловьев Д.М., Хан В.М., Шеремет Н.А. - М.: Наука, 2012. – 228 с.

Кауфман З.С. Адаптация гидробионтов к существованию в условиях высоких широт // Труды Карельского научного центра РАН. №1. 2015. с.3-19.

Мельников И.А. Экосистема арктического морского льда. М.: Наука. 1989. – 191с.

Сапожников Ф.В., Калинина О.Ю. Микрофитобентос окрестных акваторий архипелага Шпицберген в зимнее время. / Сборник «Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа». 2016. Серия 13. с. 332-338.

Сапожников Ф.В., Калинина О.Ю. Никитин М.А. Цианопрокариоты Большого Аральского моря на этапе ультрагалинизации вод. // Вопросы современной альгологии. 2016. № 13.

Ganapathy S., Kwangkook J., Jackson O L. J. Bioprocessing of Stichococcus bacillaris strain siva 2011. // Biotechnology for Biofuels. 2014. p.7-62.

Olivieri G., Garganoa I., Andreozzia R., Marottaa R., Marzocchellaa A., Pintob G., Polliob A. Effects of photobioreactors design and operating conditions on Stichococcus bacillaris biomass and biodiesel production. // Biochemical Engineering Journal. V. 74. 2013. p. 8-14.

Olivieri G., Gargano I., Andreozzi R., Marotta R., Marzocchella A., Pinto G., Pollio A. Effects of CO2 and pH on Stichococcus bacillaris in Laboratory Scale Photobioreactors, Chemical Engineering transactions, 2012, 27, 127-132.

Olivieri G., Marzocchella A., Andreozzi R., Pinto G., Pollio A. Biodiesel production from Stichococcus strains at laboratory scale, J. Chem. Technol. Biotechnol. 2011. 86, 776-783.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ЭНЕРГИИ БИОМАССЫ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Т.И. АНДРЕЕНКО, С.В. КИСЕЛЕВА, Ю.Ю. РАФИКОВА

Волгоградская область является одним из крупнейших производителей сельскохозяйственной продукции в Российской Федерации, занимая по этому показателю по итогам 2015 г. 9 место в стране и 3 – в Южном федеральном округе [Плугов, 2015; В Волгоградской области доля АПК …, 2015.]. Высокий уровень агропромышленного производства сопровождается значительным объёмом органических отходов как растениеводства, так и животноводства, требующих утилизации. Использование этих отходов для производства энергии позволяет улучшить энергообеспеченность, нивелировать экологические проблемы, связанные с образованием высокотоксичных отходов, а также повысить социальный статус региона.

Для принятия решений относительно переработки органических отходов требуется методика комплексного анализа территории, включая оценки ресурсов биомассы, выявление особенностей энергопотребления и факторов, ограничивающих создание объектов биоэнергетики. Основой расчетов являются актуальные детализированные статистические данные по всем источникам отходов (растениеводство, животноводства, твердые бытовые отходы, осадки сточных вод) и инфраструктуре энергоснабжения, картографические основы и инструменты геоинформационного картографирования. Согласно разработанной методике [Рафикова, 2016], комплексную оценку ресурсного потенциала возобновляемых источников энергии территорий целесообразно выполнять в несколько этапов (рис. 1).

В первую очередь должен быть произведен анализ ресурсного потенциала (валового и технического), который для биоэнергетики определяется путем обработки статистических данных об источниках всех видов органических отходов. Энергосодержание всей массы отходов рассматривается как валовый потенциал биоэнергетики. Для характеристики пространственного распределения целесообразно составление карт валового энергопотенциала биомассы отходов.

На основе полученных массивов данных о валовом энергетическом потенциале всех видов органических отходов и технологических характеристик процессов их переработки проводятся расчеты технического энергопотенциала биомассы отходов. Результаты отображаются на картах технического потенциала биомассы.

Второй этап оценки включает в себя пространственный анализ соотношения существующего энергопотенциала отходов и факторов, влияющих на его использование. С использованием геоинформационных технологий выполняется районирование территории по перспективности развития биоэнергетики и строительства на ней объектов энергогенерации. Как правило, на втором этапе методики используется более крупный масштаб исследований, чем на первом этапе. Влияющие на перспективность факторы рассматриваются на тех территориях, которые уже определены как значимые с точки зрения ресурсов.

В качестве факторов, ограничивающих возможность использования потенциала, предлагается учитывать следующие: 1) природные (водные объекты, лесные территории, районы распространения опасных геологических процессов); 2) экологические (ООПТ, водоохранные зоны); технические (удаленность от линий электропередач, дорог).

Факторами, которые следует также учитывать для определения перспектив использования ресурсов биомассы, являются:

- структура и динамика энергопотребления на исследуемой территории,
- динамика производства продукции (и, соответственно, отходов) на предприятиях рассматриваемого типа,
- структуры производства, а именно: объемы продукции, получаемой в сельскохозяйственных организациях, крестьянских (фермерских) хозяйствах, у индивидуальных предпринимателей и в хозяйствах населения,
- альтернативные пути использования органических отходов (например, использование соломы для нужд животноводства, строительства и т.д.).

Рис. 1. Схема методики оценки ресурсов биоэнергетики

Несмотря на то, что в России накоплен некоторый опыт интегральных оценок валового ресурса и технического потенциала биомассы [Справочник по ресурсам ..., 2007; Атлас ресурсов ..., 2015] регионального масштаба, актуальными остаются вопросы недостаточности статистических данных и их состава на уровне муниципальных образований, унификации используемых коэффициентов, обоснованности выбора тех или иных методик расчета. Поэтому в представленной работе на примере Волгоградской области показана реализация первого этапа описанной выше методики: оценки энергопотенциала отходов растениеводства и животноводства с детализацией до муниципальных районов.

Расчеты основаны на подходах, изложенных в [Справочник по ресурсам ..., 2007], и развитых в наших последующих работах [Атлас ресурсов ..., 2015; Андре-

енко и др., 2014]. Расчеты энергетического потенциала отходов растениеводства и животноводства проводились по отдельным видам сельскохозяйственных культур и направлениям животноводства. Масса ежегодно образующихся органических отходов сельскохозяйственного производства M_i рассчитывалась с использованием статистических данных годового урожая растительных культур и (или) поголовья скота N_i [База данных показателей, ...] на основе экспериментально определенных норм образования отходов L_i [Справочник по ресурсам ..., 2007; Атлас ресурсов ..., 2015; Клюс, Забарный, 2011]

$$M_i = N_i * L_i ,$$

здесь i – вид растительных культур и (или) направление животноводства.

Тогда суммарный валовый биоэнергетический потенциал рассматриваемой территории, учитывающий все виды органических отходов сельскохозяйственного производства равнялся:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} M_i * K_i ,$$

где K_i – удельное энергосодержание отходов вида i. В качестве основного источника данных в работе использовались материалы Федеральной службы государственной статистики (Росстат), которые содержат валовые сборы сельскохозяйственных культур и поголовье скота как в сумме для хозяйств всех категорий, так и детализировано: для сельскохозяйственных организаций; крестьянских (фермерских) хозяйств и индивидуальных предпринимателей; хозяйств населения. При расчёте валового энергетического потенциала отходов сельского хозяйства представляется целесообразным не учитывать отходы, образующиеся в хозяйствах населения в силу невозможности их сбора (концентрации). В связи с этим было введена характеристика «доступный валовый потенциал отходов сельского хозяйства», которая подразумевает энергосодержание всех органических отходов растениеводства и животноводства кроме отходов, образующихся в хозяйствах населения. (По терминологии экспертно-аналитического центра «АБ-Центра» www.ab-centre.ru, сельскохозяйственные предприятия и крестьянско-фермерские хозяйства образуют промышленный сегмент (сектор) сельского хозяйства).

Результаты оценки и анализ доступного валового энергопотенциала биомассы сельскохозяйственных отходов. В структуре сельскохозяйственного производства Волгоградской области около 70% приходится на продукцию растениеводства. В работе рассчитано энергосодержание отходов производства основных сельскохозяйственных культур Волгоградской области: зерновых и зернобобовых, подсолнечника, картофеля, овощей. Производство зерна является базовой отраслью сельского хозяйства области: зерновые культуры выращиваются во всех районах области, при этом на их долю приходится более 50% всей посевной площади (в 2015 г. – 64,3% от всей пашни [Бюллетень Росстата «Посевные площади ..., 2015]). Второй по площади посевов культурой области является подсолнечник (в 2015 г. площадь посевов – 19,5%). Анализ данных Росстата показывает, что зерновые культуры и подсолнечник в области не выращиваются в хозяйствах населения [Бюллетень Росстата «Посевные площади ..., 2016], и расчёт валового доступного

потенциала отходов можно проводить по данным для хозяйств всех категорий (табл. 1). Видно, что 17 районов области имеют урожаи зерновых более миллиона центнеров, что соответствует энергосодержанию отходов более 42,5 тыс т у.т./год для каждого района. Из них в 9 районах валовый сбор зерна превышает 1,5 миллиона центнеров и в 4-х районах сбор зерна был выше 2 миллионов центнеров. Соответственно, энергесодержание отходов зерновых превышает 63,8 тыс. т у.т. и 85,0 тыс. т у.т.

В 2015 г. Волгоградская область заняла 6 место по производству подсолнечника в стране. Как видно из табл. 1, отходы производства подсолнечника значительны и в целом по области их суммарное энергосодержание (валовый потенциал) лишь на 15,7 % меньше энергосодержания зерновых культур. В расчетах валового энергетического потенциала отходов подсолнечника принималось, что выход стеблей и корзинок составляет 350% массы урожая - семян подсолнечника, а лузги – 18%. Теплотворная способность воздушно-сухих отходов влажностью 18-20% для стеблей подсолнечника составляет 3200 ккал/кг, для лузги – 3750 ккал/кг [Клюс, Забарный, 2011]. Эти характеристики дают возможность провести дифференцированную оценку энергосодержания стеблей и лузги: 1187 тыс. т у. т. и 67 тыс. т у. т. соответственно. Это уточнение имеет принципиальное значение, поскольку их переработка в энергопродукты подразумевает использование различных технологий и разнесена территориально.

Таблица 1. Энергосодержание отходов производства зерновых и подсолнечника в муниципальных образованиях Волгоградской области в среднем за 2013-2014 гг. (выделены лидеры среди районов по валовому сбору и энергопотенциалу отходов)

Муниципальные образования (районы и городские округа)	Отходы зерновых (солома)	
	Отходы, тыс.т/год	Энергия отходов, тыс. т у.т./год
Котовский	321	**136**
Новоаннинский	238	**101**
Еланский	217	**92**
Новониколаевский	211	**90**
Урюпинский	206	**89**
г.Михайловка	205	**87**
Клетский	186	79
Октябрьский	172	73
Киквидзенский	162	69
Чернышковский	153	65
Даниловский	134	57
Котельниковский	132	56
Серафимовичский	126	54
Алексеевский	121	52
Нехаевский	117	50
Руднянский, Калачевский, Ольховский и др.	116 и менее	49 и менее
Всего:	**3501**	**1488**

Таблица 1 (продолжение).

Муниципальные образования (районы и городские округа)	Отходы производства подсолнечника (стебли, лузга)			
	Урожай зёрен подсолнечника, тыс.т	Отходы (стебли), тыс.т у.т.	Отходы (лузга), тыс.т у.т.	Отходы подсолнечника (в целом), тыс. т у.т.
Новониколаевский	114	183	11	**194**
Новоаннинский	97	155	9	**164**
Еланский	89	143	9	**151**
Урюпинский	83	133	8	**141**
Киквидзенский	64	103	6	**109**
г.Михайловка	53	85	5	**90**
Жирновский	42	66	4	70
Нехаевский	40	63	4	67
Руднянский	34	54	3	57
Даниловский	31	50	3	53
Алексеевский	30	48	3	51
Иловлинский, Серафимовичский, Кумылженский, Фроловский, Клетский, г.Урюпинск, Котовский, Ольховский и др.	28 и менее	4	0	5
Всего:	**756**	**1187**	**67**	**1254**

Как видно из рис. 2, в Волгоградской области зерновые культуры и подсолнечник выращиваются повсеместно, однако районы с максимальной урожайностью расположены на севере и северо-западе области, а районы с минимальными сборами – на востоке и юго-востоке области. Распределение производства подсолнечника по области отличается большей пространственной неравномерностью, чем посевы зерновых.

Волгоградская область традиционно занимает ведущие места в рейтинге крупных производителей овощной продукции России. Овощи и картофель выращиваются во всех районах области. (В 2015 г. область заняла второе место в России по плодоовощной продукции). Однако, в отличие от зерновых культур и подсолнечника, наибольшие объемы этих культур выращиваются в хозяйствах населения: около 90% – картофеля и 40% – овощей (табл. 2). Исключением являются районы, близкие к крупным городам области (например, Городищенский район), где основной объём овощной продукции выращивается в промышленном секторе отрасли, и на долю хозяйств населения приходится лишь десятая часть всех производимых овощей. Доступный валовый энергопотенциал отходов растениеводства рассчитывали с учетом только промышленного сектора производства (табл. 2). Видно, что этот потенциал в целом по области существенно уступает энергопотенциа-

лу отходов зернового хозяйства и производству подсолнечника, но в некоторых районах (Светлоярский, Городищенский) достигает существенных величин – порядка 500 т у. т./год и более (табл. 2).

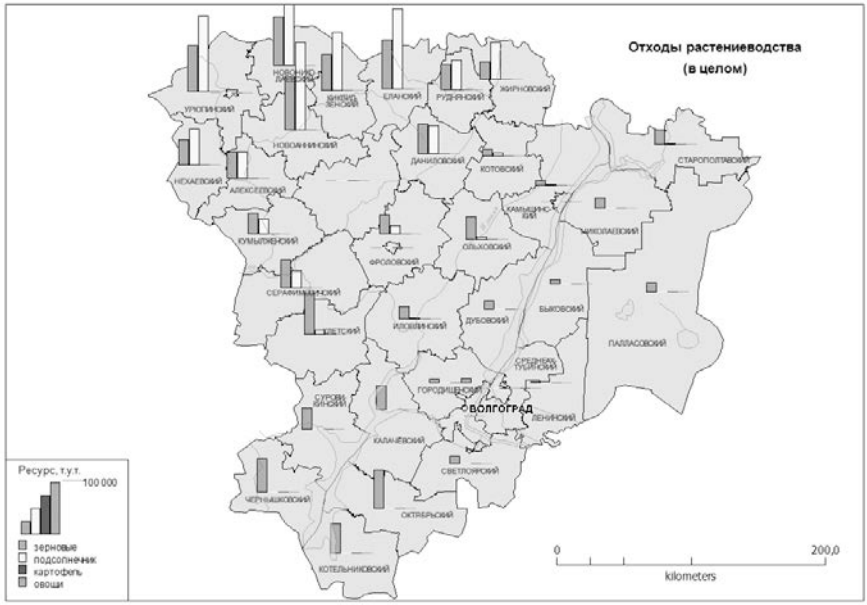


Рис. 2. Распределение валового энергопотенциала отходов растениеводства на территории Волгоградской области

Таблица 2. Энергосодержание отходов производства сельскохозяйственных культур – картофеля и овощей муниципальных образованиях(районов и городских округов Волгоградской области в 2014 г. (жирным шрифтом выделены лидеры среди районов по валовому энергопотенциалу отходов)

Муниципальные образования	I Энергосодержание *(валовый потенциал)*		
	III, т у.т./год	IV, т у.т./год	V т у.т./год
Светлоярский	982	429	**553**
Городищенский	1492	1023	**470**
Ленинский	299	207	88
Новониколаевский	584	497	87
Быковский	170	116	54
Николаевский и др.	$\leq$ 376	$\leq$ 330	$\leq$ 46
Всего:	**11 730**	**10 354**	**1 377**

Таблица 2 (продолжение)

Муниципальные образования	II Энергосодержание *(валовый потенциал)*		
	III т у.т./год	IV т у.т./год	V т у.т./год
Городищенский	10615	1028	**9587**
Среднеахтубинский	3024	857	**2166**
Быковский	1007	311	696
Светлоярский	1107	442	666
Ленинский	1004	349	655
г.Волгоград	1052	619	433
Иловлинский	745	326	420
Калачевский	593	306	287
г.Волжский	700	424	276
Николаевский	427	227	200
Котельниковский и др.	328 и менее	235	93
Всего:	**26 709**	**10984**	**15 725**

Обозначения в таблице: I – отходы производства картофеля; II – отходы производства овощей; III – хозяйства всех категорий; IV – хозяйства населения; V – все хозяйства кроме населения (доступный потенциал).

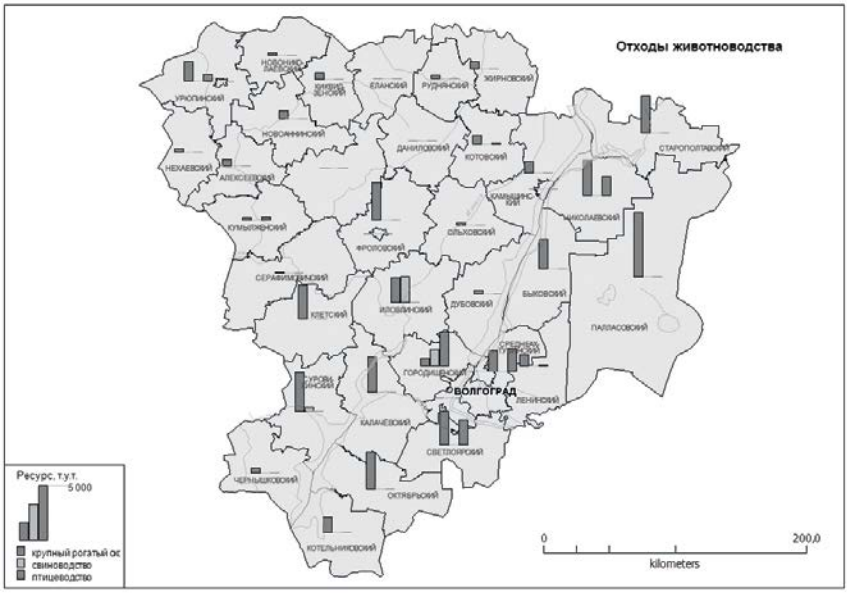


Рис. 3. Распределение энергопотенциала отходов животноводства по территории Волгоградской области

Животноводство. Волгоградская область является крупным животноводческим районом России. (13 место ТОП-20 РФ по поголовью КРС мясных пород на начало 2014 г. [Мясное скотоводство России, 2014]). Основными направлениями животноводства области являются: разведение крупного рогатого скота (КРС) и птицы, свиноводство, овце- и козоводство. Существенно, что в хозяйствах населения области выращивается большая часть животных по сравнению с сельскохозяйственными организациями и крестьянскими (фермерскими) хозяйствами. Так, по данным Росстата на 01.10.2016 г. в этих хозяйствах выращивается 70,7% всего поголовья КРС, 40,3% – свиней, 59,7% – овец и коз, 41,7% – птицы [Бюллетень Росстата «Производство продукции ..., 2016]. В этих условиях актуальна проблема возможности сбора отходов для производства энергии. Поэтому оценка ресурсов и энергетического потенциала животноводческих отходов рассчитывалась по поголовью животных и птицы, выращиваемых в сельскохозяйственных организациях и крестьянских (фермерских) хозяйствах, т.е. в промышленном сегменте животноводства. Из рис. 3 видно, что в Волгоградской области животноводческие хозяйства этого сегмента сосредоточены в центральных, восточных и южных районах области.

При расчетах технического потенциала отходов растениеводства и животноводства использовалась методика, детально изложенная в [Справочник по ресурсам ..., 2007; Атлас ресурсов ..., 2015]. Принималось, что для преобразования в энергию используется вся ежегодно образующаяся масса отходов.

Таблица 3.Технический потенциал отходов животноводства и растениеводства муниципальных районов и городских округов Волгоградской области (в среднем за 2012-2013 гг.)

Муниципальные образования (районы и городские округа)	Технический потенциал отходов растениеводства в целом, электроэнергия, млн кВтч	Технический потенциал отходов растениеводства в целом, тепловая энергия, тыс. Гкал
Новониколаевский	661	1151
Новоаннинский	593	1033
Еланский	544	949
Урюпинский	511	891
Киквидзенский	397	691
г.Михайловка	369	643
Нехаевский	254	443
Жирновский	242	421
Руднянский	225	393
Даниловский	225	393
Алексеевский	213	371
Серафимовичский	171	299
Клетский	137	239
Кумылженский	131	229
Октябрьский и др.	104 и менее	181
Всего:	3408	5939

Таблица 3 (продолжение)

Муниципальные образования (районы и городские округа)	Технический потенциал отходов животноводства в целом, электроэнергия, млн кВтч	Технический потенциал отходов животноводства в целом, тепловая энергия, тыс. Гкал
Городищенский	21	36
Светлоярский	18	31
Николаевский	15	26
Среднеахтубинск	14	24
Палласовский	12	21
Иловлинский	11	20
Суровикинский	9	15
Урюпинский	7	13
Фроловский	7	13
Октябрьский	7	12
Старополтавский	7	12
Калачевский	7	12
Клетский	6	11
Быковский	6	10
Ленинский и др.	3 и менее	5
	106	184

В качестве технологий переработки отходов рассматривалось получение электроэнергии и тепла с помощью мини-ТЭС с прямым сжиганием биомассы или мини-ТЭС на биогазе (для отходов растениеводства) и мини-ТЭС на биогазе (для отходов животноводства). Результаты оценок представлены в табл. 3.

Заключение

Апробация методики оценки энергетического потенциала отходов сельского хозяйства выявила, в первую очередь, неравномерность распределения различных типов отходов биомассы, что безусловно связано с природно-климатическими, агропочвенными условиями, спецификой размещения населения, особенностями землепользования и т.п. Установлено, что значительное число северных и западных районов области обладают большим энергетическим потенциалом отходов растениеводства зерновых культур и подсолнечника, а районы Городищенский, Светлоярский, Быковский, Ленинский и Среднеахтубинский – отходов картофеля и овощей. Центральные, восточные и юго-восточные районы области характеризуются значительным энергетическим потенциалом отходов животноводства. Анализ тенденций сельскохозяйственного производства области за последние годы показал, что развитие АПК Волгоградской области носит устойчивый характер. Так в 2013 г. область заняла 3-е место в РФ по производству овощей, 4-е – в рейтинге РФ по производству подсолнечника, 9-е – по производству зерна. Кроме того, согласно государственным программам развития сельского хозяйства Волгоградской области («Развитие сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2014 -2020 гг.», «Устойчивое развитие сельских территорий на 2014-2017 гг. и на период до 2020 г.») пла-

нируется довести сбор зерновых до 4,5 млн т в 2020 г., существенно увеличить производство овощей. Планируется также приступить к ускоренному развитию животноводства [Иванов, 2014]. Всё это позволяет нам заключить, что количество отходов сельскохозяйственного производства Волгоградской области может стать надежным источником для производства тепловой и электрической энергии.

Литература

Андреенко Т.И., Киселёва С.В., Шакун В.П. К оценке энергетического потенциала отходов растениеводства: зерновое хозяйство // Альтернативная энергетика и экология. 2014. №12. С. 84-95.

Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России – М.:РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2015. 160с.

База данных показателей муниципальных образований субъектов РФ http://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst18/DBInet.cgi

Бюллетень Росстата «Посевные площади Российской Федерации в 2015 году» (размещено 01.03.2016 г.) / http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ main/ rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1265196018516.

Бюллетень Росстата «Производство продукции животноводства и поголовье скота в хозяйствах всех категорий» за январь – сентябрь 2016 г. (размещено 17.10.2016 г.) http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/ statistics/enterprise /economy.

В Волгоградской области доля АПК во внутреннем региональном продукте возросла до 15 процентов / http://riac34.ru/news/71506 (дата обращения 16. 07. 2016.)

Иванов В. Итоги и перспективы сельского хозяйства Волгоградской области. Обзор экономики / http://agroday.ru/analytics/ itogi_i_perspektivy_selskogo_hozjaistva_volgogradskoi_oblasti (дата обращения 10. 12. 2014).

Клюс С.В., Забарный Г.Н. Оценка и прогноз потенциала твёрдого биотоплива Украины // Коллекторное и энергетическое машиностроение. 2011. №2(24). С.8-13.

Мясное скотоводство России: анализ развития отрасли в 2011-2014 гг. Экспертно-аналитический центр агробизнеса / http://ab-centre.ru/articles/ myasnoe-skotovodstvo-rossii-pogolove-krupnogo-rogatogo-skota-myasnyh-porod-analiz-otrasli-myasnogo-zhivotnovodstva-v-2011-2014-gg.

Плугов А. Сельское хозяйство России. Экспертно-аналитический центр агробизнеса / http://ab-centre.ru/page/selskoe-hozyaystvo-rossii (дата обращения 20.08.2016.)

Рафикова Ю.Ю. Геинформационное картографирование ресурсво возобновляемых источников энергии (на примере Юга России). Автореф. дис. канд. геогр. наук. М., 2016.

Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / Под редакцией Безруких П.П. – М.: «ИАЦ Энергия», 2007. 272 с.

К ОЦЕНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА БИОМАССЫ РОССИИ. ОТХОДЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО РАСТЕНИЕВОДСТВА

Т.И. АНДРЕЕНКО, С.В. КИСЕЛЕВА, В.П. ШАКУН

В работе [Андреенко и др., 2012] были проведены расчеты энергетического потенциала муниципальных отходов (твердых бытовых отходов и осадков сточных вод) регионов и городов Российской Федерации, дающие представление о перспективах его использования для получения энергии. Согласно выполненным оценкам, энергетический потенциал отходов сельскохозяйственного производства и, в частности, растениеводства в России в несколько раз превышает соответствующий потенциал муниципальных бытовых отходов [Справочник по ресурсам …, 2007]. В связи с этим, а также с чрезвычайно динамичной ситуацией в производстве сельскохозяйственной продукции, представляется актуальным уточнение оценки энергетического потенциала отходов растениеводства России с дифференциацией по различным регионам.

Важнейшей отраслью растениеводства России является зерновое хозяйство, обеспечивающее основу питания людей и значительную часть кормового рациона сельскохозяйственных животных. Под зерновые культуры в стране занято более половины пахотных земель, в отдельные годы их сбор составлял более 100 млн т (с 1968 г по настоящее время валовый сбор зерна в РФ 14 раз превышал 100 млн т). Поэтому прежде всего для производства энергии из отходов растениеводства в России представляется целесообразным рассмотрение возможностей использования отходов зерновых культур – соломы.

Энергетические свойства соломы и производных продуктов. В процессе уборки урожая зерновая часть культуры отделяется от стеблевой, дальнейший способ заготовки соломы зависит от применяемой технологии. Часть соломы остается в виде стерни в поле и запахивается в почву [Гелетуха, Железная, 1998]. Удельный вес отходов весьма значителен: соотношение зерновой части урожая и соломы составляет примерно 1:1.5, поэтому годовые объемы образования соломы близки к общему производству зерновых культур в стране [Справочник по ресурсам …, 2007]. Некоторые свойства соломы, характеризующие её как топливо, приведены в табл. 1 [Гелетуха, Железная, 2014; Исьёмин, 2014].

Как видно из таблицы, солома обладает высокой теплотворной способностью и относительно низкой влажностью, что указывает на возможность её эффективного сжигания. Элементный состав соломы незначительно отличается от соответствующих показателей для древесины. В то же время солома зерновых культур как топливо имеет ряд отрицательных свойств: высокое содержание хлора и щелочных металлов, из которых при высоких температурах происходит образование хлоридов натрия и калия в количествах, способных вызвать коррозию стальных элементов энергетического оборудования. Выход летучих компонентов при сжигании соломы (около 70 %) обусловливает необходимость специальных требований к распределению и смешиванию воздуха, поступающего в зону горения, а также к конструкции топки котла. Кроме того, зола соломы имеет относительно низкую температуру плавления, что приводит к шлакованию энергетического оборудования. Однако сегодня в прогрессивных топочных устройствах эти негативные свойства соломы преодолеваются конструктивными и технологическими решениями. На

практике используется тот опытный факт, что содержание хлора и калия в свежеубранной соломе («жёлтой») почти в 4 раза выше, чем в «серой», несколько дней пролежавшей в поле [Гелетуха, Железная, 1998].

Таблица 1. Химический состав и некоторые характеристики соломы как топлива

Показатели	Свежая солома («желтая»)	Солома, хранившаяся на поле, («серая»)	Древесная щепа (для сравнения)	Брикеты из соломы*	Пеллеты из соломы**
Влажность, %	10-20	10-20	40	4,7	11,09
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	14,4	15	10,4	18,9	15,42
Содержание летучих веществ, %	>70	>70	>70		
Зольность, %	4	3	0,6-1,5	5,5	4,38
Элементный состав, %:					
углерод	42	43	50		
водород	5	5,2	6		
кислород	37	38	43		
хлор	0,75	0,2	0,02		
калий (щелочной металл)	1,18	0,22	0,13-0,35***		
азот	0,35	0,41	0,3		
сера	0,16	0,13	0,05	0,01	0,07
Температура плавления золы, °С	800-1000	950-1100	1000-1400		

* [Луговцев, 2014] ** [Исьёмин и др., 2014] *** [Клюс, Забарный, 2011]

Сжигание тюкованной соломы в специальных топках успешно реализуется на практике в целом ряде стран [Гелетуха, Железная, 1998], однако такой способ использования соломы в качестве топлива не является оптимальным. Объясняется это низкой насыпной плотностью соломы (30–40 кг/м^3), которая удорожает транспортировку и хранение соломы, усложняет систему подачи соломы в топку котла, и – главное – тюкованная солома имеет малое объемное энергосодержание. Поэтому установки для сжигания тюков дороги, имеют невысокий КПД и неудобны для пользователей вследствие крупных габаритов топлива.

Эти недостатки преодолеваются прессованием измельчённой соломы в брикеты и гранулированием её с получением топливных гранул – пеллет. Переработка соломы в топливные брикеты позволяет решить многие проблемы. Брикеты из соломы обладают теплотворной способностью на единицу объема почти в 10 раз большей, чем исходное сырье, а по другим характеристикам не уступает брикету из древесных отходов (табл. 1). Процесс гранулирования соломы практически не отличается от аналогичного процесса по производству древесных пеллет. Более того, преимуществом соломы зерновых, как сырья для производства гранул, является её относительно низкая влажность, что позволяет во многих случаях не про-

водить предварительную сушку перед гранулированием. Гранулы весьма технологичны: они имеют диаметр от 6 до 12 мм, длину до 25 мм и насыпную плотность 600 – 650 кг/м^3 (почти как у бурого угля), что позволяет их легко транспортировать на значительные расстояния без опасности разрушения. По теплоте сгорания пеллеты из соломы немного уступают гранулам из древесины. И самый главный их недостаток – зольность: если у древесных зольность от 0,5% до 2%, то у соломенных – от 3% до 10%. Однако повышенную зольность соломенных брикетов и пеллет по сравнению с древесным топливом едва ли нужно рассматривать как серьёзный недостаток, так как соломенная зола является хорошим удобрением.

Энергетический выход при использовании пеллет из соломы зерновых культур в качестве твердого биотоплива практически равен выходу от угля. Теплота сгорания пеллет из соломы ненамного меньше, чем у каменного и бурого угля, ва выброс CO_2 при их сгорании меньше в 10-50 раз, выход золы меньше в 15-20 раз. Кроме того, зола соломенного топлива экологически чище угольной и может быть использована в качестве удобрения сельскохозяйственных угодий.

Технические решения для преодоления недостатков энергетических продуктов из соломы – низкая температура плавления золы соломенных тюков, брикетов и пеллет, значительный выход летучих компонентов при их сжигании, наличие хлора и щелочных металлов в них – найдены и реализованы. В результате технологии достигли коммерческого уровня и широко используются в Европейских странах [Гелетуха, Железная, 2014; Фомин, 2013; Биоэнергетика Европы, 2013].

Мировой опыт использования соломы как топлива. На данный момент европейский энергетический рынок биомассы и биогаза оценивается в более чем 3,3 млрд евро [Европейский союз …, 2013]. Доля соломы в объеме биомассы для производства энергии составляет по тем же данным около 10%. Можно констатировать, что технологии сжигания соломы с целью выработки тепла и электроэнергии достигли коммерческого уровня и достаточно широко используются в европейских странах. Рассмотрим некоторые особенности и масштабы использования соломы зерновых в энергетически целях. Среди стран, развивающих данную отрасль биоэнергетики, следует выделить группу стран, в которых эксплуатируются высокотехнологичные системы и масштаб использования энергетического потенциала соломы достаточно высок. Признанным лидером в этой группе является Дания, где первые котлы, работающие на соломе, начали выпускаться и внедряться после первого нефтяного кризиса в 1970-х гг. прошлого века [Гелетуха, Железная, 2014].

Современный уровень энергогенерирующих мощностей Дании, работающих на этом топливе, отражен в таблице 2. При этом Дания не только масштабно развивает биоэнергетическую отрасль на своей территории, но и является успешным экспортером технологий на мировой рынок (аналогичная экспансия проводится и датской ветроэнергетической отраслью). Так, продажи в ЕС малых (до 300 кВт) котлов датской компании «PassatEnergyA/S» составили более 120 000 штук. А компания DPCleanTech в период 2006-2012 гг. обеспечила строительство в Китае 34 электростанций на соломе общей мощностью 1200 МВт. Великобритания, Испания, Швеция, Австрия также идут по пути преимущественного использования соломы в крупномасштабных энергетических проектах – ТЭЦ и ТЭС большой мощности (табл. 2).

Таблица 2. Структура энергогенерации на соломе в европейских странах [Гелетуха, Железная, 2014]

Страна	Вид энергогенерирующего оборудования	Мощность, МВт/ иные характеристики	Количество
Дания	Котлы в фермерских хозяйствах	0,1 -1,0	10 000
	Котельные централизованного теплоснабжения	0,5 – 12	55
	ТЭЦ	2 – 28	4
Великобритания	ТЭЦ	38	1
		40	Строится, ввод в 2016 г.
Испания	ТЭЦ	16	1
		25	1
		15÷30	7 перспективные проекты
Австрия	Котлы в фермерских хозяйствах	0,1 -1,0	Единичные установки
	ТЭЦ		5
Швеция	Котлы в фермерских хозяйствах	0,1 -1,0	70
	Котельные централизованного теплоснабжения	Солома совместно с другим топливом	5
	ТЭЦ	110 – древесная щепа; 45 – на соломе;	Строится
Финляндия	Котлы в фермерских хозяйствах	0,1	Единичные установки
	ТЭЦ		1
Франция	Котлы в фермерских хозяйствах	0,1	Единичные установки
	ТЭЦ		1
Польша		0,1	100
	Котельные централизованного теплоснабжения	0,5-7	40
	ТЭЦ	30	Строится, ввод в 2014
Украина	Котлы в фермерских хозяйствах		Около 100; общая установленная мощность 70 МВт. Топливо – тюкованная солома.

Несколько другой путь использования топлива из соломы сформировался в Польше, в которой аграрной биомассе придаётся особое значение и основное направление использования соломенных гранул и брикетов связано с созданием многочисленных мелких установок, в основном в фермерских хозяйствах. Эта особенность отражена в структуре установленных генерирующих биоэнергетических мощностей Польши (таблица 2). Следует отметить, что интерес к использованию соломы в качестве топлива в Польше обозначился еще в 1990-х гг. в связи с сокращением поголовья скота и образования избытка соломы порядка 8 млн т в год. В последние годы осуществляются масштабные закупки агропеллет и брикетов на Украине и в России.

Третий тип европейских государств, использующих в энергогенерации солому и продукты из нее, – это аграрные страны необеспеченные собственными топливными энергоресурсами. Зачастую проекты в области биоэнергетики в этих странах проводятся при поддержке международных финансовых и проектных организаций. В качестве типичного представителя этого ряда можно рассматривать Республику Молдову, импорт энергии в которой составляет 95%, а ежегодно образующейся объем соломы зерновых – порядка миллиона тонн [Молдова …, 2013].

С 2002 г., после масштабной оценки энергетического потенциала отходов сельскохозяйственного производства, началось осуществление экспериментального проекта по широкому внедрению теплогенераторов малой мощности на соломе зерновых. В Республике осуществлены несколько международных проектов в области энергетического использования соломы.

В результате этого в сотнях общественных учреждений села и в домашних хозяйствах сооружены тепловые котлы на биомассе, в частности на соломе, других отходах зерна и стеблях кукурузы [Проект «Энергия и биомасса» …, 2013; Молдова, 2013].

В тот же ряд можно поставить Украину, где накоплен опыт энергетической утилизации соломы. В сельской местности эксплуатируются более 100 котлов/теплогенераторов на тюках соломы. Примерно 45 из них – котлы украинской компании «Южтеплоэнергомонтаж», 10 – датских фирм Faust и Passat Energi, другие – теплогенераторы украинской компании «Бриг». На Украине активно развивается производство гранул и брикетов из соломы [Гелетуха, Железная, 2014].

Используемая методика и результаты оценки биоэнергетического потенциала соломы для регионов России. В основу расчета были положены методические подходы, изложенные в работах [Справочник по ресурсам, 2007; Гелелуха и др., 2010; Клюс, Забарный, 2011; Бюллетень Росстата, 2012], согласно которым энергетический потенциал отходов растениеводства определяется по валовому сбору урожая конкретной культуры, а также по ее агротехническим и теплофизическим свойствам. В результате количество отходов *i*–ой культуры определяется как произведение $P_{iвал} = P_i * K_{iотх}$, где $P_{iвал}$ – вес отходов *i*–ой культуры, рассчитанный как произведение величины урожайности культуры P_i и коэффициента $K_{iотх}$, равного отношению массы отходов и полезной части растения. Валовый энергетический потенциал отходов сельскохозяйственной культуры рассчитывается как произведение массы отходов производства данной культуры, выращенной в хозяйствах всех категорий за год, на теплотворную способность этих отходов $Q_{iотх}$: $П_{iвал} = P_{iвал} * Q_{iотх} = P_i * K_{iотх} * Q_{iотх}$.

Нами был рассчитан энергетический потенциал отходов растениеводства зерновых и зернобобовых культур Российской Федерации. При этом впервые проведены расчеты для отдельных культур: пшеницы озимой и яровой, ржи озимой и яровой, тритикале озимого и ярового, ячменя озимого и ярового, овса, риса, гречихи, проса. Оценки сделаны для всех Федеральных округов, а также каждого края/области/автономной республики. При расчетах энергетического потенциала использовались данные о средней за период 2006-2012 гг. урожайности по данным Федеральной службы государственной статистики (Росстата) [Бюллетень Росстата, 2013; Российский статистический ежегодник, 2013]. Коэффициенты K_{iomx} и Q_{iomx} определялись по литературным данным [Справочник по ресурсам, 2007; Гелелуха, 2010; Клюс, Забарный, 2011; Бюллетень Росстата, 2012].

На рис. 1а представлено распределение величины энергопотенциала отходов (соломы) основной продовольственной и экспортной зерновой культуры сельского хозяйства России – пшеницы. Картографическое представление позволяет быстро выделить ведущие регионы по этому потенциалу, определить районы с заданным значением величины интересующего энергопотенциала. Количественные значения энергетического потенциала отходов пшеницы в цифровом выражении представлены на странице сайта «Геоинформационная система ВИЭ», развиваемого научно-исследовательской лабораторией возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ (http://www.gis-vie.ru). На этом же сайте размещены электронные карты территориального распределения энергетического потенциала отходов всех рассмотренных в исследовании зерновых культур, выращиваемых в России. В табл. 3 представлены расчеты энергетических потенциалов соломы озимой и яровой пшеницы для Федеральных округов (Центральный, Южный, Приволжский и Сибирский) и областей – лидеров по урожайности этих культур.

С точки зрения вклада отходов различных зерновых культур в суммарный энергетический потенциал, показательными являются полученные результаты, представленные в табл. 4. Видно, что суммарное энергосодержание соломы злаков, ежегодно выращиваемых в России, в среднем составляет 32348,7 тыс. т у.т. По данным Росстата, в 2011 г. в России было произведено и использовано тепловой энергии, соответствующее 198,2 млн т у.т. [Российский статистический ежегодник, 2013]. Таким образом, энергия, содержащаяся в соломе зерновых соответствует 16,3% потребностей страны в тепловой энергии. Следует учитывать, однако, что валовый энергетический ресурс (потенциал), приведенный в табл. 3 и 4 – это годовой объём энергии, содержащийся в данном виде энергетического источника при полном её преобразовании в полезную используемую энергию, т.е. при к.п.д. преобразования 100% и отсутствии иных потерь.

Определяя технический энергопотенциал соломы как часть валового потенциала, преобразование которого в полезную энергию возможно при существующем уровне развития технических средств, авторы [Справочник по ресурсам …, 2007] приравнивают валовый и технический потенциалы соломы. На практике сбор соломы с поля, её погрузка, транспортировка к местам хранения и складирования являются трудоёмкими операциями, определяющими значительные потери этой незерновой части урожая. Например, при широко применяемых технологиях уборки соломы и половы зерновых культур – копённой и валковой – потери незерновой части урожая составляют до 35% [Гелетуха, Железная, 2014; Скурихин, 2013]. Эти потери должны учитываться при расчёте технического потенциала. Но

многообразие природных и производственных условий территории России, различные варианты использования незерновой части урожая в хозяйствах определяют и многообразие технологических схем уборки соломы, её перевозки и хранения, а, следовательно, и процент потерь этой части урожая [Скурихин, 2013].

Таблица 3. Среднегодовой валовый сбор озимой и яровой пшеницы и энергетические потенциалы отходов этой культуры (средние значения за 2006-2012 гг.)

Округа и области	Урожай 2006-2012 (в среднем за год, тыс. т)	Энергетический потенциал отходов (тыс. т у.т./год)	Округа и области	Урожай 2006-2012 (в среднем за год, тыс. т)	Энергетический потенциал отходов (тыс. т у.т./год)
ЦФО	8478,2	3603,2	**ПФО**	9134,1	3882,0
Воронежская обл.	1396,7	593,6	Республика Татарстан	1889,9	803,2
Курская обл.	1251,0	531,7	Оренбургская обл.	1350,9	574,1
Липецкая обл.	1044,2	443,8	Саратовская обл.	1348,0	572,9
ЮФО	13544,2	5756,3	**СФО**	8730,9	3710,6
Краснодарский край	5826,1	2476,1	Алтайский край	2446,0	1039,5
Ростовская обл.	5042,9	2143,3	Омская обл.	1952,7	829,9
Волгоградская обл.	2168,4	921,6	Новосибирская обл.	1554,7	660,7
			Красноярский край	1295,5	566,9

Таким образом, технический потенциал – это часть валового за вычетом потерь при производстве соломы, величина которых специфична для конкретного способа уборки урожая, применяемых технологий и техники, природно-климатических условий и сортовых характеристик зернового растения.

Экономический потенциал в работе [Справочник по ресурсам …, 2007] определятся как часть технического потенциала, преобразование которого в полезную используемую энергию экономически целесообразно при данном уровне цен на топливо, тепловую и электрическую энергию, оборудование, транспортные услуги и т.д. В случае отходов зерновых культур авторы считают возможным приравнять экономический потенциал к 50% валового, считая что примерно половина образующейся ежегодно соломы является доступной и может быть экономически целесообразно использована. Однако определение доступной доли соломы и других растительных отходов для энергетики является непростой задачей. Объясняется это использованием соломы как в животноводстве (корм, подстилка), растениеводстве (удобрение, мульча), в строительстве, так и в новых перспективных отраслях производства: в целлюлозной промышленности для производства картона и бумаги, в пищевой промышленности для выращивания грибов и т.п.

Рис. 1а. Распределение валового потенциала отходов пшеницы по территории России.

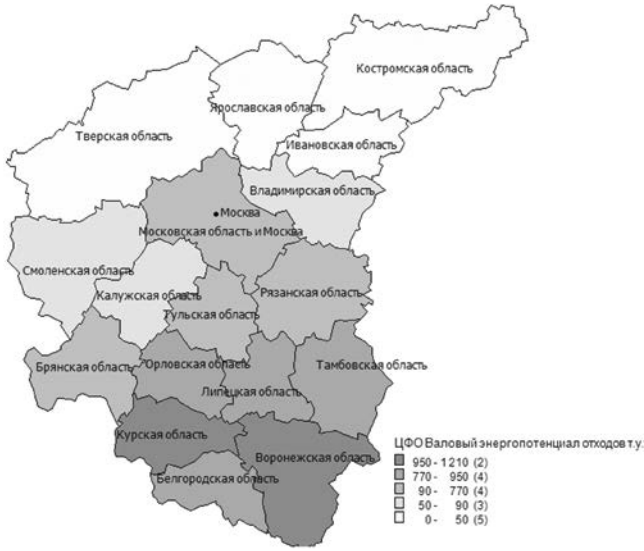


Рис. 1б. Распределение валового потенциала отходов пшеницы по территории Центрального Федерального округа

Рис. 1в. Распределение валового потенциала отходов пшеницы по территории Приволжского Федерального округа

Рис. 1г. Распределение валового потенциала отходов пшеницы по территории Южного Федерального округа

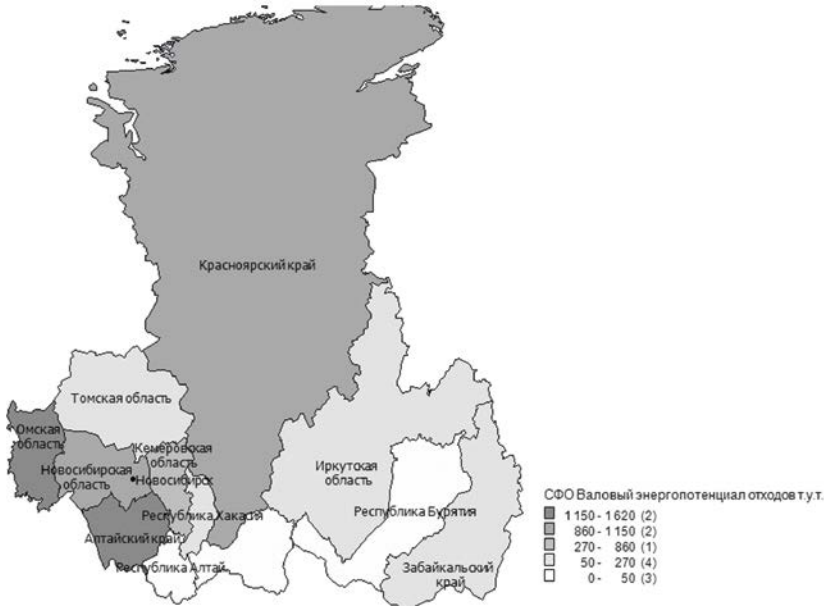


Рис. 1д. Распределение валового потенциала отходов пшеницы по территории Сибирского Федерального округа

Таблица 4. Среднегодовой сбор и энергетический валовый потенциал отходов зерновых культур, выращиваемых в России

Вид культуры	Среднегодовой сбор 2006-2012 гг., тыс. т	Среднегодовой энергетический потенциал отходов (соломы) тыс. т у. т.
Пшеница озимая и яровая	49620,0	21088,5
Рожь озимая и яровая	3010,2	1279,3
Тритикале озимое и яровое	436,1	185,4
Ячмень озимый и яровой	16016,8	6807,2
Овёс	4809,7	2044,1
Просо	516,2	219,4
Гречиха	768,9	326,8
Рис	936,6	398,0
Всего	76114,5	32348,7

В работе [Гелетуха, Железная, 2014] представлен подробный обзор исследований, выполненных в последние годы, согласно которому в странах Евросоюза на энергетические нужды может быть использовано от 25 до 50 % урожая соломы и отходов кукурузы выращенной на зерно. Интересен опыт Дании, где в среднем, из 5,5-6 млн т образованной соломы около 1,5 млн т (27%) утилизируется в качестве топлива, 1 млн т (18%) используется в качестве корма для скота, 0,7 млн т (13%) идет на подстилку для скота, и свободный остаток составляет порядка 2,3 млн т (42%) (данные 2004-2008 гг.). В США для производства биотоплива может использоваться 30-60% общего объёма соломы и отходов кукурузы на зерно.

Количество соломы, необходимое для восстановления плодородия почвы, зависит от системы обработки полей. Так, при современной системе нулевой обработки почвы (No-Till) для восстановления её плодородия требуется меньше соломы по сравнению с другими системами растениеводства, в результате для других нужд хозяйствования высвобождается больший объём растительных отходов. Украинскими специалистами построены имитационные модели деятельности аграрных предприятий различной направленности, позволяющие установить избыток соломы, который может быть использован на теплоэнергетические нужды хозяйства [Гелетуха, Железная, 2014]. Так, показано, что аграрное предприятие сахарозерно-животноводческого направления может использовать 86% производимой соломы на топливо без ущерба животноводству и плодородию пахотных земель. А для предприятия картофеле-зерно-животноводческого профиля эта доля составляет только 38%. Рассмотренные данные позволяют заключить, что экономический энергопотенциал отходов растениеводства может быть определён только с учётом

всей хозяйственной деятельности региона: потребностей животноводства, состояния посевных площадей по содержанию гумуса и необходимости его восстановления, теплоэнергетического баланса населённых пунктов и т.п.

Для России, имеющей огромные ресурсы ископаемого топлива и значительные лесные ресурсы, использование отходов растениеводства может быть рентабельным для районов с развитым зерновым хозяйством и дорогостоящими традиционными энергоносителями (или дорогой их доставкой). Как показали исследования сотрудников Тамбовского технического университета, примером такого региона могут служить восточные районы Ростовской области [Исьёмин, 2014]. В Заветинском районе области в среднем за 2000-2006 гг. ежегодно оказывались невостребованными и сжигались 28 тыс. т соломы озимых зерновых культур (11,9 тыс. т у.т.). При этом теплообеспечение общественных и жилых зданий района осуществлялось путем использования дорогостоящего антрацита. Показана экономическая и экологическая целесообразность замены антрацита соломенными гранулами, производство которых можно организовать в большинстве регионов России.

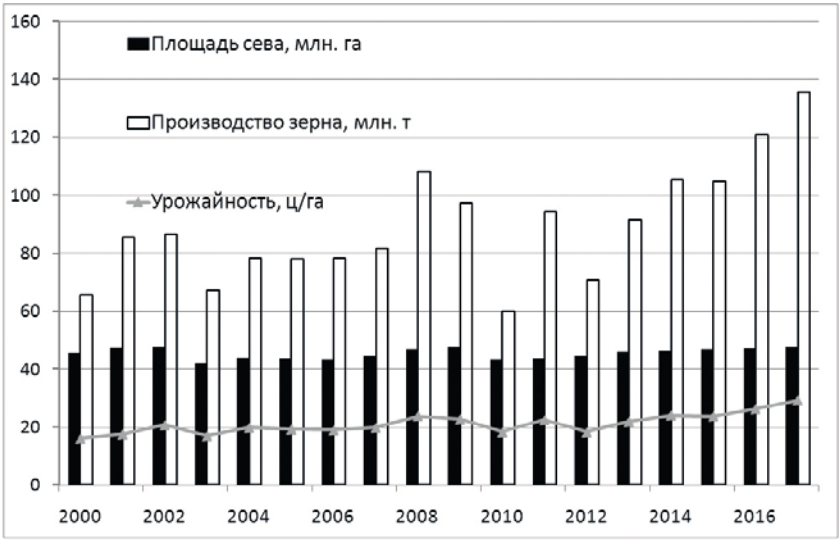


Рис. 2. Динамика производства зерновых культур в РФ (2000-2017 гг.) [Российский статистический ежегодник, 2013; Валовые сборы и урожайность …, 2018; Посевные площади …, 2018].

Наши данные свидетельствуют о том, что отходы зерновых и зернобобовых культур обладают значительными энергетическими ресурсами даже в неблагоприятные, неурожайные годы (2010 и 2012 гг.). Рост валового сбора зерна в России в 2000-2017 гг. (рис. 2), позволяет рассматривать производство зерна в России как стабильную отрасль сельского хозяйства, имеющую тенденцию к развитию. Государственная программа развития сельского хозяйства [Государственная программа …, 2013] предполагает довести к 2020 г. валовый объём годового урожая зерновых

и зернобобовых культур до 115 млн т. Суммарный энергетический потенциал отходов производства составит 48,9 млн т у.т./год.

Кроме увеличения общего объёма производства зерновых культур, стратегическим направлением развития зерновой отрасли является организация планирования в зернопроизводстве [Государственная программа …, 2013]. Такое совершенствование структуры производства зерна может являться и гарантом обеспечения сырья для теплоэнергетического производства, развитие которого, в свою очередь, приведёт к снижению себестоимости зерна [Биоэнергетика Европы, 2013] и улучшению экологического состояния регионов.

Выводы

1. Развитие современных технологий привели к тому, что производство энергии (тепловой и электрической) из отходов растениеводства, и в частности, соломы вышло на коммерческий уровень.
2. Полученные оценки энергетических потенциалов отходов производства зерновых культур России свидетельствуют о значительном запасе энергии. В работе представлено территориальное распределение этих ресурсов.
3. При оценке величин «технический» и «экономический потенциал региона» следует учитывать производственные характеристики: структуру сельского хозяйства района (наличие животноводческих хозяйств как альтернативного потребителя отходов растениеводства, состояние плодородия пашни района и необходимость её восстановления, используемую систему обработки почвы и потребности района в энергии (энерготопливный баланс).
4. Совершенствование планирования в производстве зерновых, структуры зернового производства и тренд к увеличению производства может обеспечивать гарантированный объем сырья для производства энергии из отходов.
5. Использование отходов растениеводства для производства тепла и электроэнергии имеет экологический аспект:
   - способствует улучшению экологической ситуации регионов:
   - сокращается выделение парниковых газов в атмосферу. Растительные отходы являются более чистым топливом, чем традиционные ископаемые (мазут, уголь).
   - использование соломы в качестве топлива может предотвратить сжигание её на полях, вызывающее гибель полезной микрофлоры и ухудшение качества почв, а также анаэробное сбраживание соломы на полях, сопровождающееся выделением метана (парниковый газ).
6. Экономический аспект использования отходов растениеводства:
   - снижение себестоимости производства зерна;
   - экономия средств индивидуальных домовладельцев и бюджетных средств районов на закупку топлива для общественных котельных.
7. Социальный аспект использования отходов растениеводства:
   - создание новых рабочих мест в сельской местности;
   - способствование эффективному развитию бизнеса при организации производства биотоплива в виде брикетов и гранул из растительных отходов;
   - улучшение уровня жизни сельских тружеников.

Литература

Андреенко Т.И., Киселёва С.В., Рафикова Ю.Ю., Шакун В.П. К оценке энергетического потенциала органических отходов регионов России // Альтернативная энергетика и экология. 2012. №10. С.104-111.

Биомасса как источник энергии / Под редакцией Соуфера С., Заборски О. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. 368 с.

Биотопливо – альтернативный источник получения энергии. Раздел 2. Зарубежные технологии сжигания соломы. МАН Украины. Джанкой. 2008-2009 гг. http://moy-man.at.ua/publ/2008_2009_uchebnyj_god/man/razdel_2_zarubezhnye_ tekhnologii_ szhiganija_solomy/5-1-0-38 (дата обращения 20.06.2014).

Биоэнергетика Европы. Рост на фоне сокращения стимулов // Нефтегазовая вертикаль. 2013. № 19. С.17-19.

Бюллетень Росстата. Посевные площади Российской Федерации в 2017 г.. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1265196018516 (дата обращения 20.09.2018).

Бюллетень Росстата. Валовые сборы и урожайность сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2017 г. (части 1 и 2). http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1265196018516 (дата обращения 20.09.2018).

Бюллетень Росстата. Посевные площади, валовые сборы и урожайность сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2012 г. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications /catalog/doc_1265196018516 (дата обращения 15.09.2014).

Бюллетень Росстата. Посевные площади, валовые сборы и урожайность сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2013 г. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1265196018516 (дата обращения 20.09.2014).

В 2013 г. Проект «Энергия и биомасса» покроет всю территорию Молдовы. http://www.allmoldova.com/ru/news/v-2013-godu-proekt-energiya-i-biomassa-pokroet-vsyu-territoriyu-moldovy (дата обращения 15.05.2013).

Гелелуха Г.Г., Железная Т.А.., Жовмир Н.М., Матвеев Ю.Б., Дроздова О.И. Оценка энергетического потенциала в Украине. Часть 1. Отходы сельского хозяйства и древесная биомасса // Промышленная теплотехника. 2010. Т.32. №6. С.58-65.

Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Обзор технологий сжигания соломы с целью выработки тепла и электроэнергии // Экотехнологии и ресурсосбережение. 1998. № 6. С.3-11.

Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Перспективы использования отходов сельского хозяйства для производства энергии в Украине. Аналитическая записка БАУ. 2014. №7. 34 с. http://www.uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-7-ru-draft.pdf (дата обращения 15.05.2014).

Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020гг. http://mcx.ru/navigation/docfeeder/show/342.htm (дата обращения 20.09. 2018).

Данилова Г.М. Оптимизация процесса уборки незерновой части урожая зерновых культур с использованием методов имитационного моделирования / Автореферат дисс. на соискание учёной степени кандидата технических наук. – М.: 1984.

Европейский союз и ПРООН запустили в Молдавии проект по развитию биомассы. РБК-Украина. http://www.abercade.ru/research/industrynews/6280.html (дата обращения 01.12.2013).

Исьёмин Р.Л., Кузьмин С.Н., Милованов А.В., Коняхин В.В., Зорин А.Т. О возможности использования соломы в качестве топлива для коммунальной энергетики. http://www.termowood.ru/news/2011022.html (дата обращения 20.05. 2014).

Клюс С.В., Забарный Г.Н. Оценка и прогноз потенциала твёрдого биотоплива Украины // Коллекторное и энергетическое машиностроение. 2011. №2(24). С.8-13.

Луговцев Е.К. Переработка соломы в топливные брикеты. Размещено на сайте: http://www.brikk.info/articles/46-kak.html (дата обращения 15.01.2014).

Молдова получит $ 15 миллионный грант на установку твердотопливных котлов. http://pelleta.com.ua/moldova-poluchit-15-millionnyj-grant-na-ustanovko23927.html (дата обращения 20.10.2013).

Российский статистический ежегодник. 2013 г. Росстат 2013 г. (Таблица 13.9. Баланс энергоресурсов за 2011 г., стр. 360).

Скурихин П. Зерновой рынок России: тенденции 2013-2014 гг. / Межд. конф. «Российская зерновая неделя: торговля и тенденции». – Ростов-на-Дону, 2013. http://www.apk-inform.com/ru/exclusive/topic/1022268#.U34ZG3ZL758 (дата обращения 10.11.2015).

Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / Под редакцией Безруких П.П. – М.: ИАЦ Энергия, 2007. 270 с.

Фомин И. Топливо из соломы: прошлое или будущее? http://teplo-faq.net/igry/3-tverdotoplivnye-kotly/2363-toplivo-iz-solomy-proshloe-ili-budushhee?format=pdf (дата обращения 25.03.2014).

РАЗДЕЛ 5

ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ВОДЫ В АТМОСФЕРЕ

В.В.АЛЕКСЕЕВ, М.Ю.БЕРЁЗКИН

В настоящее время основным источником пресной воды являются воды рек, озер, артезианских скважин и опреснение морской воды. В то же время, если во всех речных руслах находится 1,2 тыс. км^3 то количество воды находящееся в каждый данный момент в атмосфере равно 14 тыс. км^3. Ежегодно испаряется с поверхности суши и океана 577 тыс. км^3 и столько же потом выпадает в виде осадков. Вода в атмосфере в течение года обновляется 45 раз.

По высоте влага распределена неравномерно. Половина всего водяного пара приходится на нижний, полутора километровый слой атмосферы, свыше 99% – на всю тропосферу. У земной поверхности абсолютная влажность в среднем по миру составляет 11 г/м^3. Многие из стран жаркого пояса страдают от отсутствия пресной воды, хотя ее содержание в атмосфере значительно. Например, в Джибути в течение всего года практически не бывает дождей, в то время как абсолютная влажность в приземном слое воздуха колеблется от 18 до 24 г/м^3. В пустынях Аравийского полуострова и в Сахаре над каждым квадратом поверхности со стороной 10 км в сутки проносится такое же количество воды, какое содержалось бы в озере площадью 1 км^2 и глубиной 50 м. Чтобы взять эту воду, надо только открыть символический «кран». Парадоксально, но факт: самый крупный источник – вода в атмосфере – почти не используется.

Ресурс пресной воды в атмосфере постоянно возобновляются, качество конденсата для большинства районов нашей планеты очень высокое. Анализ возможных концентраций наиболее токсичных элементов (тяжелые металлы) и соединений (пестициды) в сконденсировавшейся влаге аридных районов земного шара показал, что нигде они не превышают величин ПДК, установленных Всемирной организацией здравоохранения [Алексеев, Красовская, 1997].

Проблема обеспеченности водными ресурсами. Проблема дефицита пресной воды становится все актуальней для многих регионов мира. Её обострение связывают с ростом населения, климатическими изменениями и рядом других причин. Начиная с середины XX в. рост водопотребления в мире резко увеличился, практически в 4 раза (рис. 1). В основном связано это было с расширением площади орошаемых земель и увеличением расхода на испарение. Сокращение атмосферных осадков и речного стока при увеличении испаряемости внутренних областей суши привело к снижению их общей увлажненности.

С деятельностью человека связано изменение обмена подземных вод, их пополнение за счет создания искусственных водоемов и в результате интенсивного выкачивания. Ежегодно извлекается до 20 тыс. км^3 подземных вод. В настоящее время под воздействием антропогенной деятельности более 20 % территории континентов коренным образом преобразовано, что приводит к изменению водного режима. Такие экологические нарушения не могли не сказаться на глобальном

процессе потребления воды. Из-за снижения прироста сельскохозяйственного водопотребления произошло снижение и общего прироста мирового водопотребления (рис. 2). На рост водопотребления серьезно сказалось увеличение масштабов урбанизации. Суточный расход воды на личные нужды жителя современного благоустроенного города 100-400 л. В то же время во многих местах земного шара эта цифра снижается до 20-30 л. Почти миллиард человек на нашей планете не обеспечены безопасной питьевой водой, хотя ее годовое потребление постоянно растет [Алексеев, Берёзкин, Иванов, 2005].

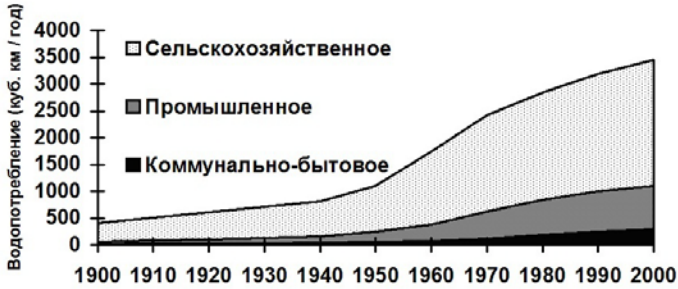


Рис. 1. Рост мирового водопотребления

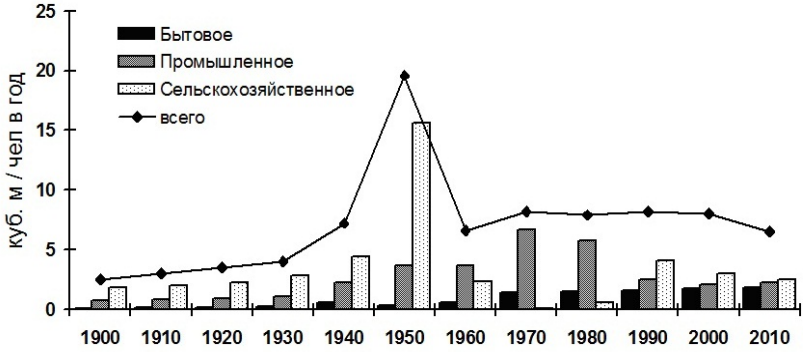


Рис. 2. Прирост мирового водопотребления ($м^3$/ чел. в год).

Способы решения проблемы нехватки пресной воды. Проблему дефицита пресной воды в мире пытаются устранить различными способами. В их числе: экспорт воды; создание искусственных водоёмов; экономия расхода воды; опреснение морской воды или солёной воды из подземных источников. Выработка пресной воды в мире растет непрерывно и высокими темпами. Так, если в 1960 г. опреснение составило 0,09 $км^3$, то по прогноз на 2020 г. – 30 $км^3$. Распределение количества получаемой воды по регионам неравномерно. На Средний Восток приходится 60%, Северную Америку – 13%, Европу – 10%, Африку – 7%, на остальной мир – 10%. На страны СНГ приходится всего 0,6% от общего объема выработки опресненной воды мире.

В настоящее время пресную воду в основном получают из морской воды, при этом для широкомасштабного производства используется эффект дистилляции и мембраны. К мембранным методам относятся: электродиализ (ЭД) и обратный осмос (для морской воды – МОО и для солоноватой – СОО) [Колдин, 1986; Авакян, 1987; Пилипченко и др., 1987].

К дистилляционным методам относятся: многоступенчатые дистилляционные системы (МДС), системы многократного вскипания (МК) и механической декомпрессии (МД). Эти системы значительно лучше очищают воду от соли (остаток соли после их применения к морской воде составляет 0,001-0,05 г/л). Различные способы опреснения требуют различное количество электроэнергии и пара на единицу произведенной продукции (табл. 1).

Таблица 1.Расход электроэнергии и пара при различных способах опреснения

Способы	Мин. расход электроэнергии	Макс.расход электроэнергии	Минимальный расход пара	Максимальный расход пара
	кВт-час/т	кВт-час/т	кг пара/ кг дистиллята	кг пара/ кг дистиллята
МОО	3,96	7,93	не исполь-зуется	не исполь-зуется
СОО	0,26	1,85	не исполь-зуется	не исполь-зуется
МДС	0,75	1,75	0,10	1,00
МК	2,64	3,96	0,08	0,25
МД	8,50	12,00	0,03	0,05

Дистилляция является самым старым методом получения пресной воды. Сущность метода состоит в том, что из морской воды путем нагревания получают пар, который затем конденсируют. На испарение 1 кг воды расходуется приблизительно 2700 КДж, поэтому дистилляция является достаточно энергоемким методом. Однако за последние 30 лет удалось значительно снизить энергозатраты при производстве воды на крупных установках за счет использования тепла, которое выделяется при конденсации пара. С этой целью строят многокорпусные опреснительные установки. При этом количество ступеней может достигать 30. В каждой последующей ступени процесс испарения идет при уменьшенном давлении и температуре. В процессе парообразования используется тепло, выделяющееся при конденсации пара, который поступает из предыдущей ступени.

Другим распространенным методом опреснения является электродиализ. В данном методе через морскую воду пропускают электрический ток, удаляя, таким образом, находящиеся в ней соли. Для предотвращения обратных реакций перед электродами ставят полупроницаемые ионоселективные мембраны. Этот метод используется в основном для опреснения слабо минерализованных вод, поскольку расход электроэнергии сильно растет с увеличением солености исходной воды.

Метод опреснения обратным осмосом начал использоваться в 1960-х гг. Сущность этого метода заключается в том, что при создании повышенного давления в емкости, разделенной полупроницаемой мембраной, пресная вода проходит через

мембрану, а соли задерживаются. Однако селективная способность мембран зависит от величины заряда иона. Они задерживают многозарядные ионы, но пропускают 15% однозарядных ионов, которые составляют основную долю ионного состава морской воды. Для опреснения морской воды ее необходимо пропускать через мембраны несколько раз. Эффективность мембран зависит от температуры воды, а также от ее загрязненности, поэтому требуется предварительная обработка.

Опреснение морской воды, как требует значительных расходов энергии. В лучших дистилляционных установках на получение 80-100 $м^3$ пресной воды уходит не менее 1 т.у.т. [Демкин, Ногин, 1997]. Поэтому по самым скромным оценкам, чтобы увеличить годовое потребление воды на 1000 $км^3$ за счет опреснения потребуется по крайней мере 10 млрд т.у.т. Другими словами придется удвоить современное потребление энергии, что недопустимо с точки зрения возможного воздействия на климат. К этому добавится еще одна проблема – экологическая, связанная с утилизацией 35 млрд т соли и загрязнение атмосферы, кроме CO_2 другими продуктами горения органического топлива, в частности окислами серы.

Таким образом, недостатками опреснения морской воды являются:

- Территориальная привязанность к морскому побережью.
- Высокие затраты на электроэнергию, составляющие в себестоимости производимой воды до 60 %.
- Высокая стоимость оборудования и строительства и длительные сроки окупаемости установок.
- Загрязнение окружающей среды: получаемый в качестве отхода солевой раствор или прямо негативно действует на среду, или требует затрат на изоляцию и хранение.

Конденсация воды в атмосфере: теоретические аспекты. Количество находящихся в воздухе водяных паров является одним из наиболее важных, но в то же время наиболее изменчивых показателей климата. Оно связано, прежде всего, с испарением, которое зависит от ряда гидрометеорологических факторов: атмосферных осадков, температуры воды и воздуха, скорости ветра, давления атмосферы, а также от ряда ландшафтных характеристик. Распределение водяных паров в атмосфере определяется в основном температурой воздуха. Максимальную упругость водяных паров в воздухе, или предел насыщения влагой воздуха E при разной температуре воздуха можно определить по эмпирической зависимости $E = 6{,}1 \cdot 10^{\left(\frac{745\tau}{(235+\tau)}\right)}$ мб,

где τ - средняя температура воздуха в градусах Цельсия. По Ганну, для свободной атмосферы величина абсолютной влажности E_h на высоте h (км) зависит от влажности у поверхности земли E_0: $E_h=E_0^{-(h/6.3)}$ мм.

На основании наблюдений за подъемом шаров-пилотов, были получены сведения об абсолютной влажности воздуха на разной высоте (табл. 2).

Наибольшее влияние на величину испарения с поверхности водных бассейнов оказывает недостаток насыщения влагой воздуха и его температура. Влажность воздуха по мере его движения над водоемом увеличивается, особенно интенсивно в прибрежной полосе. Прирост влажности воздуха и, следовательно, упругости водяных паров с увеличением площади водоема увеличивается, причем в засуш-

ливых зонах больше, чем над таким же водоемом в зонах избыточного увлажнения.

Относительная влажность воздуха над океанами почти всюду постоянна и близка к 80%. На континентах она уменьшается по мере удаления от океанов, за исключением больших континентов холодного пояса, где вследствие сильного зимнего охлаждения почвы незначительное количество паров, содержащихся в воздухе, находится в состоянии, близком к насыщению. Минимальная относительная влажность наблюдалась в Долине Смерти (США, штат Невада) – 13% и в Заволжье, к востоку от Астрахани, весной 1949 г. – 3,5%.

Таблица 2. Абсолютная влажность в г/м^3 [Аполов, 1963]

Высота, км	Весна	Лето	Осень	Зима	Год
0	5.67	10.23	7.78	3.01	6.66
0.5	4.89	9.36	7.23	2.84	6.09
1.0	3.83	7.45	5.02	2.44	4.77
1.5	2.98	5.76	3.73	1.76	3.63

Излучение земной поверхности $E_з=\varepsilon\sigma T^4$, где $\sigma=5{,}67032\cdot10^{-8}$Вт/(м^{2}К^4), ε – коэффициент черноты. Эта величина меняется в зависимости от подстилающей поверхности. Величина ε равна для воды – 0,993, свежего снега – 0,99, густой травы – 0,97, глинистой почвы – 0,98, хвойного леса – 0,6, песка – 0,91 [Хргиан, 1978]. При Т=288 К (средней температуре поверхности Земли) $E_з$=390,9 Вт/м^2=0,56 кал/(см^2·мин).

Если мы учтем, что теплота испарения воды при средней температуре Земли примерно равна 2,45 кДж/г, то мы можем получить количество росы, которое может образоваться на поверхности при постоянном подтоке влажного воздуха к ней. Оно оказывается примерно равным 6,8 кг/м^2 или примерно 6,8 мм/м^2 слоя воды.

Эта влага довольно быстро должна испариться с восходом солнца. Грубо эту величину можно оценить, разделив солнечную постоянную (136 мВт/см^2=1,95 кал/(см^2·мин) на величину ночного излучения, что дает значение 3,5, то есть примерно за 3,5 часа роса должна испариться.

Здесь следует сделать некоторые уточнения, связанные с тем, что в атмосфере существует противоизлучение. На высоте z мы наблюдаем не только нисходящий поток излучения A(z), но и восходящий поток B(z), в результате в слой Δz на высоте z поступает энергия: D=A(z)-A(z +Δz)+B(z+Δz)-B(z).

Величина D называется дивергенцией излучения (радиации) в слое Δz. При отрицательном значении дивергенции потоки излучения приводят к нагреванию слоя, а при положительной дивергенции к охлаждению. В атмосферном «окне» между длиной волны (λ) равной 8,5 и 12,0 мкм атмосфера почти прозрачна для инфракрасного излучения. В это окно уходит до 20% излучения от земной поверхности. Эффективное излучение земной поверхности R равно разности излучения земли и поглощенного ей излучения атмосферы: $R=\varepsilon(\sigma T^4 - E_a)$.

Следует заметить, что, например, в Австралии ночью в приземном слое воздуха наблюдалась существенная дивергенция радиации на высотах 0,5-1,5 м. В осенне-зимний период ночью это значение составляет 1,33 мВт/см^3. Такая дивергенция

должна охлаждать воздух на 3,7°С в час, а при ясном небе – даже на 6°С [Хргиан, 1978]. В течение ночи должно происходить сильное охлаждение поверхности. Это явление, как известно, наблюдается в различных регионах мира. Например, на Ближнем Востоке и в Северной Африке суточные амплитуды температур могут достигать нескольких десятков градусов: Туггурт (Алжир) – 57°С, Ин-Салах (Алжир) – 66°, Тегеран (Иран) – 48°С и т.д. В прибрежных районах значительную роль в процессе функционирования конденсации может играть бризовая циркуляция. Бризовая скорость воздуха приблизительно равна 2 м/с на один градус разности температур. Направление бриза в течение дня меняет свое направление.

Как известно, вода и некоторые другие полярные жидкости способны образовывать при малом недонасыщении (порядка 95%) полимолекулярные адсорбционные слои на гидрофильной поверхности стекла [Дерягин и др., 1958]. Толщина полимолекулярных слоев воды существенным образом зависит от степени очистки поверхности кварца, ее гидрофильности. Чем лучше очищена поверхность кварца и чем выше ее гидрофильность, тем толще были и полимолекулярные пленки воды, находившиеся в в равновесии с недонасыщенным паром. Так на предельно гидролизованной поверхности кварца толщина адсорбционных пленок воды достигла 270 Ангстрем при недонасыщении равном 98%. Уравнение У.Томсона (Кельвина) устанавливает зависимость давления насыщенного пара над жидкостью от кривизны ее поверхности: $N_A kT\ln(P^g/P^o)=v^f(P^g - P^o + \sigma 2/R)$,

где N_A – количество молекул газа в рассматриваемом объеме k – постоянная Больцмана ($1{,}3807\cdot10^{-23}$ Дж/К), Т – температура в градусах Кельвина, P^g – давление насыщенного пара над искривленной поверхностью, P^o – давление насыщенного пара над плоскостью, R – радиус капли или мениска, v^f – парциальный объем жидкости, σ – коэффициент поверхностного натяжения. Давление насыщенного пара над малыми капельками повышено, а в малых пузырьках или под вогнутым мениском – понижено по сравнению с плоской поверхностью. Поэтому возможна капиллярная конденсация. Когда $N_A kT >> v^f P^g$ формула упрощается, и правая часть оказывается приближенно равной $2\sigma v^f/R$. Для капли воды радиусом 1 мм выражение под знаком логарифма составляет 10^{-6}, а для капли радиусом 1 мкм эта величина равна 10^{-3}. Следовательно, в тумане очень маленькие капли испаряются, а более крупные растут. Все они неустойчивы по отношению к образующемуся, в конце концов, резервуару жидкости. Поэтому там, где имеется сильно разветвленная поверхность, капли тумана быстро конденсируются на этой поверхности. Когда радиус отрицателен – это соответствует мениску. Поэтому в этом случае конденсация происходит при значении упругости пара меньшем, чем концентрация насыщенного пара над плоской поверхностью. Если в каждом следующем слое количество капилляров увеличивается в 4 раза, то для подъема Н в слоистой фрактальной структуре мы будем иметь значение $H = h_n + h_{n-1} + \ldots\ldots + h_1 + h_o$, где величины высот слоев удовлетворяют условию

$$2\sigma/(\rho g r_n) = h_n + 1{,}457h_{n-1} + (1{,}457)^2 + \ldots\ldots + (1{,}457)^n h_o ,$$

где n - номер слоя, а для радиусов капилляров выполняются условия:

$r^{i-1}=(1+\sqrt{2})r^i$

Радиус самого большого капилляра выражается через радиус самого маленького следующим образом: $R=(1+\sqrt{2})^n r^n$. Эта формула применима для радиусов капилляров, лежащих в пределах $0{,}5\cdot10^{-7} < r < 10^{-4}$ см, т.к. если радиус капилляра сравним

с радиусом молекулы, т.е. порядка 10^{-8} см, то она теряет физический смысл. Для капилляров с радиусом, большим 10^{-4} см, давление насыщенного пара над мениском практически с точностью до 0,1% равно давлению насыщенного пара над плоской поверхностью. Давление насыщенного пара над мениском в 10 раз меньше давления насыщенного пара над плоской поверхностью, если радиус капилляра $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ мкм. Для радиуса капилляра 0,1 мкм давление насыщенного пара практически не отличается от давления пара над плоской поверхностью с точностью до 1%.

Использование капиллярной конденсации существенно понижает энергетические расходы холодильной системы. Еще в 1957 г. профессор Н.Холин и инженер Г.Щедриков в условиях Крыма использовали явление капиллярной конденсации при получении воды для поливки виноградников. Бурили в земле скважины и в них заливали несколько литров воды. А через несколько часов в каждой такой скважине количество воды увеличивалось до 25 л. Это позволило сохранить в Крыму 15 тыс. га виноградников от засухи.

В капиллярно-пористых телах влага в виде жидкости перемещается по направлению потока тепла (от горячих к холодным местам) в силу нескольких механизмов: благодаря термодиффузии, капиллярной термовлагопроводности и движения защемленного воздуха. Суть явления капиллярной термовлагопроводности объясняется следующим образом. Если имеется в капиллярной трубке столбик жидкости, ограниченный двумя менисками, то при наличии перепада температуры вдоль трубки столбик жидкости будет перемещаться по направлению уменьшения температуры, так как поверхностное натяжение в области более высоких температур будет меньше. Отметим, что данное явление будет способствовать заталкиванию ночной росы осевшей на вершине бархана во внутрь, т.к. утренние лучи будут разогревать поверхность бархана, и влага будет стремиться уйти в область более низких температур. Термовлагопроводность в пористом теле может быть также вызвана другой причиной – наличием «защемленного» (не сообщающегося с наружным) воздуха. При повышении температуры давление «защемленного» воздуха увеличивается, пузырьки воздуха расширяются, в результате чего жидкость в капилляре проталкивается по направлению потока тепла.

Для процесса конденсации воды из атмосферного воздуха немаловажную роль играют географические условия. Из них наиболее важными являются следующие: глобальная циркуляция воздуха, горные области, высота над уровнем моря, расстояние от побережья. Перемещение потоков перенасыщенного морского воздуха может достигать вглубь суши на расстоянии 5 км, но возможно и до 25 км. По мере того как морской поток воздуха проникает вглубь континента, есть большая вероятность того, что он смешается с воздухом суш и рассеивается. Тем не менее, есть много районов в глубине континентов, где этого не происходит: пустыни Атакама в Южной Америке, Намиб в Южной Африке. Кроме того, для процесса конденсации в прибрежных областях особенно важным является бризовая циркуляция. Во многом поэтому, прибрежные районы являются наиболее подходящим местом для получения конденсационной воды из атмосферного воздуха (рис. 3) [Алексеев, Берёзкин, 1998].

Примером исследования естественной конденсации могут служить и горные районы, например, Крыма. Горный Крым – классический пример голого карста со всевозможными промоинами, воронками, колодцами и всякого рода пустотами – является не только естественным аккумулятором талых и дождевых вод, но и

обладает всеми микроклиматическими условиями конденсации воды. Наиболее представительными являются оценки конденсации для западной части Долгоруковского массива Горного Крыма [Дублянский, 1969]. По этим оценкам, соотношение объема конденсационной влаги к объему карстовых пустот составило 8 л/м^3 в сутки при доле таких пустот 3% от общего объема пород. Среднегодовая величина конденсации составляет в этом районе 7% нормы осадков. Модуль подземного стока за счет конденсации равен 1.4 л/сек. Существуют расчеты конденсации в восточной части горного Крыма: 40 мм/год при годовой норме осадков 535 мм и испарении 435 мм [Штенгелов, 1972].

Рис. 3. Районы, где возможно или осуществляется получение конденсационной воды из атмосферного воздуха.

Литература

Авакян А.В. Опреснение воды в природе и народном хозяйстве. – М.: Наука, 1987.

Алексеев В.В. Установка интенсификации образования и сбора росы. Патент РФ № 2184815 от 10 июля 2002. Приоритет от 12.09.2000.

Алексеев В.В., Алексеева О.В. Установка получения биологически чистой пресной воды при конденсации влаги из атмосферного воздуха. Патент РФ. № 2185482 от 10.07.2002. Приоритет от 25.07.2000.

Алексеев В.В., Берёзкин М.Ю. Пресная вода из атмосферного воздуха // Природа. – 1998. № 6. – С. 90-96.

Алексеев В.В., Берёзкин М.Ю., Иванов В.П. Глобальные проблемы нехватки пресной воды и эффективные пути их решения. – М.: Изд-во МГУ, 2005.

Алексеев В.В., Дворянинов А.Д. Установка с радиационным охлаждением для получения пресной воды из влажного воздуха. Патент РФ № 2182623 от 20.05.2002. Приоритет от 24.01.2000.

Алексеев В.В., Красовская Т. М. Водяные пары как источник пресной воды в аридных районах земного шара // Проблемы освоения пустынь – 1997. №5.

Аполов Б.А. Учение о реках. М.: Изд-во МГУ, 1963.
Демкин В.В., Ногин С.В. Дистилляционные опреснительные установки // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1997. № 6. – С.16-18.
Дублянский В.Н. Методика расчета конденсации влаги в трещинно-карстовых коллекторах // Бюллетень НТИ. Серия гидрология. 1969. № 6.
Колдин М.В. Опреснительная технология: энергетика и экология // Химия и технология воды. – 1986. Т.8. № 6.
Пилипченко А.Т., Вахин И.Г., Максин В.И. Развитие методов опреснения вод // Химия и технология воды. 1991. Т.13. № 8.
Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Т.1, 2. – Л.: Гидрометиздат, 1978.
Штенгелов Е.С. Гидрогеологические условия и особенности карста восточной части Горного Крыма. – М.: 1972.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

К.В.ЧЕКАРЕВ, А.М.ЗАЛИХАНОВ

Основными источниками пресной воды принято считать поверхностные и подземные воды. Между тем значительным естественным ресурсом являются водные пары в атмосфере с содержанием в воздухе от 2 до 25 г/м³ (в зависимости от географических условий). Для извлечения пресной воды из атмосферного воздуха создаются специальные конструкции, в которых обеспечиваются условия для конденсации пресной воды. Опыты по конденсации проводятся во многих странах мира и, в частности, в лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ [Алексеев, Берёзкин, Иванов, 2005; Соловьев, Чекарев, 2009; Берёзкин и др., 2016].

Наиболее актуальной является задача определения достоверных значений коэффициентов конденсации на границе раздела «вода-воздух». Для ее решения были поставлены прецизионные эксперименты по исследованию конденсации паров воды в воздухе в естественных условиях на неподвижную плоскую водную поверхность. Была создана экспериментальная установка с климатической камерой, моделирующая различные географические условия. В ней размещалась мерная кювета с водой, на которую происходила конденсация при заданных параметрах влажности воздуха и температуры поверхности воды. Измерения температуры воздуха и воды в кювете производились платиновыми датчиками марки 700-102ВАА-В00 с габаритами 0,0021х0,0023х0,0009 м.

Точность измерения температуры этими датчиками составляла 0,1°С. Датчик измерения влажности марки ИРТВ обеспечивал измерение относительной влажности в климатической камере с погрешностью, не превышающей 0,25% единицы младшего разряда. Влажность воздуха в климатической камере создавалась парогенератором, влагоотдача которого регулировалась реле, изменяющим напряжение электропитания нагревателя воды.

Прецизионный метод измерения скорости конденсации влаги (плотности потока массы) на водную поверхность при заданных параметрах основывался на определении разности весов воды в мерной кювете до и после эксперимента с высо-

кой степенью точности. Анализ существующих методик измерений и расчета параметров конденсации привел к заключению о том, что одной из причин значительных погрешностей измерения скорости конденсации, является неопределенность установления истинных значений температуры водной поверхности, с помощью которой определяется давление или плотность паров воды по линии насыщения. Температура, фиксируемая при непосредственных контактных измерениях, в пределах порядка (10 ÷15) % остается неопределенной. Для повышения степени достоверности при определении температуры водной поверхности нами предложен и апробирован способ трендовой интерполяции графиков зависимости температурного коэффициента $\gamma = dT_{z\infty}/dT_{\infty}$ с расстоянием от водной поверхности. Этот коэффициент определялся по вертикальным профилям температур $T_{z\infty}$ воздуха, измеренных датчиками, от температуры T_{∞} в климатической камере. Расчет температуры поверхности воды T_s в таком случае можно было производить по формуле $T_s = \gamma \cdot T_{\infty}$ со значением температурного коэффициента, которое устанавливалось аппроксимацией кривой указанной выше зависимости до пересечения с уровнем воды. Выполненные оценки показали, что за счет уточненной процедуры погрешности, вносимые в измерения скорости конденсации неточным определением температуры межфазной поверхности, снижались до величины, не превышающей 2%.

Другой, не менее существенной причиной возможной недостоверности измеренных значений конденсации, является отсутствие оценок поправок, которые надо вносить в измерения скорости конденсации за счет учета разных объемов испарений, уходящих с мерной кюветы в процессе измерений за различные промежутки времени проведения эксперимента. К причинам разногласий измеренных значений скорости конденсации также относится не учет контроля за величины весовых погрешностей, вносимых испарением в мерный резервуар в процессе установления заданных условий эксперимента и при осуществлении процедуры взвешивания. В результате анализа методики конденсационных измерений были установлены конкретные значения поправок к весам конденсата, которые оказались зависящими от разности температурных и влажностных условий внутри и вне климатической камеры. Относительные величины таких поправок, достигали значений порядка 50%. По итогам тарировочных измерений разработана уточненная методика проведения экспериментов, позволяющая определять систематическую ошибку, вносимую в конденсацию неучтенным испарением. Составлена таблица потерь количества сконденсировавшейся воды при выставлении заданных стационарных условий в климатической камере в заданном интервале времени и при переливе воды из мерной кюветы в мерную колбу для взвешивания. Определенное таким образом количество потерь воды учитывалось при расчетах конденсата во время эксперимента. Абсолютная погрешность метода измерения составила: для плотности пара в климатической камере ($\pm 1{,}2\cdot10^{-5}$ кг/м^3), для скорости конденсации ($\pm 10^{-6}$ кг/(м^2·сек)).

Обсуждение результатов. Формула Герца-Кнудсена, используемая в качестве исходной для вычисления коэффициента конденсации, получена в рамках модели, в которой максвелловская функция распределение скоростей молекул, движущихся к межфазной границе и от нее одинакова [Кучеров, Рикенглаз, 1960]:

$$j = K_c \sqrt{\frac{R}{2\pi\mu}} \left[\rho_\infty \sqrt{T_\infty} - \rho_s \sqrt{T_s} \right] \qquad (1)$$

Здесь K_c -коэффициент конденсации; j плотность потока массы, ρ-плотность; T – температура; R - универсальная газовая постоянная; μ - молекулярная масса; s – индекс жидкости; ∞ - индекс пара.

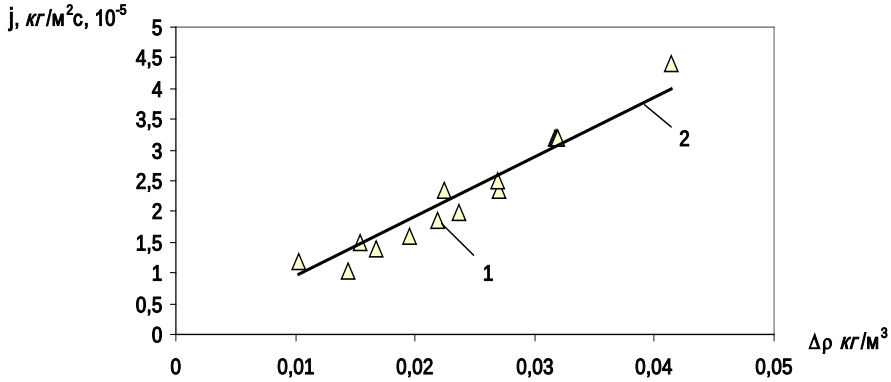


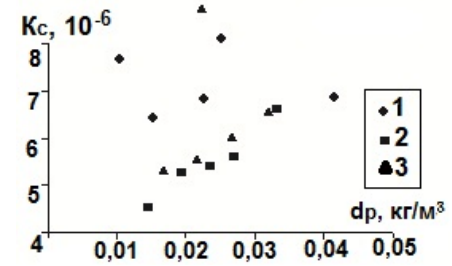
Рис. 1. Скорость конденсации j (кг/м²с) в зависимости от разности плотностей пара в воздухе и насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды $\Delta\rho = \rho_\infty - \rho_s$ *(кг/м³) и влажности воздуха RH (50−80) %: 1 – эксперимент; 2 – расчет по формуле (2) с числом Дальтона* K_D*=0,000974 м/с.*

Формулой Герца-Кнудсена предусматривается равенство коэффициентов испарения и конденсации, в процессе определения потока массы конденсата на поверхность. Последующие уточнения формулы для различных чисел Кнудсена не изменили ее структуру и привели к числовым поправкам коэффициентов конденсации и испарения в пределах одного порядка [Kryukov, Levashov, 2011; Marek, Straub, 2001].

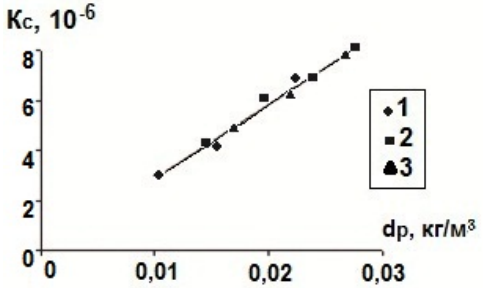
Параллельно молекулярно-кинетическому подходу используется феноменологическое описание процессов переноса влаги с представлением в виде формулы Дальтона: $j = K_D (\rho_\infty - \rho_s) \cdot$ (2)

Число Дальтона K_D является однозначной характеристикой процесса переноса массы и знания его величины вполне достаточно для решения многочисленных задач динамики тепломассопереноса на межфазных поверхностях различной формы.

Об этом свидетельствуют данные по конденсации воды, полученные в наших экспериментах с уточненной методикой учета корректирующих поправок на скорость конденсации. Из представленных на рис. 1 данных измерений следует, что в пределах 15% разброса значений скорость конденсации паров атмосферной влаги на водную поверхность удовлетворяет линейному закону пропорциональности дефициту плотностей пара.



а)



б)

Рис. 2. Зависимость коэффициента конденсации от разности плотностей пара в воздухе. Данные измерений: 1-RH=80%,T∞=(303-313)K,Ts=(288-291)K; 2-RH=80%, T∞=313K, Ts=(281,2-301,2)K;3-RH=(50-80)%, T∞=313K, Ts=281,2K. Сплошная линия – расчет по формуле (3).
а) – с данными измерений без учета корректирующих поправок на испарение, б) – с измерениями по уточненной методике.

При этом значения коэффициента конденсации, рассчитанные по формуле Герца-Кнудсена, для тех же условий, без учета корректирующих поправок, оказываются изменяющимися в довольно широких пределах с разбросом до 45% (рис. 2а). Причем, характер зависимости отклонений коэффициента конденсации от разности плотностей паров в воды в воздухе неодинаково изменяется при вариациях температур воздуха, воды и влажности. Из сравнения формул Герца-Кнудсена и Дальтона получаем:

$$K_c = \frac{K_D}{\sqrt{\frac{R}{2\pi\mu}\left[\rho_\infty\sqrt{T_\infty} - \rho_s\sqrt{T_s}\right]}}\Delta\rho \qquad (3)$$

Расчет коэффициента конденсации по этой формуле оказывается в удовлетворительном согласии с данными по уточненной методике измерений (рис. 2б). Сравнительный анализ этих данных с результатами, полученными в работе [Marek Straub, 2001; Davis, 2006], свидетельствует о том, что большая часть хаотического массива значений коэффициента конденсации в системе воздух – вода, отличается величин, полученных в наших экспериментах. Относительно большие расхождения в значениях коэффициента конденсации, вероятнее всего, являются следствием экспериментальных систематических ошибок, связанных с неучтенным вкла-

дом в конденсацию испарения. При существовании условий для конденсации, испарение с поверхности воды относительно невелико. Процесс конденсации является своеобразной крышкой, блокирующей выход молекул в направлении от границы раздела фаз [Соловьев, Чекарев, 2009]. Как только возникают условия для испарения, начинается интенсивный выход молекул с межфазной границы, при этом интенсивность конденсации существенно снижается. Полученные результаты следует использовать для точной оценки количества извлекаемой атмосферной влаги в установках для производства пресной воды.

Выводы

- В результате проведенных исследований были выявлены недостатки измерения конденсации воды при моделировании различных естественных условий.
- Разработана уточненная методика проведения экспериментов, позволяющая определять систематическую ошибку, вносимую в конденсацию неучтенным испарением.
- В прецизионных экспериментах по исследованию конденсации атмосферной влаги на границе раздела «вода-воздух» установлены значения коэффициентов скорости конденсации, необходимые для расчетов производительности конденсационного способа получения пресной воды.

Литература

Алексеев В.В., Берёзкин М.Ю. Пресная вода из атмосферного воздуха // Природа. – 1998. № 6. – С. 90-96.

Алексеев В.В., Берёзкин М.Ю., Иванов В.П. Глобальные проблемы нехватки пресной воды и эффективные пути их решения. М.: Из-во МГУ, 2005 – 91 с.

Берёзкин М.Ю., Залиханов А.М., Синюгин О.А., Соловьев А.А., Чекарев К.В. Ресурсы конденсационной воды в естественных условиях // Процессы в геосредах. 2016. №1(5). С.12-17.

Кучеров Р.Я., Рикенглаз Л.Э. К вопросу об измерении коэффициента конденсации // Доклады АН СССР. 1960. Т.133. Вып.5. С.1130-1131.

Соловьев А.А., Чекарев К.В. Экспериментальные исследования конденсации паров атмосферной влаги на водную поверхность // Физические проблемы экологии. №16. М.: Макс Пресс, 2009. С.252-262.

Davis E.J. A history and state-of-the-art of accommodation coefficients// Atmospheric Research. 2006. V.82. P.561–578.

Kryukov A.P., Levashov V.Yu. About evaporation–condensation coefficients on the vapor-liquid interface of high thermal conductivity matters // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. V.54. P.3042–3048.

Marek R, Straub J. Analysis of the evaporation coefficient and the condensation coefficient of water// Journal of Heat and Mass Transfer. 2001. V.44. P.39–53.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА

К.В.ЧЕКАРЕВ

Низкопотенциальное тепло является одним из самых распространенных видов возобновляемых источников энергии как природного, так и промышленного происхождения. Оно используется во многих областях человеческой деятельности. Ввиду большого разнообразия источников низкопотенциального тепла его преобразование осуществляется различными способами и с помощью различных устройств. Для разработки новых способов представляется целесообразным рассмотреть основные способы преобразования низкопотенциального тепла, которые применяются в настоящее время, а также привести примеры инновационных подходов к решению задачи повышения потенциала при тепловой конверсии энергии.

Способы преобразования низкопотенциального тепла. В настоящее время к достаточно разработанным устройствам реализующих процесс преобразования низкопотенциального тепла относятся тепловые насосы [Мартыновский, 1955]. В тепловых насосах осуществляется перенос тепловой энергии от источника с низкой температурой к потребителю тепла с более высокой температурой. Устройство тепловых насосов аналогично устройству холодильных машин и включает два теплообменника, на одном из которых выделяется тепло, но в отличие от холодильника, выделяемое тепло передается потребителю, а не рассеивается во внешнюю среду. Использование тепловых насосов обусловлено тем, что производство с их помощью тепла в 3-5 раз выгоднее, чем получение его с использованием электричества. В настоящее время для работы тепловых насосов используется тепловая энергия природных источников, включающих окружающий воздух, грунтовые подземные воды, теплоту грунта и т.д. Также используется тепловая энергия, образующаяся в результате хозяйственной деятельности человека, например, удаляемый вентиляционный воздух, канализационные стоки, промышленные сбросы, тепло технологических процессов и т.д. Конструктивные и энергетические характеристики тепловых насосов тесно связаны с особенностями источника низкопотенциального тепла. Так, при использовании грунта в качестве источника тепла в землю на глубину ниже уровня промерзания укладывается трубопровод, в котором циркулирует антифриз. В водоемах трубопровод укладывается на дно. Основным требованием, предъявляемым к источникам низкопотенциального тепла, является стабильность температуры и энергетическая емкость. Температурный режим глубинных слоев грунта не зависит от суточных и сезонных колебаний и является идеальным вариантом для тепловых насосов. Стабильностью отличаются источники, образующиеся в результате хозяйственной и производственной деятельности человека.

Первый тепловой насос был создан в 1855 г. на основе теоретических разработок английского физика Томпсона. Широкое распространение тепловых насосов началось с 1970-х гг. после первого энергетического кризиса. В настоящее время только в Японии работает несколько миллионов тепловых насосов.

Низкопотенциальное тепло можно использовать для совершения работы. Один из способов – совершение работы с помощью тепловых машин. Однако этот способ связан с большими трудностями, одна из которых - отсутствие безопасного

рабочего тела с низкой температурой кипения. Были предприняты попытки построить тепловую машину, работающую на низкопотенциальном тепле, источником которого являлась теплая вода поверхностного слоя океанов, источник с неограниченной энергетической емкостью и стабильной температурой для экваториальных областей Мирового океана. Еще в 1881 г. француз Жак Арсен высказал идею термодинамического преобразования этого вида энергии и разработал методику, называемую OTEC (Ocean thermal energy convertion) [Вершинский,1986]. Поскольку КПД термодинамического цикла тепловой машины определяется разностью температур, для его повышения Арсен предложил использовать холодную воду океанских глубин для повышения разности температур. При максимальной разности, которая может быть получена в экваториальных областях Мирового океана, теоретический КПД установки не превышает 6-7%.

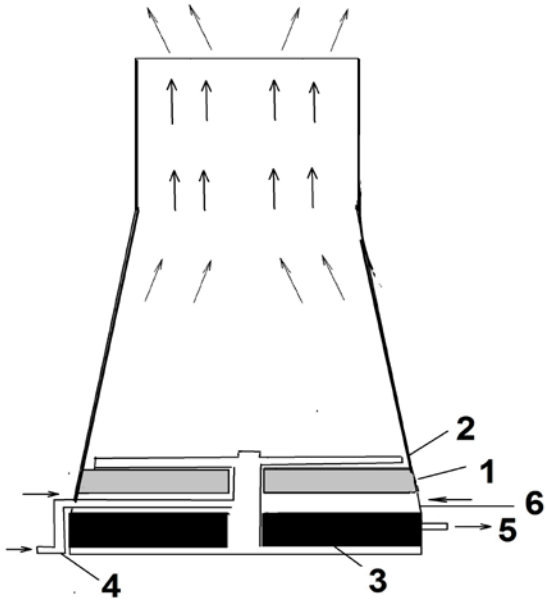


Рис. 1. Схема испарительной башенной градирни.
1 – ороситель,2 – водораспределительная система, 3 – водосборный бассейн, 4 – вход теплой воды, 5 – выход охлажденной воды, 6-вход наружного воздуха

По местонахождению станции OTEC подразделяются на береговые, шельфовые и плавающие. Каждый тип станции имеет свои преимущества и недостатки. Береговым станциям не нужны длинные кабели для передачи вырабатываемого электричества, но они нуждаются в длинном трубопроводе для забора холодной воды с больших глубин. Плавающие OTEC являются оптимальными для станций большой мощности, поскольку условия для забора теплой и холодной воды наилучшие, однако из-за отдаленности от берега возникают проблемы с поставкой вырабатываемого электричества потребителю. Хотя идея создания станции OTEC

была высказана в 1881 г., первая станция была создана только в 1930 г. и ее мощность составила 22 кВт. Спустя 40 лет в 1970 г. японской фирмой была построена ОТЕС, которая вырабатывала 120 кВт. В настоящее время создание станций ОТЕС большой мощности находится на экспериментальной стадии.

Другим способом использования низкопотенциального тепла с древних времен по настоящее время является создание с его помощью воздушного потока в пространстве в виде вертикальной открытой на концах трубы. Теплый воздух в таком пространстве, по закону Архимеда, поднимается вверх, при этом внутри трубы возникает воздушный поток, скорость которого определяется разностью температур теплого воздуха внутри трубы и наружного воздуха, а также высотой трубы. Этот метод широко используется в быту и промышленности, например, в устройствах типа камин или в промышленных печах, используемых для различных целей.

Использование низкопотенциального тепла в градирнях башенного типа. Когда появились тепловые машины большой мощности, возникла необходимость их охлаждения. Наиболее эффективным оказалось охлаждение с помощью воды. При отсутствии постоянного источника холодной воды теплую воду, прошедшую через тепловую машину, стали охлаждать с помощью воздушных потоков в устройствах, называемых градирнями, и повторно использовать для охлаждения тепловых машин. Градирня представляет собой высокую вытяжную башню с воздуховходными окнами в ее основании (рис. 1). Внутри башни осуществляется теплообмен между развитой поверхностью теплой воды и потоком наружного воздуха, поступающего в башню через воздуховходные окна. С этой целью внутри бащни размещаются водораспределительная система и находящееся под ней оросительное устройство. С помощью водораспределительной системы теплая вода разбрызгивается на мелкие капли, которые падают на оросительное устройство. Оно, как правило, выполняется из вертикально расположенного набора плоских щитов, по которым вода стекает тонкой пленкой вниз в подоросительное пространство и затем в водосборный бассейн. В результате контакта развитой поверхности теплой воды с поступающим внутрь башни наружным воздухом при испарении и контактном теплообмене вода охлаждается, а поступающий наружный воздух нагревается. Нагретый воздух, поднимаясь вверх, выходит через верхний конец вытяжной башни, создавая при этом внутри башни вертикальное воздушное течение, постоянно поддерживаемое входящим через воздуховходные окна радиально направленным потоком наружного воздуха.

Данное устройство градирен башенного типа имеет ряд недостатков. Некоторые из них могут быть сравнитено просто устранены. Эффективность работы градирни зависит от равномерности распределения поступающего внутрь башни потока наружного воздуха. Поскольку в существующих конструкциях башенных градирен поток наружного воздуха является радиально направленным горизонтальным потоком, который затем превращается в вертикальный поток, поэтому в градирнях существуют области, в которые поток наружного воздуха не попадает.

Для достижения более равномерного распределения внутри башни потока наружного воздуха предложено ввести в конструкцию градирни воздухонаправляющие щиты [Соловьев, Нигматулин и др., 2003]. Они должны были располагаться в воздуховходных окнах под углом к радиусу основания башни. В градирне с воздухонаправляющими щитами поток наружного воздуха направляется не вдоль ра-

диуса к центру основания градирни, а под углом к ней [Соловьев, Аксютин и др., 2015]. В результате создания условия для уменьшения мертвых зон для потока наружного воздуха и увеличения времени его взаимодействия с развитой поверхностью теплой воды в подоросительном пространстве.

Автоматический поворот воздухонаправляющих щитов позволял, при различных метеорологических условиях регулировать интенсивность поступающего в башню воздушного потока. Возможность такой регулировки потоков имеет особенное значение для достижения оптимального значения охлаждения воды в градирне как при экстремально низких температурах атмосферного воздуха в зимний период времени, так и высоких летних температурах. Модернизированная градирня с системой воздухорегулирующих устройств была успешно реализована на одной из российских атомных станций и показала надежность работы, как в летних, так и в зимних условиях [Kazarov, 2014].

Несмотря на результативность предложенных технических решений, в действующих конструкциях градирен все еще остаются недостатки, связанные с тем, что при их создании не учитывались гидродинамические процессы, оказывающие влияние на тепломассообмен теплой воды с холодным наружным воздухом. Тепломассообмен в градирнях осуществляется в двух процессах. Во-первых, в процессе испарения капель, которые образуются с помощью форсунок водораспределительной системы. Капли падают на вертикально расположенные щиты оросительного устройства и превращаются в тонкие пленки, которые после стекания с оросителя превращаются в струйные потоки, падающие в водосборный бассейн. Во- вторых, при теплообмене струйные водные потоки, стекающие с оросительного устройства взаимодействуют с входящим в градирню потоком наружного воздуха. В результате чего поток наружного воздуха очень быстро нагревается и становится насыщенным. Входящий воздушный поток, продолжая свое перемещение, попадает на щиты оросительного устройства, где он вступает в контакт с развитой поверхностью воды в виде стекающих тонких пленок. Но воздух в потоке к этому моменту уже нагрелся и стал насыщенным, эффективность контактного теплообмена со стекающими водными пленками снижается. Таким образом, оросительное устройство, расположенное внутри вытяжной башни, не выполняет в полной мере своей функции интенсификации процесса тепло-массообмена. При этом за счет аэродинамического сопротивления, вносимого в поток оросителем, практически полностью заполняющим пространство градирни, создаются условия для уменьшения тяги вертикального потока в башне и, как следствие этого, снижение охладительной способности.

Устранение этого недостатка возможно путем разделения функций вытяжной башни, с одной стороны, создания вертикального воздушного потока и, с другой стороны, расширения области действующего орошения, в котором происходит контактный теплообмен водных токов с наружным воздухом и тепломассообмен при испарении. Для разделения охладительных функций, в [Соловьев, Чекарев, 2014] была предложена конструкция градирни с внешним теплообменом, схема которой приведена на рис. 2.

В такой градирне водораспределительная система и оросительное устройство выносятся из вытяжной башни и располагаются в кольцевой зоне вокруг нее. При этом теплая вода подается на оросительное устройство сверху, а поток наружного воздуха поступает под прямым углом к потоку теплой воды, стекающей тонкой

пленкой со щитов оросительного устройства. В традиционных конструкциях градирен с внутренним теплообменом оросительное устройство располагается внутри вытяжной башни. Они относятся к противоточным башенным испарительным градирням с естественной тягой. В оросителях этих градирен воздушный и водный поток движутся навстречу друг другу, хотя в подоросительном пространстве воздух и струйные потоки воды имеют поперечное направление. При этом взаимодействие, аналогичное взаимодействию потока наружного воздуха с потоками стекающей воды в подоросительном пространстве противоточных градирен, исключается, вследствие чего интенсивность теплообмена уменьшается. Для повышения интенсивности теплообмена в градирне с внешним теплообменом, предложено оросительное устройство, выполненное в виде воздухонаправляющих щитов, расположенных снаружи вытяжной башни под углом к радиусу основания башни. Расположение воздухонаправляющих щитов под углов к радиусу основания вытяжной башни увеличивает длину пробега, а, следовательно, и время контакта наружного воздуха с развитой поверхностью теплой воды, что увеличивает интенсивность теплообмена.

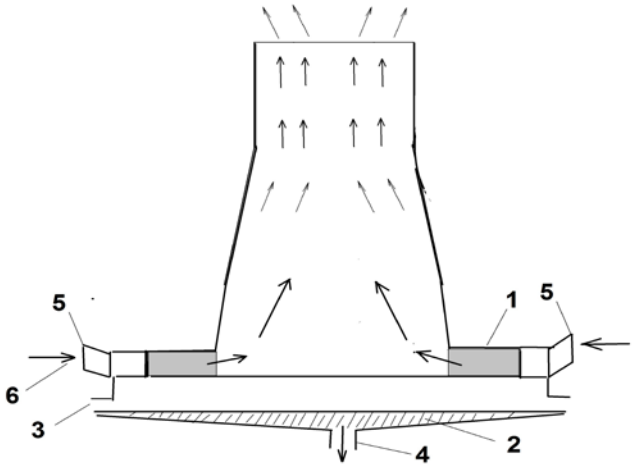


Рис. 2. Схема градирни с внешним теплообменом. 1 – ороситель, 2 – бассейн, 3 – вход теплой воды, 4 – выход охлажденной воды, 5 – воздухорегулирующие щиты, 6 – вход наружного воздуха

С помощью математического моделирования была проведена оценка эффективности охладительной способности градирен с внутренним и внешним теплообменом. Результаты расчетов показали преимущество градирен с внешним теплообменом в использовании низкопотенциального тепла при охлаждении оборотной воды. Другим важным направлением поиска является расширение области использования низкопотенциального тепла. Примером может служить создание аэродинамических установок парниковых электростанций, в которых электричество произво-

дится с помощью вертикального воздушного потока, создаваемого с помощью низкопотенциального тепла.

Использование низкопотенциального тепла в аэродинамических энергетических установках. Впервые установка для производства электроэнергии с помощью вертикального воздушного потока, создаваемого в высокой трубе в результате конверсии солнечного излучения в низкопотенциальное тепло, была реализована в Испании. В 1982 г. была построена аэродинамическая установка, названная «солнечным камином» (solar chimney) [Schlaich, 2005]. Установка содержит вытяжную трубу, вокруг которой расположен солнечный коллектор, выполненный в виде прозрачной пленки, находящейся на некотором расстоянии от земли и открытый по периметру. Внутри вытяжной трубы находится ветровое колесо, соединенное с электрогенератором. Установка работает следующим образом. Днем солнечное излучение, проходя через прозрачное перекрытие солнечного коллектора, нагревает находящийся под ним воздух, превращая, таким образом, солнечное излучение в низкопотенциальное тепло. Теплый воздух поступает в вытяжную трубу и поднимается вверх, создавая в ней вертикальный воздушный поток. Этот поток вращает находящееся в трубе ветровое колесо, а соединенный с колесом электрогенератор, вырабатывает электрический ток.

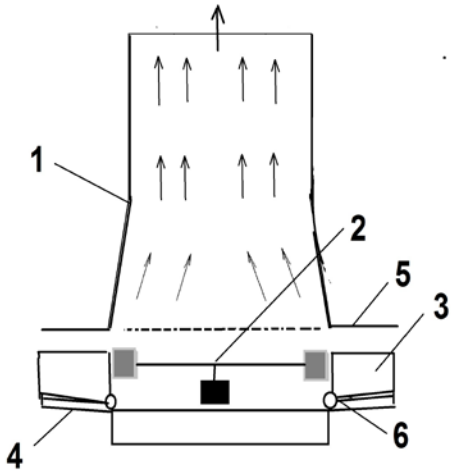


Рис. 3. Схема аэродинамической градирни с внешним теплообменом. 1 – вытяжная башня,2 – ветровое колесо с электрогенератором,3 – воздухорегулирующие щиты, 4 – кольцевое основание, 5 – крышка, 6 – водораспределительная система.

В работе [Соловьев, Чекарев, Малых, 2016] описана разработанная авторами аэродинамическая установка для производства электроэнергии, созданная на базе башенной градирни, в которой для работы используется низкопотенциальное теп-

ло оборотной охлаждаемой воды. Схема аэродинамической градирни с внешним теплообменом представлена на рис. 3.

Установка содержит вытяжную башню, в основании которой находится ветровое колесо, соединенное с электрогенератором. Оросительное устройство находится вне башни. Оно выполнено в виде воздухонаправляющих щитов, расположенных на кольцевом основании вокруг башни. Наклонные плоскости оросителя расположены под углом к радиусу основания вытяжной башни и сверху закрыты крышкой. С помощью водораспределительной системы теплая вода разбрызгивается в виде струй, которые, попадая на наклонные плоскости оросителя, стекают по ним тонкой пленкой.

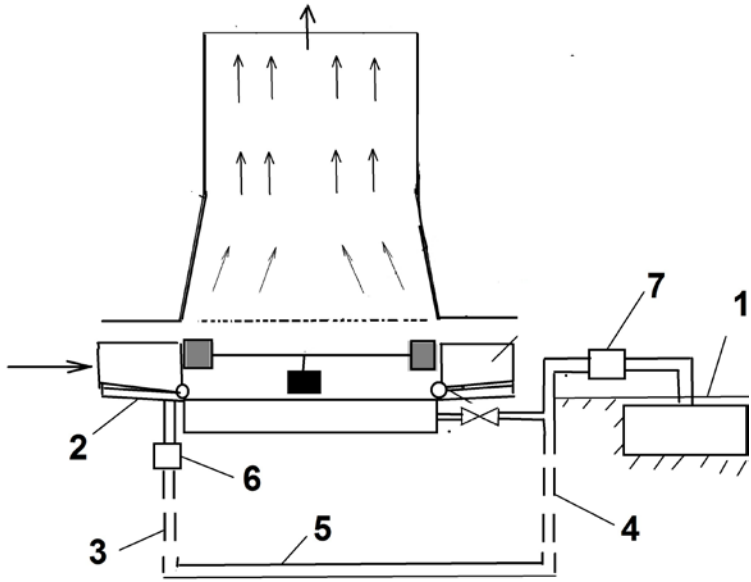


Рис. 4. Схема аэродинамической установки для преобразования низкопотенциального геотермального тепла в электричество 1 – источник пресной воды, 2 – водораспределительная система, 3 и 4 – вертикальные скважины, 5 – горизонтальная перемычка, 6 – насос высокого давления, 7 – гидравлический насос

Таким образом, развитая поверхность теплой воды оказывается представленной в виде струй, поднимающихся вверх, и в виде тонких пленок, стекающих с воздухонаправляющих щитов, что увеличивает время, а, следовательно, и интенсивность теплообмена. Нагретый при теплообмене воздух поступает в вытяжную башню и создает в ней вертикальный воздушный поток, при этом в пространство между кольцевым основанием и крышей поступает поток наружного воздуха. При поступлении в башню нагретый наружный поток ударяется в лопатки ветрового колеса, заставляя вращаться его и соединенный с ним электрогенератор, вырабатывающий электричество.

Было высказано предложение, распространить аэродинамический способ преобразования низкопотенциального тепла в электроэнергию, на другие источники низкопотенциального тепла, в частности, на низкопотенциальное геотермальное тепло. Использование низкопотенциального геотермального тепла имеет то преимущество, что в этом случае не нужно бурить глубокие скважины. В отличие от традиционного преобразования низкопотенциального тепла с помощью тепловых машин в данном способе не применяется опасное рабочее тело с низкой температурой кипения типа аммиака.

Была разработана установка для преобразования геотермального тепла в электричество [Соловьев, и др., 2016]. Схема установки представлена на рис. 4.

Конструкция данной установки в части преобразования вертикального воздушного потока в электричество полностью совпадает с конструкцией аэродинамической установки с внешним теплообменом (рис.3). Отличие состоит в способе подведения низкопотенциального геотермального тепла к установке. Для этого используется пресная вода внешнего источника, которая нагревается геотермальным теплом и поступает в водораспределительную систему. С этой целью в установку вводятся сифонно-соединенные горизонтальной перемычкой две скважины, при этом верхний конец одной из них через насос высокого давления соединен с водораспределительной системой, а верхний конец другой скважины через гидравлический насос соединен с источником пресной воды. Использование пресной воды для работы установки защищает окружающую среду от выбросов опасных химических веществ, содержащихся в геотермальной воде.

Применение сифонного соединения скважин для нагрева и подачи воды в установку позволяет осуществлять процесс без затрат энергии за счет разной плотности холодной и теплой воды в скважинах.

Приведенный пример установки для преобразования низкопотенциального геотермального тепла в электричество показывает принципиальную возможность создания аэродинамических установок на основе различных источников низкопотенциального тепла.

Выводы

Представленный анализ существующих и предлагаемых технологических решений преобразования низкопотенциального тепла показал следующее. Имеется много источников низкопотенциального тепла природного происхождения, а также промышленных источников, возникающих в результате хозяйственной деятельности человека. Так, в настоящее время в мире большой процент электричества производится с помощью тепловых машин, при этом вне зависимости от вида используемого топлива необходимо отводить тепло, которое является побочным продуктом при создании высокого давления в тепловых машинах для осуществления их работы.

Низкопотенциальное тепло производится в огромном количестве на атомных станциях. При выработке электрической энергии мощностью порядка 1000 МВт не производится 2000 МВт низкопотенциального тепла. Отсюда очевидна важность разработки методов повышения эффективности существующих способов преобразования тепла. Создание аэродинамических установок для производства электроэнергии, в которых вертикальный воздушный поток формируется с помощью различных источников тепла, а именно, инфракрасной составляющей солнечной радиации, тепла оборотной воды в градирне и низкопотенциального геотермального

тепла, открывает возможность существенно расширить область применения низкопотенциального тепла.

Литература

Вершинский Н.В. Энергия океана. М.: Наука,1986 – 144с.
Закиров Д.Г. Использование низкопотенциального тепла. – М.: РУСАЙНС, 2015.
Мартыновский В.С. Тепловые насосы.-М.-Л.:Госэнергоиздат, 1955 – 192с.
Соловьев А.А., Нигматулин Р.И., Гусинская Н.В., Малых Ю.Б. Воздуховод башенной испарительной градирни с турбулизацией вихревого потока // Патент РФ №2196947, 20.01.2003
Соловьев А.А., Чекарев К.В., Малых Ю.Б. Аэродинамическая градирня с внешним теплообменом // Патент РФ № 2582931, 29.03.2016.
Соловьев А.А., Чекарев К.В., Малых Ю.Б., Соловьев Д.А. Установка для преобразования низкопотенциального геотермального тепла в электричество// Патент РФ № 2618714, 11.05.2016.
Соловьев А.А.,Чекарев К.В. Башенная испарительная градирня с внешним теплообменом // Патент РФ № 2527799, 10.09.2014.
СоловьевА.А., Аксютин О.Е., Нигматулин Р.И., Чекарев К.В., Малых Ю.Б. Градирня с воздухорегулирующими устройствами//Патент РФ№ 2540127, 10.02.2015
Kazarov G.I. Report on the Technical Meeting on Advances in Non-Electric Applications of Nuclear Energy and Efficiency Improvement at Nuclear Power Plants. International Atomic Energy Agency. Oshava, Ontario, Canada, Oct., 2014. Ref. №:622-13-TM-4723, P.7.
Schlaich J, Bergermann R, Wainberg G. Design of commercial solar updraft power systems-utilization of solar induced convective flow for power generation. Journal of Solar Energy Engineering, February 2005, V.127/117

УРАГАН И ТОРНАДО: О МЕХАНИЗМЕ РАБОТЫ ПРИРОДНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГИИ

А.М. НЕЧАЕВ

Атмосферный вихрь, как природное явление, давно известен. Наиболее грозные его разновидности – такие как торнадо и ураганы – знакомы многим жителям нашей планеты слишком хорошо, так как несут им беды и неприятности. Современные способы фото- и видео-фиксации содержат колоссальную информацию об атмосферных вихрях от самых крохотных и безобидных пылевых «дьяволов» до смертельных торнадо, уничтожающих все на своем пути, и ураганов, заливающих дождем громадные территории. Немало научных работ в сфере метеорологии и физики атмосферы посвящено вихрям, эмпирические закономерности их поведения достаточно хорошо установлены и описаны [Superstorm Encyclopedia, 2011; Emanuel, 1986; Renno, 1998]. Что касается теоретических работ, то наиболее цитируемые из них уподобляют атмосферный вихрь тепловой машине Карно, выводя условие его формирования из термодинамических соотношений и интегральных

законов сохранения энергии, массы, момента количества движения. Между тем, атмосферный вихрь – принципиально незамкнутая гидродинамическая система, к которой законы сохранения не всегда применимы. В любом случае, физически ясный и простой механизм формирования атмосферного вихря, к сожалению, отсутствует.

В работе [Nechayev, 2016] было продемонстрировано, что многие так называемые гидродинамические «парадоксы» могут иметь простое объяснение в рамках классической гидродинамики, если корректно использовать ее законы. Здесь мы попытаемся использовать аналогичный подход для объяснения наблюдаемого атмосферного явления, остающегося до сих пор загадочным.

Желание найти и понять некий «универсальный» механизм формирования атмосферного вихря крепнет, когда становится очевидным, что практически все природные вихри, независимо от их масштаба, имеют немало общих свойств. К основным относятся следующие:

1. Нижняя часть оси атмосферного вихря, вокруг которой вращается воздух, находится всегда в минимуме атмосферного давления;

2. Воздух в вихре движется по восходящей спирали, снизу-вверх;

3. Интенсификация вихря сопровождается ускорением вращения воздуха и падением давления в центре;

4. Зарождение природного вихря может происходить в относительно спокойной атмосфере.

5. Атмосферный вихрь формируется в земной атмосфере, которая является баротропной: плотность воздуха в ней зависит от давления и обычно уменьшается с высотой.

В данной работе мы попытаемся предложить и проанализировать некие гидродинамические факторы, способные привести к формированию в земной атмосфере устойчивых зон пониженного давления, внутри и вокруг которых происходит восходящее движение воздуха.

Проделаем вначале мысленный эксперимент, реальное осуществление которого в принципе возможно, но выходит за рамки данной работы. Вообразим трубу с расширением и текущую по трубе жидкость, которая в месте расширения меняет свою плотность с ρ_1 на ρ_2: $\rho_2 < \rho_1$ (рис. 1). Расширение выбрано специальным образом так, чтобы обеспечить постоянство скорости, исходя из условия сохранения массы: $\rho v S = const$, где S – сечение трубы.

Таким образом, сечение трубы как бы «отслеживает» плотность жидкости, сохраняя скорость течения постоянной, поскольку $\rho S = const$.

Запишем уравнение Бернулли для одномерного течения жидкости вдоль линии тока с координатой (рис. 1). Будем исходить из обобщенной формы второго закона Ньютона для жидкости с переменной плотностью (в отсутствие массовых сил):

$$\frac{D(\rho v)}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial s} - F_{fr}(v) \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{\rho}$ – давление внутри жидкости, v - линейная скорость ($v = \partial s / \partial t$), F_{fr} – сила трения, действующая на частицу жидкости. Давление на концах трубы и p_2 под-

держивается постоянным. Раскрывая знак дифференциала и переходя к стационарному состоянию ($\partial(\rho v)/\partial t = 0$), мы можем записать:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial s} v = -\frac{\partial p}{\partial s} - F_{fr}(v) \qquad (2)$$

Для первого участка L_1 (рис. 1), где скорость нарастает от 0 до v и $\rho = \rho_1 = const$, интегрирование (2) по s дает стандартное уравнение Бернулли с трением:

$$p_0 - p_1 = \frac{\rho_1 v^2}{2} + \overline{F}_{fr1}(v) L_1 \ , \qquad (3)$$

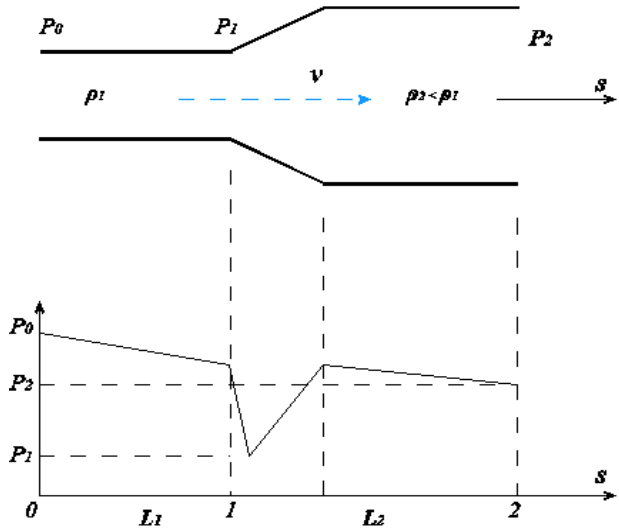


Рис. 1. Труба с расширением и текущей жидкостью. Плотность жидкости уменьшается, начиная с точки 1 расширения трубы. Скорость течения сохраняется постоянной. Нижний график показывает предполагаемое распределение давления вдоль трубы

где $\overline{F}_{fr1}(v) L_1 = \int_0^1 F_{fr1}(v) ds$ - интегральные затраты на трение на первом участке. Соответственно на втором участке, где плотность уменьшается, а скорость остается постоянной, имеем:

$$p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1) v^2 + \overline{F}_{fr2}(v) L_2 \qquad (4)$$

Из (4) сразу следует, что провала давления не будет ($p_1 \geq p_2$), если трение на втором участке достаточно велико. Из уравнений (3) и (4) получаем оценку «дна» падения давления p_1

$$p_1 = \frac{p_0 + p_2}{2} - (\frac{3\rho_1}{2} - \rho_2)\frac{v^2}{2} + \frac{1}{2}(\bar{F}_{fr1}L_1 - \bar{F}_{fr2}L_2) \qquad (5)$$

Таким образом, для потока жидкости с переменной плотностью можно ожидать появления зоны пониженного давления в тех местах, где плотность начинает уменьшаться. Это падение давления тем больше, чем больше разность плотностей и скорость течения жидкости.

Если для простоты пренебречь силами трения, то можно показать, что описанная нами система обладает неустойчивостью с положительной обратной связью между скоростью течения и провалом давления. Действительно, из уравнений (3) и (4) следует, что увеличение провала давления на втором участке (то есть уменьшение давления p_1) ведет к увеличению скорости течения на первом участке в соответствии с (3), а рост скорости должен уменьшить p_1 в соответствии с (4) и т.д. Очевидное условие, необходимое для этого, таково: $(\rho_1 - \rho_2)v^2 > \frac{\rho_1 v^2}{2}$ или

$$\rho_2 < \frac{\rho_1}{2} \qquad (6)$$

Однако, скорость не будет увеличиваться бесконечно, и давление не упадет до нуля. Этому помешают силы трения, которыми мы для наглядности пренебрегли. Действительно, силы трения F_{fr} увеличиваются с ростом скорости и, как следует из (4), трение на втором участке будет уменьшать провал давления, что должно стабилизировать ситуацию. Знание зависимостей $F_{fr}(v)$, позволяет решить уравнения (3) и (4) и получить однозначную величину скорости течения v и давления p_1 при заданных ρ_1, ρ_2.

Критерий неустойчивости (6) кажется чересчур простым, однако в реальности он должен быть скорректирован, поскольку в нем заложено постоянство скорости и при его выводе не учитывались силы трения. Однако, принципиальная сторона механизма неустойчивости не исчезает, поскольку к провалу давления ведет фундаментальное уменьшение количества движения ρv из-за уменьшения плотности, и оно должно быть скомпенсировано силами давления в соответствии с законами гидродинамики.

Обсудим возможные механизмы восходящих движений воздуха. Хорошо известно, что вертикальные потоки воздуха, как восходящие, так и нисходящие, являются одной из главных движущих сил формирования погоды и климата на Земле. Интенсивный и локальный подъем влажного воздуха сопутствует образованию грозовых фронтов, линий шквалов и смерчевых облаков. Существенно более слабые, но продолжительные и масштабные восходящие движения воздуха в кластерах над теплым океаном заканчиваются при определенных условиях формированием тропических штормов и ураганов.

Классическая свободная конвекция в атмосфере приводит к заметным скоростям подъема только в случае замкнутых объемов легкого газа с плотностью, многократно меньшей, чем плотность окружающего воздуха. Это происходит, например, в случае стратостатов, заполненных гелием. Собственно, конвекционный подъем горячего воздуха обладает относительно малой скоростью, как это легко заметить, наблюдая за языками пламени костра (температура выше 1000 С) или за обычным водяным паром (температура 100 С), поднимающимся над кипящей кастрюлей. Очевидно, в свободной атмосфере действует и иной, нежели тепловая конвекция, механизм, создающий в нижних и средних слоях тропосферы достаточно интенсивные и долгоживущие зоны подъема воздуха со скоростями, превышающими единицы и даже десятки метров в секунду. Эти зоны хорошо знакомы пассажирам авиалайнеров, попадающих в воздушные ямы, парашютистам и планеристам, оказавшимся вблизи основания грозового облака, туристам и альпинистам на склонах горных вершин. Во всех этих случаях практически отсутствуют заметные перепады температуры. Следовательно, механизм подъема воздуха должен быть обусловлен гидродинамическими причинами.

Существует очевидная, но не всегда осознаваемая особенность поведения объемов воздуха, находящихся внутри атмосферы. Вес этих объемов сбалансирован выталкивающей силой, и при равенстве температур они находятся в безразличном равновесии. Прандтль в своей знаменитой работе [Prandtl, 1952] писал об избыточном давлении, возникающем в жидкости вследствие ее движения. Это давление «…распределяется в жидкости так, как если бы она была невесомой и обладала только инертной массой. Каждая частица весомой жидкости как бы висит в потоке под действием поддерживающих сил окружающих частиц». Любая, малейшая, сила, приложенная к объему в вертикальном направлении (неважно – вверх или вниз), приводит его в движение так же, как если бы эта сила была приложена горизонтально. Гравитационная сила сбалансирована вертикальным градиентом гидростатического давления, и воздушный шарик, наполненный комнатным воздухом, в равной степени легко движется как в сторону, так и к потолку.

Поэтому, рассматривая движение воздуха, направленное вертикально вверх, можно «забыть» о весе воздуха, так как он скомпенсирован архимедовой силой, и полагать, что изначальное давление на всех высотах «условно» одинаково и равно некоторому опорному $\overline{p}$. А начало движения вызвано первичным избыточным давлением. Для нас важно, что существует некая сила, способная заставить воздух двигаться вверх, в зону, где плотность воздуха значительно меньше. Источником подобной силы может стать торможение воздушных потоков вследствие различных причин. При уменьшении скорости потока v до нуля в зоне столкновения с неподвижной поверхностью в так называемой критической точке [Prandtl, 1952], давление увеличивается на величину $\rho v^2/2$. Это избыточное давление либо останавливает поток, либо заставляет его изменить свое направление в соответствии с окружающими условиями. В свободной атмосфере подобная ситуация может возникнуть, например, если сталкиваются встречные потоки. В этом случае неизбежно взаимное торможение обоих потоков с образованием зоны избыточного давления, которое вынуждает воздух двигаться в вертикальном направлении. Столкновение встречных потоков имеет место и в случае движения воздушных масс

внутрь зоны пониженного давления, которая может образоваться вблизи поверхности Земли вследствие гидростатических причин. Так, например, характерный провал давления в центре торнадо обусловливает мощные центростремительные потоки, которые взаимно тормозятся и легко уходят вверх, поскольку для них это единственное свободное направление, а вес воздуха, как отмечалось выше, подъему не мешает.

Провал давления в потоке жидкости при ее течении в трубе в нашем мысленном эксперименте был обусловлен искусственным уменьшением плотности и соответствующим расширением трубы для сохранения постоянной скорости течения. Нам представляется, что в земной атмосфере существует аналогичный механизм естественного происхождения: это конденсация водяного пара в потоке поднимающегося воздуха. Действительно, при конденсации водяного пара выделяется тепло, которое определяется скрытой теплотой конденсации и влажностью воздуха. Если это тепло превосходит адиабатическое охлаждение воздуха (10 градусов на 1км подъема), то частица воздуха приобретает нагрев ΔT, который в соответствие с уравнением состояния газа, уменьшает ее плотность на величину $\Delta\rho = -\frac{p\Delta T}{RT^2}$,

где p – давление на данной высоте, T – температура воздуха, R – универсальная газовая постоянная. Если плотность воздуха в струе уменьшается, то пропорционально увеличивается объем и сечение воздушной струи (струя расширяется), что может приводить к постоянству скорости воздуха в струе аналогично рассмотренному выше мысленному эксперименту. В подтверждение данного предположения можно упомянуть известный факт сохранения до очень больших высот почти постоянных значений тангенциальной скорости воздушных струй, поднимающихся в стене глаза урагана [Hawkins, 1976].

Таким образом, струя влажного воздуха (если она поднимается на большую высоту и движется под напором, а не вследствие плавучести) может вести себя аналогично потоку жидкости в нашей расширяющейся трубе (рис. 1), причем точка 0 обозначает место где струя под действием избыточного давления поворачивает вверх (p_0 – соответствует величине избыточного давления), точка 1 – это уровень конденсации в атмосфере, где начинается уменьшение плотности воздуха, точка 2 – высота, на которой заканчивается подъем струи. Провал давления в соответствии с нашим механизмом должен наблюдаться на уровне конденсации, когда плотность воздуха в верхней части струи становится меньше, чем плотность приземного воздуха.

Таким образом, с гидродинамической точки зрения, формирование атмосферного вихря может произойти, когда созданы условия для напорного подъема воздушной массы струи в верхние слои атмосферы, где плотность воздуха уменьшается в соответствии с уравнением состояния. Конденсация водяного пара приводит к дополнительному уменьшению плотности. Интенсификацию вихря можно ожидать, когда плотность воздуха струи при ее подъеме снизится как минимум вдвое.

Приняв теоретические результаты за ориентир, попытаемся дать интерпретацию некоторых эмпирических данных по реальным атмосферным вихрям. Для этого используем упрощенную отсутствием трения формулу (4), связывающую

провал давления в вихре Δp с перепадом плотности воздуха в струе и с ее скоростью v:

$$\Delta p = v^2 \Delta \rho \qquad (7)$$

где $\Delta \rho$ - разница между плотностью воздуха на входе в вихрь и там, где струя прекращает свое существование.

Проще всего объяснить формирование смерчей во время крупных лесных пожаров или вулканических извержений. Действительно, столб раскаленного воздуха с температурой выше 600 К (при такой температуре плотность воздуха уменьшается в 2 раза) удовлетворяет критерию (6) и создает под собой первичный провал гидростатического давления (пусть небольшой), который «втягивает» внутрь столба холодный и «плотный» окружающий воздух, фактически моделируя условия нашего мысленного эксперимента.

Происхождение пылевого «дьявола» тоже может быть обусловлено нагревом воздуха. В пустынных районах, где «дьяволы» обычно образуются, локальный нагрев приземного воздуха до температур 50-60 С - обычное дело. Если воздух с такой температурой образовал слой, висящий или плывущий над землей, то в нем плотность воздуха будет на $\Delta \rho = \rho \frac{\Delta T}{T} \approx 0,2 kg/m^3$ меньше, чем плотность окружающего воздуха. Если ветровая струя со скоростью 10-20 м/с попадает в такой «горячий» слой, то на «холодном» конце струи будет в соответствии с (7) провал давления 0,2 – 0,8 мБ, что типично для небольших «дьяволов».

В мощных ураганах струи влажного воздуха поднимаются по спирали на высоты 10-12 км, сохраняя очень высокую скорость, до 50-60 м/с. Разница $\Delta \rho$ при этом может достигать 0,8-1,0кг/м^3. Например, у урагана Инез (1966) максимальная зарегистрированная максимальная скорость ветра v_m была равна 80 м/с [Holland, 2007]. Формула (7) дает нам оценку провала давления в стене глаза (а не в центре глаза урагана) - там, где начинает свой подъем воздушная струя: 51-64 мБ. Чтобы оценить провал давления в центре глаза урагана, к указанной величине следует добавить величину $\rho v_m^2 / 2$. Именно настолько падает давление в центре вращающегося воздушного «диска»: «твердотельное» вращение глаза урагана с угловой скоростью v_m / R_m, (где R_m - радиус максимального ветра) хорошо установлено. Следовательно, средний суммарный провал давления в центре урагана Инез составит около 92 мБ (плотность воздуха в области РМВ принята равной 1,1 кг/м^3), что практически точно соответствует реально зафиксированному минимальному давлению в 927 мБ (927+92=1019мБ) [Knaff, 2007].

С самого начала целенаправленных исследований тропических циклонов перед учеными стояла задача получить соотношение между максимальными скоростями ветра и минимальным значением атмосферного давления. Это соотношение было установлено, главным образом, эмпирическим путем в виде степенной зависимости $v_m = C(\Delta p)^n$, где $n < 1$ [8,9]. Наиболее удачной в настоящее время считается формула, приписываемая Willoughby [Landsea, 2017]:

$$v_m = \sqrt{\frac{2}{3}\frac{1}{\rho}(p_\infty - p_c)} \qquad (8)$$

где p_∞ и p_c - давление за пределами урагана и в его центре соответственно.

Наши теоретические предположения дают следующую формулу:

$$(\rho_1 - \rho_2)v_m^2 + \rho_1 v_m^2 / 2 = p_\infty - p_c \qquad (9)$$

которая практически совпадает с (8), если принять $\rho_2 << \rho_1$, что характерно для ураганов, у которых воздушные струи поднимаются на высоту не менее 10 км.

Торнадо – одна из наиболее впечатляющих разновидностей атмосферного вихря. Оно, в отличие от урагана, доступно наблюдению невооруженным глазом. Провалы давления и скорость ветра в мощных торнадо, как правило, превышают аналогичные параметры для ураганов. И здесь в связи с предложенным механизмом возникают новые вопросы, на которые пока нет ответа. Во-первых, на передний план выходит воздушная среда, где должен действовать закон идеального газа, связывающий давление газа и его плотность. Если воздушная струя соединила области с разной плотностью воздуха, и в ней произошло падение давления, то в этом месте должна уменьшиться плотность воздуха. Соответственно, появляется дополнительный механизм положительной обратной связи, который может усилить процесс падения давления в воздушной среде. Возможно, этим можно объяснить известное опускание воронки торнадо к земле и распространение вращения на приземную область. Во-вторых, зарождение торнадо и подобных ему водяных смерчей начинается с подъема воздуха внутри центрального ядра [Leverson, 1977]. Этот факт хорошо согласуется с нашей теорией, потому что струя в центральном ядре эффективно соединяет слои атмосферы с разной плотностью воздуха. Единая гидродинамическая струя позволяет объяснить часто наблюдаемую причудливую форму торнадо, его изогнутый тонкий «хобот», касающийся земли и вращающийся с большой скоростью. Для нашего механизма не нужна вертикальность. Он не гидростатический. Струя, то есть линия тока, может иметь любую форму: важно, чтобы она не имела разрывов, и чтобы соединяла область с высокой плотностью воздуха (поверхность Земли) с областью, где плотность воздуха мала (верхние слои атмосферы).

Подъем воздуха в центральном ядре происходит и при формировании урагана: они зарождаются в кластерах после длительного подъема влажного воздуха в центре очень слабой циркуляции (со скоростями ветра порядка 1-2 м/с), которая затем усиливается. Однако вращение в зрелом урагане интегральное: отдельные кучевые облака-башни, формирующие ураган, сами не вращаются, они движутся коллективно вокруг глаза урагана, где движения воздуха практически нет. Возможно, в урагане единая струя воздуха существует лишь в начале формирования, на стадии тропического шторма. Впрочем, и в торнадо есть «ядро», пространство внутри воронки, которое замещает первичную единую струю. Кстати, ураганы, как известно, способны рождать торнадо при выходе на сушу [Novlan, Gray, 1974] . Возможно, их структура (подъем воздуха до областей тропопаузы, высокие скорости ветра) облегчает формирование зон избыточного давления, где формируются вертикальные струи воздуха, способные подняться вверх и достичь верхних слов атмосферы.

Литература

Emanuel K.A. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. J. Atmos.Sci. 1986; 43:585-604

Hawkins H.F., Imbembo S.M. The Structureof a Small, Intense Hurricane – Inez 1966. Monthly Weather Review, 1976; 104:418-442.

Holland G. A revised Hurricane Pressure-Wind Model. Monthly Weather Review, 2007, 136: 3432-3436.

Knaff J., Zehr R. Reexamination of Tropical Cyclone Wind-Pressure Relationships. Weather and Forecasting, 2007, v.22: p.71-88

Landsea C. Hurricane Structure: Theory and Diagnosis. World meteorological Organization Workshop, 6 march, 2017

Leverson V.H., Sinclair P.C., Golden J.H. Waterspout Wind, Temperature and Pressure Structure Deduced from Aircraft Measurements. Monthly Weather Review, 1977; 105:725-733.

Nechayev A.M. A New Approach in Interpretation and Solving Certain Hydrodynamical Phenomena and Systems. Physical Science International Journal, 2016; 11(1): 1-11.

Novlan D.J., Gray W.M. Hurricane-Spawned Tornadoes. Monthly Weather Review, 1974; 102:476-486

Prandtl L. Essentials of Fluid Dynamics. Blackie & Son, London, 1952.

Renno N.O., Barkett M.L. and M.P.Larkin. A simple thermodynamical theory for dust devils. J. Atmos.Sci. 1998; 55:3244-3252

Renno N.O., Bluestein H.B. A simple theory for waterspouts. J. Atmos.Sci. 2001; 58:927-932

Superstorm Encyclopedia: Tornadoes, Severe Thunderstorms, Hurricanes, Tropical Storms, Typhoons, Cyclones … Progressive Management, 2011

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА В ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ НИЗКОШИРОТНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ

А.А.СОЛОВЬЕВ, Д.А. СОЛОВЬЕВ

В электростанциях, работающих как на ископаемом топливе, так и на возобновляемых энергоресурсах хорошо зарекомендовали себя башенные мокрые градирни с естественной тягой. Находящиеся в настоящее время в эксплуатации такие градирни далеко не всегда удовлетворяют современным требованиями энергоэффективного производства электрической энергии. В среднем по всем электростанциям России, ограничения вырабатываемой мощности, связанные с их недостаточной производительностью из-за снижения охлаждающей способности градирен, достигают значений до 2,5 % от общего объема производимой энергии [Lemouar, Boumaza, 2010] . Существенная недовыработка электроэнергии в особенности отмечается в связи с климатическими изменениями, приводящими к увеличению продолжительности и интенсивности высоких летних температур охлаждающего воздуха, значительно снижающего глубину охлаждения циркуляционной воды, возвращающейся в конденсаторы турбин. Наибольшую проблему с снижением эффективности использования ресурсов низкопотенциального тепла в низкоши-

ротных регионах мира [Zuniga-Gonzalez, 2005]. Ухудшение показателей тепловой эффективности башенных испарительных градирен в определенной степени, связано с игнорированием влияния структуры внутренней аэродинамики воздушных потоков на процессы тепло-массообмена [Hoffmann, Kroger,1999]. В настоящей статье с использованием математической модели процесса охлаждения воды при испарении и контактном тепло-массообмене, рассматриваются вопросы эффективности применения технологии воздухорегулирования внутренних потоков в башенных градирнях электростанций альтернативной энергетики.

Технология воздухорегулирования потоков в башенных противоточных градирнях с естественной тягой предусматривает функционирование поворотных устройств во входных окнах [Соловьев, Нигматулин и др**.,** 2003]. Предполагается, что поворотные устройства, изменяя направление и интенсивность входящих в градирню воздушных потоков, позволят обеспечить охлаждение циркуляционной воды до достаточно низких температур за счет организации ее контакта с воздухом на большей площади, с равномерным заполнением подоросительного пространства при минимальной протяженности мертвых зон.

Математическая модель башенной градирни с устройствами воздухорегулирования. Теоретическое описание процессов испарительного и контактного теплообменного охлаждения движущихся теплоносителей входит в класс нетривиальных задач двухфазного тепло-массообмена и аэродинамики в многокомпонентных средах. Для решения таких задач в настоящее время активно используются методы гибридного моделирования, использующие теоретические и экспериментальные модели. В литературе, посвященной исследованию охлаждения оборотной воды в мокрых башенных градирнях, главным образом, представлены теоретические модели, в которых основной акцент делается на рассмотрение тепломассообменных процессов испарения в оросительных насадках при взаимодействие пленок и капель воды с паровоздушной средой [Fisenko, Petruchik, Solodukhin, 2002]. Аэродинамические факторы, влияющие на степень охлаждения воды, учитываются опосредовано путем включения в модели алгебраических соотношений для расчета интегрального расхода воздушного теплоносителя и сопротивления его движению, что естественно, не отражает в полной мере влияние аэродинамических явлений на процессы тепло-массообмена в градирнях.

В качества исходного объекта моделирования выбран прототип башенной градирни с противоточном движением теплоносителей, содержащей оросительные насадки с пленочным распылением и устройства воздухорегулирования в виде поворотных щитов с вертикальной осью вращения [Нигматулин, Гусинская, 2001]. Математическая модель градирни представляет собой краевую задачу для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих тепломассообмен между фазовыми состояниями вода-воздух-пар и аэрогидродинамическое течение теплоносителей.

Для описания тепло-массообменных процессов при испарении использована предложенная в работах [Нигматулин, Гусинская, 2001; Consuegro et.al, 2014] система из дифференциальных уравнений баланса массы и энергии контактирующих фазовых состояний вода-воздух-пар.

$$\frac{dQ_w(x_3)}{dx_3} = -\gamma B \cdot \left[\rho_s(x_3) - \rho_v(x_3)\right] \qquad (1)$$

$$\frac{dQ_v(x_3)}{dx_3} = \gamma B \cdot \left[\rho_s(x_3) - \rho_v(x_3)\right] \quad (2)$$

$$\frac{d}{dx_3} J_a(x_3) = \alpha b \cdot \left[T_w(x_3) - T_a(x_3)\right] \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx_3} J_v(x_3) = -b \cdot \left\{\alpha \cdot [T_w(x_3) - T_a(x_3)] - r \cdot \gamma \cdot [\rho_s(x_3) - \rho_v(x_3)]\right\} \quad (4)$$

Здесь T – температура; – плотность; J - удельная энтальпия (теплосодержание), Дж/кг (ккал/кг); Q – массовый расход (кг/с); b – высота оросителя, м. B – ширина оросителя, м; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м^2 ^{o}C); γ – коэффициент массоотдачи, кг/(м^3·с). Индексы: a – (air) воздух; s – (saturated) насыщенный; v – (vapor) пар; w – (water) вода; система координат Ox_1, Ox_2 , Ox_3.

Уравнение (1) определяет изменение расхода воды вследствие испарения при движении вниз в пространстве между стекателями оросителей пропорциональное дефициту разности плотностей насыщенного пара и паров при температуре воды на входе в градирню. Уравнение (2) характеризует расход пара и его вертикальный перенос. Уравнение (3) – поток энтальпии воздуха. Дифференциальным уравнением (4) определяется изменение с высотой оросителя теплосодержания пара, которое выражается через поток тепла при теплообмене и поток тепла при фазовом превращении вода-пар.

Для описания аэродинамических процессов и контактного теплообмена в модели градирни используется система дифференциальных уравнений движения (5), неразрывности(6), теплопроводности (7) и уравнение состояния (8).

$$\frac{\partial \vec{U}_a}{\partial t} + (\vec{U}_a \nabla)\vec{U}_a = -\frac{1}{\rho_a}\nabla p_a + \nu \Delta \vec{U}_a + g\vec{k} - 2\left[\vec{\Omega}_a \times \vec{U}_a\right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho_a \vec{U}_a) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + (\vec{U}_a \nabla)T_a = \kappa \Delta T_a \quad (7)$$

$$\rho_a = \rho_a(T_a) \quad (8)$$

Здесь $\vec{U}$ – вектор скорости, м/с; T – температура, ^{o}C; p - давление, Па; ρ – плотность, к*г*/м^3; g – ускорение силы тяжести, м/с^2; t – время, с; ν и κ – соответственно, коэффициенты вязкости и теплопроводности, м^2/с; $\vec{\Omega}$ – вектор угловой скорости вращения, с$^{-1}$.

Граничные условия для системы уравнений (1)-(4) записываются следующим образом. В нижнем сечении оросителя задаются температура воздуха и влагосодержание, давление парогазовой смеси, в верхнем сечении оросителя задаются расход и температура воды.

Граничные условия для системы уравнений (5)-(8) представляются следующим образом. В нижнем сечении башни на входе в ее подоросительном пространстве задаются: температура наружного воздуха, влажность и давление, тепловой

поток $C_a\rho_a\lambda_a\frac{\partial T_a}{\partial x_3}=Q_a(x_2)$ (C_a – теплоемкость воздуха, λ_a – теплопроводность), энтальпия воздуха, скорость входящих в башню течений, расход воздуха, закрутка потока $\Omega_a=\frac{U_a}{R}\sin\beta,$ где β – угол входа потока в подоросительное пространство, отсчитываемый от радиального направления, R- радиус опорного кольца башни. В верхнем сечении оросителя задаются: начальный расход воды, температура воды, энтальпия пара, для исходной температуры воды. Зависимость плотности воздуха от температуры при постоянном атмосферном давлении представлена уравнением

$$\rho_a(T_a)=\rho_a(T_0)\frac{T_0(1+0{,}608f)}{T_a}$$

где T_o=20 ^oC. Турбулентный характер теплообмена и массообмена при обтекании оросителей учитывался через соответствующие коэффициенты для плоской пластины: $\alpha=\frac{0{,}025\cdot\lambda_a\cdot Re^{4/5}}{b-x_3}$, $\gamma=\frac{0{,}025\cdot D_a\cdot Re^{4/5}}{b-x_3}$,

где D_a – коэффициент диффузии. Для расчета числа Рейнольдса при обтекании воздушным течением плоской пластины оросителя использовалось соотношение, котором U_a – модуль скорости воздушного потока.

В качестве исходных данных расчета использовались следующие геометрические характеристики: радиус башни R, расстояние между листами оросителей s, высота оросителей b и ширина каждого оросителя B; высота входных окон в подоросительное пространство h, площадь орошения F, плотность орошения q, высота башни и расстояние **a** от оросителя до верхнего торца башни.

В результате вычислений определялись следующие величины: температура воды на выходе, расход воды на выходе из градирни, потеря воды за счет испарения, температура, и влажность воздуха на выходе из градирни. Реализация математической модели градирни была осуществлена в математическом пакете Matlab с представлением результатов в локальной базе данных и графическом интерфейсе.

Экспериментальный стенд с физической моделью градирни. Физическое моделирование процессов тепло-массообмена и аэродинамики осуществлялось на экспериментальном стенде с маломасштабной градирней. Модель башенной испарительной градирни выполнена в соответствии с типичным натурным прототипом градирни (табл. 1). Экспериментальный стенд (рис. 1) содержал три блока: блок модели градирни, блок измерительной аппаратуры и блок программного обеспечения. Блок модели градирни состоял из собственно модели градирни с воздухорегулирующими жалюзями, водораспределительного устройства с оросителем, водосборного бассейна, вентилятора-пылесоса. Измерительная система включала в себя аппаратуру, обеспечивающую получение данных, их сбор и передачу информации для последующей обработки. Эти функциональные операции осуществлялись измерительными датчиками температуры, скорости, влажности, накопителями данных измерений, визуализаторами текущей информации. Блок управления программно обеспечивал функционирование с заданными параметрами эксперимента термостата-бойлера с трубопроводами и насосами на подачу горячей воды к водо-

распределительному устройству градирни и отводу охлажденной воды из накопительного бака – бассейна в термостат.

В качестве исходного варианта воздухорегулирующего устройства в модели использовалось техническое решение, заявленное в [Соловьев, Нигматулин и др., 2003]. Конструкция воздухорегулирующего устройства содержала ветронаправляющие щиты – жалюзи с вертикальной осью вращения, устанавливаемые во воздуховходных проемах у основания башни. Угол поворота жалюзей дискретно регулировался в пределах 0-90°. Поток наружного холодного воздуха, проходящий через это устройство, изменяя свою интенсивность и направленность и встречаясь с вертикальными потоками горячей воды, передавал им приобретенный угловой момент, осуществляя контактное охлаждение в объеме подоросительного пространства.

Таблица 1. Технические характеристики градирни и лабораторной модели.

Параметры	Натурная градирня	Лабораторная модель градирни
высота башни, м	91,0	0,9
диаметр опорного кольца башни, м	80,0	0,8
диаметр наименьшего кольца башни, м	40,0	0,4
диаметр верхнего кольца башни, м	43,4	0,44
площадь орошения, $м^2$	4 000	0,4
высота воздушных окон, м	5,5	0,05
ширина окон, м	12	0,12
номинальный расход воды, $м^3/ч$	28 000	2,8
плотность орошения, $м^3/м^2 \cdot ч$	2÷8	2-4
номинальный расход воздуха, $м^3/ч$	22 000 000	2200
ёмкость бассейна, $м^3$	10000 $м^3$	0,1

Горячая вода, разбрызгиваемая на пластинчатые щитки оросителя модели градирни, стекала вниз, частично охлаждаясь при испарении и при обмене теплом с обтекающими элементы оросителя воздушными течениями. Неиспарившаяся вода после оросителя продолжала охлаждаться, взаимодействуя с потоками наружного воздуха, который подсасывался в башню после прохождения тангенциальных жалюзей.

В экспериментах с моделью определялась охлаждающая способность градирни при различных значениях разности температур входящей воды T_{1w}, наружного воздуха T_a, относительной влажности f_a, относительного расхода воздуха и воды $\lambda = Q_a / Q_w$, углов β установки воздухорегулирующих жалюзей.

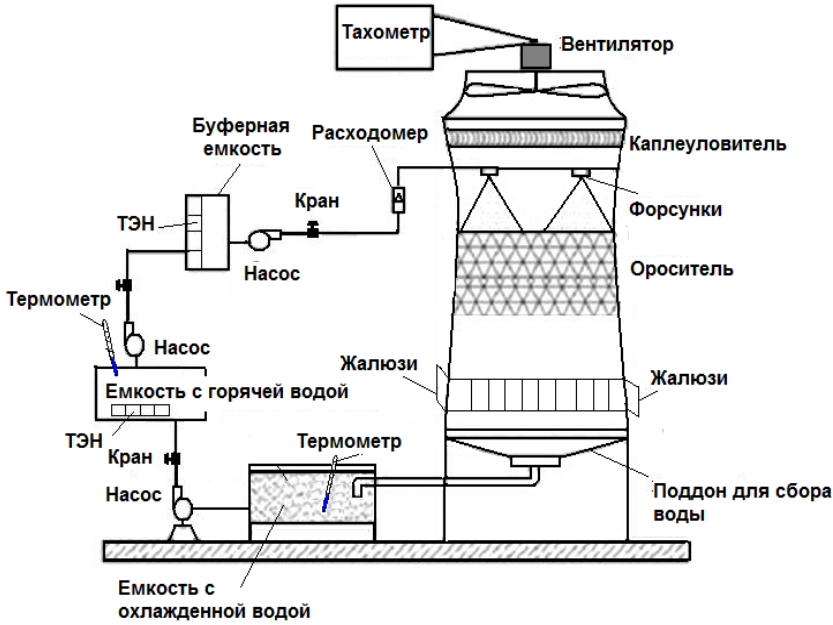


Рис. 1. Схема и общий вид экспериментального стенда с физической моделью градирни

Обсуждение результатов. Сравнительная оценка качества работы охладителя с системой воздухорегулирования по данным численного и лабораторного моделирования выполнялась с использованием, введенного в работе [Берман, 1957] коэффициента совершенства или эффективности η, который характеризует глубину охлаждения по отношению к пределу охладительной способности и выражается через отношение перепада температур воды до T_{1w} и после T_{2w} охлаждения к разности начальной температуры и предельной температуры τ мокрого термометра

$$\eta = \frac{T_{1w} - T_{2w}}{T_{1w} - \tau} \qquad (9)$$

Проверка верификации численной модели для однородного потока жидкости была проведена путем сравнения результатов расчета с данными лабораторных измерений. Анализ расчетных и экспериментальных данных позволил скорректировать подобрать эмпирические параметры.

Сравнения расчетных и измеренных значений проводилось путем определения температуры охлажденной воды T_{2W} от значений T_{1W}=40,3-42°С при различных температурах воздуха T_a=22-25°С; влажности f=25-60%, расхода воды Q_w=2,8 м^3/час; расход воздуха Q_a =900-3600 м^3/час. Для оценки по исходным данным расчетов и измерений вычислялись значения коэффициента эффективности. Отклонения расчетных и измеренных величин находилось в пределах ± 5 %, что позволяет заключить, что математическая модель позволяет рассчитывать на адекватное описание процессов тепло-массообмена и аэрогидродинамики градирни в принятых граничных условиях. Была также исследована чувствительность модели к изменению параметров численного счета. При изменении числа узлов расчетной сетки на порядок до сотен единиц было установлено, что результаты расчетов слабо зависят от густоты расчетной сетки. Для практических вычислений оказывается достаточным небольшое число не превышающих десятки узлов сетки.

Обсуждая возможности влияния воздухорегулирования на тепловую эффективность, приведем результаты численного модельного расчета теплового коэффициента полезного действия при различных углах χ установки поворотных устройств в воздуховходных окнах градирни. Вычисления были проведены для стандартных условий режима эксплуатации для расхода воды, подаваемой на градирню Q_w=1 м³/ч; температуры поступающей воды T_{w1},=40°С; температуры наружного воздуха T_a=25°С; относительной влажности воздуха f=50% и значений массового расхода воздуха Q_a=840 м³/ч , Q_a=268 м³/ч.

Обнаруживается весьма характерная зависимость тепловой эффективности от угла входа потока в градирню. Наибольший к.п.д. работы градирни при фиксированном отношении расходов воздуха и воды Q_a/Q_w=1,1 приходится на значения угла входа потока воздуха в лабораторную градирню, лежащие в интервале от 30 до 60 град (рис. 2).

Разница в коэффициенте тепловой эффективности между полностью открытой градирней и градирней с воздухорегулирующими устройствами, обеспечивающими угол входа потока в градирню 45 градусов, составляет 3,9%, что эквивалентно увеличению вырабатываемой электрической мощности на 1,5 МВт. С изменением соотношения гидравлической и тепловой нагрузки эффективность охлаждающей способности испарительной башенной градирни изменяется. Влияние на эффек-

тивность и степень охлаждения воды в градирне наряду с направленностью входящих потоков, но и их интенсивности подтвердилась как в численных расчетах так и в данных полученных при измерениях в лабораторных экспериментах. На рис. 3 приведены характерные зависимости тепловой эффективности градирни от относительного расхода воздух-вода в сравнении с данными численного расчета. Управлять величиной коэффициента тепловой эффективности градирни, как следует можно не только регулированием направленности входящих в подоросительное пространство градирни воздушных потоков. Тепловой коэффициент полезного действия градирни подвержен изменению также и при помощи систем регулировки интенсивности воздушных потоков воздухорегулирующими устройствами устанавливаемых одновременно под фиксированным углом по всему периметру основания башни.

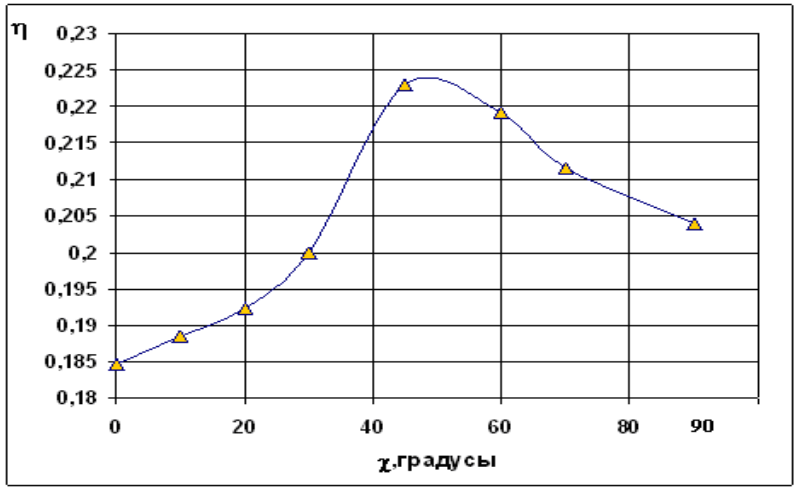


Рис. 2. График зависимости коэффициента η *тепловой эффективности при задании угла входа потока воздуха* χ *и относительном расходе* $Q_a/Q_w=1,1$. *Линия - численный расчет, точки данные опытов в лабораторной модели градирни.*

Из приведенных результатов следует отметить, что представление теплового к.п.д. в координатах отношения воздух-вода свидетельствует об отличных от нуля значениях к.п.д. при отсутствии воздушных потоков. Линии пересекают ось ординат практически близких, но не нулевых значениях. Это означает, что в этих двух случаях, когда в градирне вихрь и когда течение безвихревое охлаждение воды обуславливается только испарением, которое одинаково для обоих режимов охлаждения.

Анализ полей распределения моделируемых параметров градирни показывает, что поток атмосферного воздуха по пути своего движения кроме потока тепла, встречает разные элементы системы, у которых он тоже забирает тепловую энергию, теряя свою эффективность при работе с потоком тепла. Необходимо организовать подход потоков воздуха непосредственно в место прямого контакта с

водными потоками. Это может быть достигнуто при заборе воздуха непосредственно из атмосферы (без его контакта с теплоносителем) и направлением его непосредственно в зону теплообмена с водой с тем расчетом, чтобы охлаждающий воздух, пройдя через эту зону, имел возможность выходить в атмосферу с минимизацией паразитарных контактов и аэродинамического сопротивления.

Относительно возможности практического применения изложенной модели аэродинамического управления теплообменом в башенной мокрой градирне, отметим результат, который представляются наиболее важным – это выравнивание поля скоростей в градирне за счет выбора конструкции воздухорегулирующих окон, создающих турбулентно-вихревой поток, интенсифицирующий теплообменные процессы, что особенно актуально в аспекте роста производимой энергетической продукции и экономии топливных ресурсов.

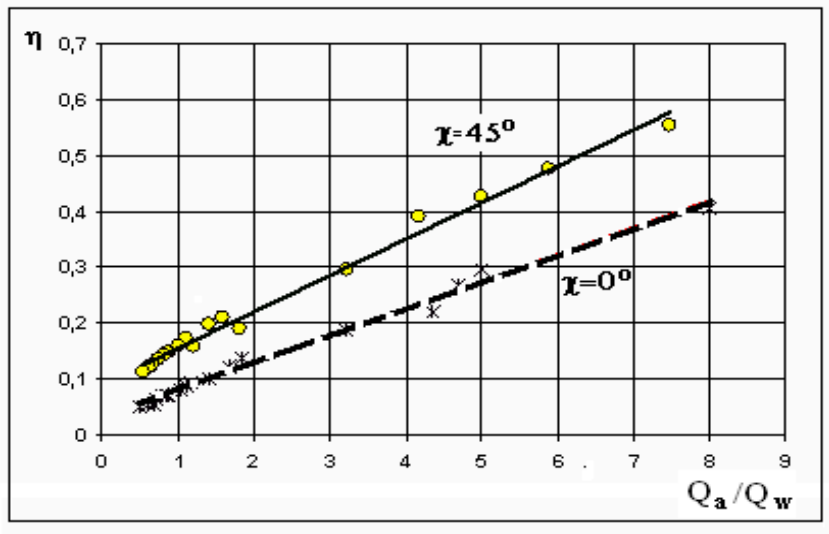


Рис. 3. Изменение теплового к.п.д. градирни в зависимости от соотношения интенсивностей аэродинамической и гидравлической нагрузки Q_a/Q_w в случае открытой градирни и градирни с закруткой потока по всему периметру воздухорегулирующими устройствами.

Выводы

Представлены результаты моделирования процессов аэродинамического и тепло массообменного взаимодействия воздушных и водных потоков в башенных испарительных градирнях. Установлено, что использование систем воздухорегулирования направленности и интенсивности потоков, охлаждающих оборотную воду конденсаторов турбин электростанций, может быть практически использовано для повышения тепловой эффективности росту выработки электрической энергии.

Литература

Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957.

Нигматулин Р.И., Гусинская Н.В. Тепловая эффективность испарительных градирен башенного типа// Теплоэнергетика. 2001. № 3. С.68-71.

Соловьев А.А., Нигматулин Р.И., Гусинская Н.В., Малых Ю.Б. Воздуховвод башенной испарительной градирни с турбулизацией вихревого потока// Патент РФ № 2196947, 2003.

Consuegro A.J., Kaiser A.S., Zamora B., Sánchez F. Numerical modeling of the drift and deposition of droplets emitted by mechanical cooling towers on buildings and its experimental validation // Building and Environment. 2014. №78. P. 53-67.

Fisenko S.P., Petruchik A.I., Solodukhin A.D. Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower// Int. J.Heat Mass Transfer. 2002. №45. P.4683–4694.

Hoffmann J. E ., Kroger D. G . Analysis of heat mass and momentum transfer in the rain zone of a natural draft counterflow cooling tower. The 7th Cooling Tower and Spraying Pond Symposium, May 29 – June 2, 1990. Leningrad, 1990. P. A.10-1-A.10-8.

Lemouari M., Boumaza M. Experimental investigation of the performance characteristics of a counterflow wet cooling tower // International Journal of Thermal Sciences. №49. (2010) 2049-2056

Zuniga-Gonzalez I . Modeling Heat and Mass Transfer in Cooling Towers with Natural Convection. Summary of dissertation. Prague: Czech Technical University in Prague, 2005. 23 pp.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в монографии работы отчетливо иллюстрируют впечатляющую динамику прогрессивного развития возобновляемых источников энергии за последние десятилетия. Состояние современной энергетики, использующей возобновляемые природные ресурсы энергии, свидетельствует о достижении возобновляемыми источниками энергии прочных позиций в общем энергобалансе наряду с традиционными источниками энергии. Возобновляемая энергетика сложилась как совокупность сетевых и распределенных энергетических систем, обеспечивающих потоки произведенной экологически чистой энергии, потребляемой с энергосбережением. Она объединяет новые знания, инновационные технологии, изобретения и подготовку компетентных специалистов, ориентированных на решение адекватных требованиям времени задач энергетики.

Развитие общества с включением в оборот возобновляемых источников энергии сопровождается усложнением политических и экономических взаимосвязей и возникновением противоречий при распределении энергетических ресурсов между ведущими и развивающимися странами. Разработка методологии определения географических энергетических потенциалов оказалась достаточно своевременным инструментальным средством при решении задач актуализации ресурсов возобновляемых источников энергии на конкретные территории.

В разделе, посвященном экономико-географическим исследованиям возобновляемой энергетики, показано, как развитие мировой энергетики сопровождается трансформацией ее пространственной организации. Появление в составе энергетических систем источников энергии, использующих возобновляемые ресурсы, приводит к пространственному перераспределению между странами-центрами и периферией мировой энергетики.

Постоянное увеличение инвестиций в возобновляемую энергетику ставит ее в мировой энергетике и в энергобалансе отдельных стран выше привычного статуса второстепенного источника энергии. Кроме того, как динамично растущая отрасль, находящаяся на восходящей фазе технологического развития, возобновляемая энергетика имеет существенный потенциал совершенствования и появления новых технологий. Учитывая высокий темп роста инвестиций, возобновляемую энергетику можно считать высокотехнологичной инновационной отраслью.

Показательны результаты исследования новых эффективных технологий утилизации возобновляемой энергии и методов оценки тенденций развития возобновляемой энергетики в различных природно-климатических условиях. В связи с этим особую значимость приобретают выполненные исследования в направление разработки новых систем конденсации атмосферной влаги, биоконверсии солнечной энергии, создании нового поколения парниковых солнечно-ветровых энергетических систем преобразования низкопотенциального тепла, анализ техногенных энергетических потоков в различных типах природопользования, мониторинг правовых, нормативно-методических документов, при реализации природоохранных и энергетических технологий.

Общий вывод из представленных в монографии материалов состоит в том, что развитие энергетической сферы, связанной с возобновляемыми источниками энергии, носит избирательный характер, сопровождающийся пространственной и временной неоднородностью производства и потребления энергии. Неизбежно существующая территориальная дифференциация запасов энергии их количественная ограниченность и мозаичность оценок экологической допустимости, подтверждает актуальность поиска направлений движения к устойчивой энергетике с позиций географического изучения возобновляемых источников энергии. Результаты работ дают основание для постановки в дальнейших энерговедческих исследованиях новых фундаментальных задач географии возобновляемых источников энергии в различных странах и регионах, степени их устойчивости и замещаемости под воздействием различных природных, техногенных и социальных факторов.

ОБ АВТОРАХ

Алексеев Вячеслав Викторович (1940–2007) *– доктор физико-математических наук, профессор, действительный член Российской академии естественных наук, основатель и первый заведующий научно-исследовательской лабораторией возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Андреенко Татьяна Ивановна *– кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Берёзкин Михаил Юрьевич *– кандидат географических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Дегтярев Кирилл Станиславович *– научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Залиханов Алим Михайлович *– кандидат географических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Калинина Ольга Юрьевна *– научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Киселева Софья Валентиновна *– кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Нефедова Людмила Вениаминовна *– кандидат географических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Нечаев Андрей Мартэнович *– кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Рафикова Юлия Юрьевна *– кандидат географических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Сапожников Филипп Вячеславович *– кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук.*

Синюгин Олег Анатольевич *– кандидат экономических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Соловьев Александр Алексеевич *– доктор физико-математических наук, профессор, действительный член Российской инженерной академии, главный научный сотрудник, заведующий научно-исследовательской лабораторией возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Соловьев Дмитрий Александрович *– кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук.*

Чекарев Константин Владимирович *– научный сотрудник, инженер первой категории научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Чернова Надежда Ивановна *– кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

Шакун Владимир Петрович *– инженер научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.*

БЛАГОДАРНОСТЬ

Монография подготовлена в рамках темы госзадания МГУ им. М. В. Ломоносова АААА-А16-116032810088-8 (раздел 1 - 5), ИОРАН 0149-2019-0002 (раздел 5).

Научное издание

ГЕОГРАФИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Коллективная монография

Под редакцией А.А. Соловьева

Выпускающие редакторы – М.Ю. Берёзкин, Ю.Ю. Рафикова
Художественное оформление обложки – М.Ю.Берёзкин

Верстка: Берёзкин М.Ю., Рафикова Ю.Ю.
Подписано в печать: 10.01.2019 г.
Формат 60x84/16 бумага офсетная
Печать офсетная. Печ.л. 16,8
Тираж 500 экз.
Заказ №77309
Издательский дом "Энергия"
125009, г. Москва, Дегтярный пер., д.9
тел. +7(495)229-4241 доб.224

Коллективная монография – результат труда сотрудников научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова. В монографии показаны этапы формирования лаборатории, ее научные достижения, намечены перспективы дальнейших исследований. Рассмотрены тенденции и развитие географических, технологических, социально-экономических, природопользовательских направлений фундаментальных и прикладных работ в области изучения возобновляемых источников энергии.

Издание посвящено 30-летию лаборатории и предназначено для специалистов по возобновляемой энергетике, рационального природопользования, общественной географии преподавателей и научных сотрудников вузов, аспирантов и студентов.