

УДК 624.131.414.4

НИКОЛАЕВА С. К., КОРОЛЕВ В. А.

О РОЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ТИКСОТРОПНОГО СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Явление тиксотропии имеет широкое распространение в водонасыщенных глинистых грунтах, однако до настоящего времени остается недостаточно изученным. Имеющиеся по этому вопросу работы рассматривают основные факторы, определяющие тиксотропию, к которым относятся влажность, гранулометрический и минеральный состав грунтов, форма частиц, концентрация порового раствора электролита, рН среды, температура и др. Из перечисленных факторов до настоящего времени наименее изучено влияние положительной температуры на тиксотропное структурообразование глинистых грунтов. В то же время исследования ряда авторов [6, 8, 10], проведенные на глинистых суспензиях и пастах, указывают, что температура играет существенную роль в процессах тиксотропии и что ее повышение приводит к усилению тиксотропного упрочнения. Г. Фрейндлих, по-видимому, впервые обратил внимание на зависимость тиксотропных превращений от температуры [13]. Изучая золь окиси железа в растворе NaCl, он заметил, что с увеличением температуры от 15 до 40° С сокращается время гелеобразования, несмотря на то, что вязкость исходного раствора при этом убывала. Влияние температуры на тиксотропное упрочнение глин подробно исследовал А. И. Августиник [1]. По его данным увеличение температуры способствует тиксотропному упрочнению глин при влажности выше нижнего предела пластичности лишь в пределах 25—40°. Дальнейшее ее повышение приводит к росту времени упрочнения, а при 55—70° происходит полное разжижение системы. Подобную зависимость А. И. Августиник, а вслед за ним и Б. М. Гуменский [2] связывали с изменением свойств связанной воды в грунте.

Кроме того, из практики буровых работ также хорошо известно, что применяемые на глинистой основе промывочные жидкости упрочняются под влиянием повышенных глубинных температур, осложняя тем самым процесс проходки скважин. В связи с этим проводилось большое количество исследований термоустойчивости суспензий глин различных минералов. Для водонасыщенных же глинистых грунтов пластичной консистенции эти сведения ограничены и слабо изучены, хотя в области грунтоведения они имеют важное практическое и теоретическое значение. Помимо того почти полностью отсутствуют данные об одновременном влиянии температуры и вибрации на процессы структурообразования глинистых грунтов различного минерального состава.

Исходя из этого, нами были проведены исследования по изучению влияния температуры на тиксотропные процессы в водонасыщенных глинах с влажностью от нижнего предела пластичности (W_p) до влажности, превышающей предел текучести (W_l) в 1,5—3,3 раза, в пределах температур от 20 до 70° С.

Объекты и методика исследований

Исследования проводились на водонасыщенных образцах глинистых грунтов нарушенного сложения (пастах), которые наиболее чутко реагируют на различные внешние воздействия (механическую вибрацию, повышение температуры и т. д.). В качестве объектов исследования использовались мономинеральные глины каолинового (каолины положительный и глуховецкий) и монтмориллонитового (аксангель) состава, свойства которых приведены в работах [4, 7].

В ходе экспериментов с помощью конического пластометра определялась пластическая прочность (P_m^i) грунта в различные промежутки времени (t_i) после разрушения структуры глины перемятием. Исследования проводились на каждом образце при температурах от 20 до 70° С, в результате чего были получены графики кинетики упрочнения глин при различных температурах.

Кроме того, прочностные и некоторые реологические свойства глин определялись при непрерывном сдвиговом деформировании с помощью ротационного вискозиметра «Reotest-2» (ГДР) с цилиндрическими измерительными устройствами. Источником вибрации служил электродинамический вибростенд ВДС-10А, создающий гармонические вертикально направленные колебания. Вибрация подводилась к наружному измерительному цилиндру вискозиметра. Такая установка приборов позволяла выполнять измерения как в условиях статического сдвигового деформирования, так и при наложении низкочастотных механических колебаний на этот процесс. Исследования проводились при частоте вибрации 20 Гц, амплитуде 0,62 мм и виброускорении 10 м/с². Скорость вращения внутреннего цилиндра вискозиметра менялась в пределах от $\frac{5}{18}$ до 243 об/мин. Установка была снабжена термостатом. Измерения с помощью этой установки велись при температурах 20, 40 и 60° С. Для установления необходимой температурной однородности образцы выдерживали в течение часа перед началом эксперимента при заданной температуре.

Для определения особенностей течения образцов при увеличении градиента скорости сдвигового деформирования были получены полные реологические кривые в статических условиях и при вибрации. Кроме того, изучалась кинетика разрушения структуры грунта при вибрации и сдвиговом деформировании, а также самопроизвольное мгновенное восстановление структуры грунта после снятия вибровоздействия. При этом скорость деформирования была постоянна, равна 1,5 см/мин, что соответствовало условиям быстрого сдвига. Все опыты проводились с многократной повторностью.

Влияние температуры на течение глинистых грунтов

Анализ полученных кривых течения глинистых грунтов показывает, что увеличение температуры от 20 до 60° С приводит к снижению прочности глинистого грунта в процессе сдвига (рис. 1)¹. При этом уменьшаются значения основных реологических параметров, характеризующих течение системы: условного статического предела текучести (τ_{kl}), границы течения с наименьшей степенью нарушения структуры (τ_r'), динамического (бингамовского) предела текучести (τ_{kl}) и предела прочности структуры глинистого грунта (τ_m). В то же время снижаются наибольшая (шведовская) и наименьшая (бингамовская) пластические вязкости системы.

Воздействие вибрации приводит к более глубокому разрушению структуры грунта, особенно на малых градиентах скорости деформиро-

¹ На рис. 1 не показаны кривые течения аксангеля в статических условиях из-за наличия так называемого «разрыва сплошности» [11].

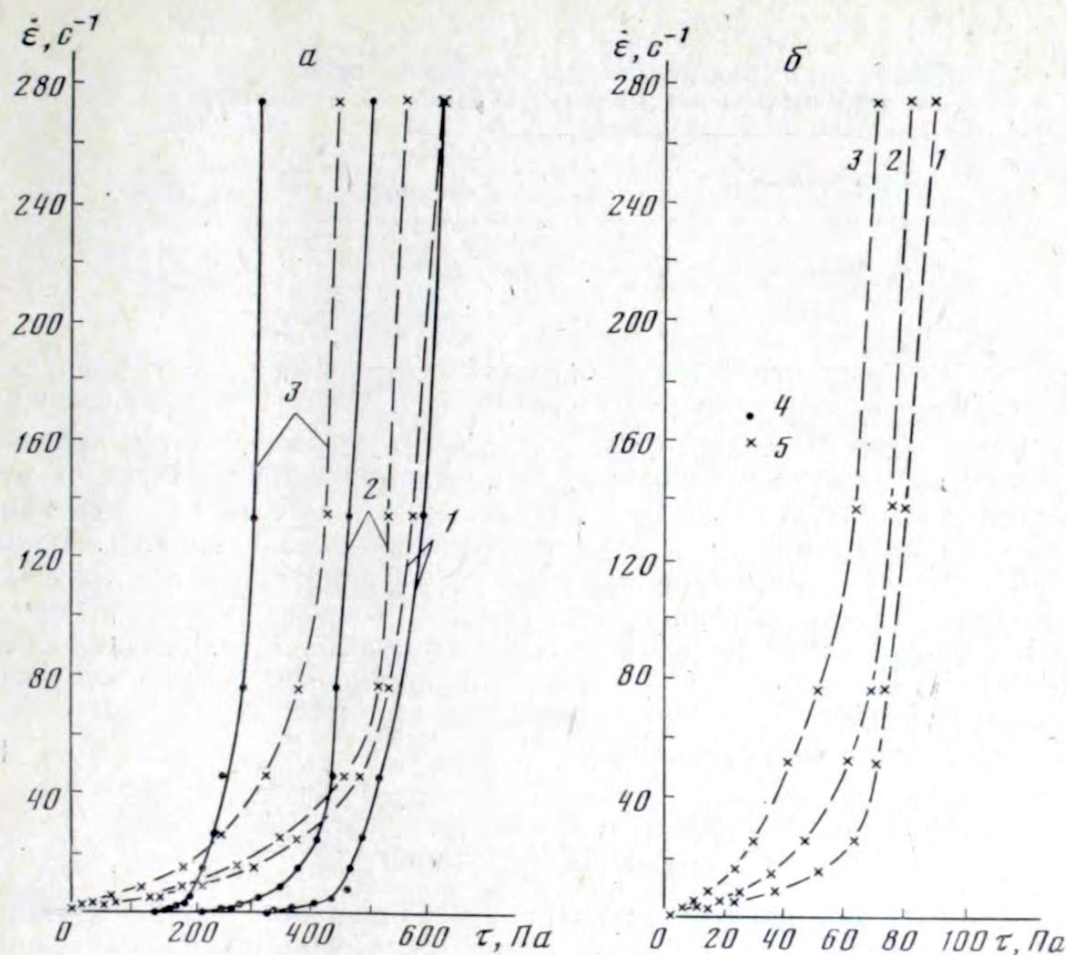


Рис. 1. Зависимость градиента скорости деформирования ($\dot{\epsilon}$) от сопротивления сдвигу (τ) для каолина положского ($W=1,83 W_f$) (а) и аскангеля ($W=3,29 W_f$) (б) при температурах 20 (1), 40 (2) и 60°С (3) в статических условиях (4) и при вибрации (5)

вания (рис. 1). При этом происходит снижение статического предела текучести ($\tau_{к1}$) практически до нуля, и полная реологическая кривая для глинистой пасты каолинового и монтмориллонитового состава становится аналогичной кривой течения, характерной для жидкообразных структурированных дисперсных систем. Повышение температуры усиливает разрушительное воздействие вибрации. По значениям величин условного статического предела текучести можно судить об уровне разрушения структуры глинистого грунта при вибрации в различных температурных режимах. Для этой цели был рассчитан коэффициент относительного разупрочнения

$$K_p = \frac{\tau_{ст} - \tau_{дин}}{\tau_{ст}},$$

где $\tau_{дин}$ и $\tau_{ст}$ — значения $\tau_{к1}$ при вибрации и в ее отсутствие соответственно. Изменение величины этого коэффициента в зависимости от температуры (в исследованном диапазоне влажностей) представлено в табл. 1. Из полученных данных следует, что увеличение температуры от 20 до 60° приводит к более сильному разупрочнению глин при воздействии на них механической вибрации и при малых градиентах скорости деформирования.

При температуре 20° с повышением градиента скорости сдвига влияние вибрации на прочность глин снижается, и уже после превышения условного динамического предела текучести грунт течет практически с той же вязкостью, что и в статических условиях. Влияние более высоких температур, как показывает анализ кривых течения, существенно

Таблица 1

Коэффициент относительного разупрочнения глинистых паст при вибрационном воздействии при различных температурах

Образец глины	K _р , отн. ед.		
	20° С	40° С	60° С
Каолин положский	0,96	0,97	0,98
Аскангель	0,97	0,98	0,985

сказывается на характере деформирования грунтовых паст. В условиях вибрации и повышенных температур (40, 60° С) при довольно высоких градиентах скорости деформирования ($\dot{\epsilon} > 25 \text{ с}^{-1}$) наблюдается явление некоторого вибрационного упрочнения или замедления процесса разрушения структуры грунта (рис. 1). Положение точки пересечения кривых течения при вибрации и в ее отсутствие неоднозначно. Очевидно, оно будет зависеть от влажности, параметров вибрации и других факторов. Выявить точную зависимость начала процесса виброупрочнения от величины градиента скорости сдвига не удалось. Однако необходимо отметить, что чем выше температура, тем при меньших градиентах наступает этот момент. Чем выше влажность глинистой пасты, тем менее выражено явление виброупрочнения.

Влияние температуры на кинетику тиксотропного структурообразования

Кинетика тиксотропного структурообразования при различных температурах изучалась несколькими методами. С помощью конического пластометра была изучена кинетика тиксотропного упрочнения глин. Результаты этих исследований показали, что повышение температуры от 20 до 70° С приводит к увеличению тиксотропного упрочнения исследуемых глин. Из графиков зависимости пластической прочности грунта (P_m) от времени упрочнения (t) видно (рис. 2), что нарастание прочности во времени у глин разного минерального состава происходит не в одинаковой мере, а у образцов, имеющих повышенную температуру (60° С) P_m растет особенно интенсивно в начальные моменты времени после разрушения структур перемятием. Сравнение кривых упрочнения глин на начальном участке при 20 и 60° показывает, что нарушенные при перемятии связи с нагреванием упрочняются более интенсивно в результате увеличения при этом кинетической энергии частиц (вращательно-поступательного броуновского движения). С ростом плотности образцов до влажности, близкой к W_p , когда частицы глины находятся в стесненных условиях и трансляционное движение отдельных глинистых частиц существенно ограничено, роль температуры в процессе тиксотропного восстановления структуры снижается.

Как следует из рис. 2, в образцах каолиновой и особенно монтмориллонитовой глин на начальном этапе тиксотропного упрочнения после некоторого роста пластической прочности P_m происходит ее незначительное снижение в интервале времени 10 мин — 1 ч, после чего величина P_m снова возрастает. Аналогичная зависимость приводится и в работе [6] для монтмориллонитовых глин при комнатной температуре. При повышенных температурах (рис. 2) сохраняется такой же характер кинетики упрочнения образцов. Очевидно, в этих случаях во времени происходят два противоположных процесса — восстановление и нарушение структуры. Соотношение их скоростей и определяет вид кривых кинетики упрочнения.

Кривые кинетики деформирования образцов глин, полученные с помощью прибора «Reotest-2», дают представление о характере процесса

разрушения структуры при сдвиге (рис. 3). В начальный момент деформирования напряжение сдвига резко возрастает, достигая максимума ($\tau_{\text{макс}}$), после чего происходит также резкое снижение напряжения и затем по мере дальнейшего роста деформаций постепенное его уменьшение вплоть до достижения некоторого минимального значения, называемого остаточным сопротивлением сдвигу ($\tau_{\text{ост}}$). Дальнейшее дефор-

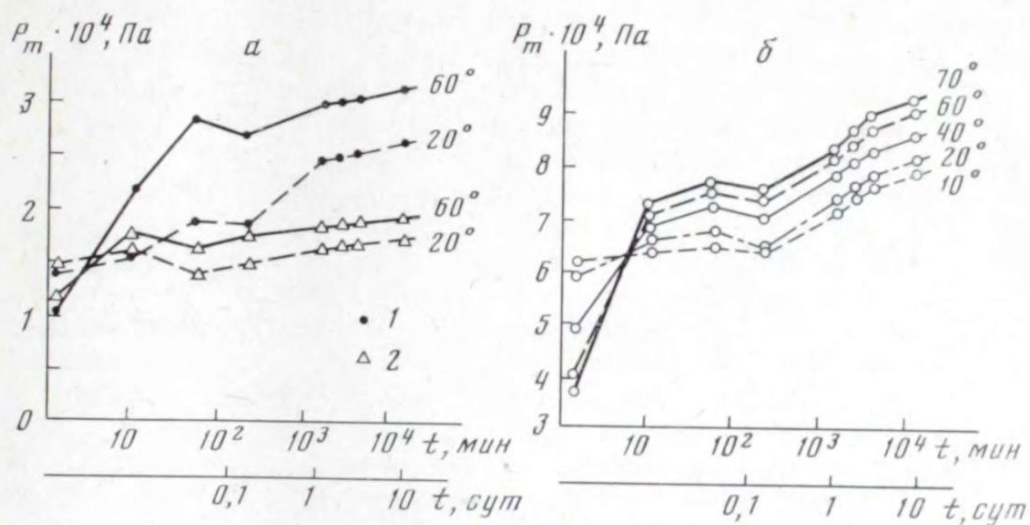


Рис. 2. Кривые кинетики упрочнения: 1 — Са-монтмориллонитовой ($W=115\%$), 2 — На-каолиновой ($W=53\%$) (а) и На-монтмориллонитовой ($W=130\%$) (б) глин при различных температурах

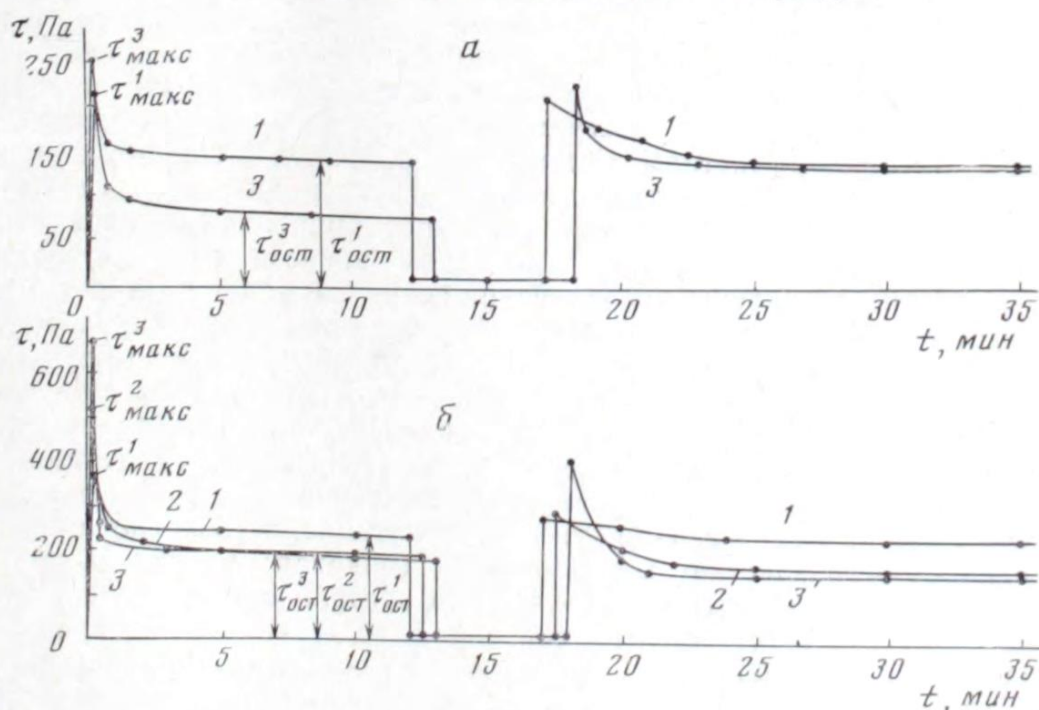


Рис. 3. Кривые кинетики деформирования образцов каолина положского ($W=2,10 W_f$) (а) и аскангеля ($W=2,36 W_f$) (б) при температурах 20 (1), 40 (2) и 60° С (3)

мирование практически не вызывает изменения касательного напряжения. Такой характер деформационного поведения глин говорит о том, что небольшой начальный участок упругой деформации сменяется разрушением структуры и вязким течением, идущим за счет легко восстанавливающихся дальних коагуляционных контактов. Это последнее состояние соответствует так называемому стационарному течению грунта с постоянным и наименьшим значением эффективной вязкости.

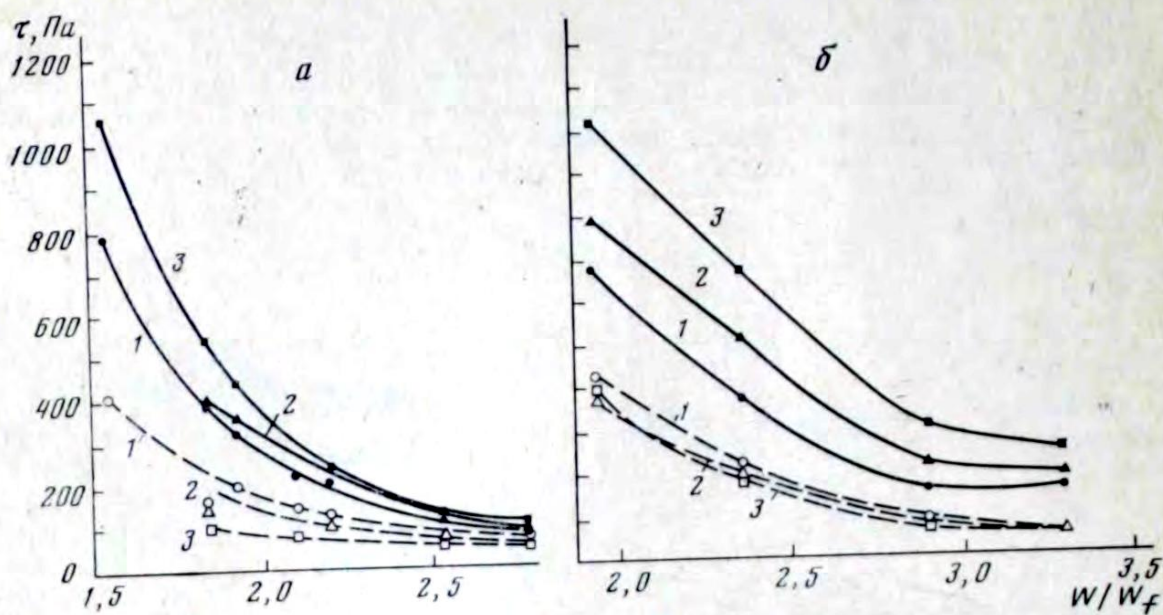


Рис. 4. Зависимость максимальной ($\tau_{\max}$) (заштрихованные значки) и остаточной ($\tau_{\text{ост}}$) прочности каолина положского (а) и аскангеля (б) от влажности образцов при температурах 20 (1), 40 (2) и 60° С (3)

Как следует из рис. 3, вибрация усиливает разрушение структуры грунта, разрывая связи между частицами и высвобождая новые объемы иммобилизованной воды. При этом вязкость грунта резко падает и нарушается ориентация глинистых частиц в направлении смещения при сдвиге. Кроме того, возрастает вероятность столкновения частиц и возникновения более прочных коагуляционных связей по энергетически наиболее активным участкам. Отключение вибрации приводит к «мгновенному» образованию пространственной структуры глины за счет этих прочных связей, чему способствует созданное вибрацией беспорядочное расположение частиц [11]. Таким образом происходит тиксотропное восстановление структуры после прекращения вибрации, которое можно считать мгновенным. Оно выражается в резком возрастании сопротивления сдвигу и появлении второго пика на кривой зависимости $\tau(t)$. При продолжении деформирования глинистого грунта достигается новый равновесный уровень, близкий к первоначальному и отвечающий стационарному течению грунта после воздействия на него вибрации.

Изменение температурного режима существенно сказывается на поведении глин при сдвиге. При увеличении температуры (по крайней мере до 60° С) возрастает максимальная (пиковая) прочность грунта ненарушенной структуры (рис. 2—4). Это связано с тем, что с ростом температуры утоньшается слой связанной воды вокруг минеральных частиц, меняются ее свойства, что влечет за собой взаимодействие частиц на более коротких расстояниях и их агрегацию. В этом случае несмотря на уменьшение вязкости порового раствора и увеличение относительного содержания свободной воды в порах грунта прочность системы в целом повышается, т. е. происходит тиксотропное структурообразование, формируется относительно прочный каркас из глинистых частиц. Деформирование такой системы приводит к разрушению структурного каркаса, причем чем выше температура, тем сильнее происходит разрушение. Фактором, определяющим прочность глинистого грунта в данном случае, очевидно, становится жидкая компонента. В результате с повышением температуры снижается остаточная прочность грунта (рис. 3, 4).

Воздействие вибрации усиливает разрушение глинистой пасты, при этом повышение температуры не вносит существенного изменения в ха-

рактен поведения глин при вибрации. Минимальная вязкость, с которой грунт течет при вибрационном воздействии, мало меняется в зависимости от температуры, причем чем выше влажность образцов, тем меньше влияние нагрева. Однако необходимо отметить, что относительное разупрочнение при вибрации и данной скорости сдвига у монтмориллонитовой глины растет с повышением температуры от 0,95 при 20° до 0,98 при 60°. Для каолиновой глины эта зависимость выражена слабее. Можно предположить, что энергия, подводимая к системе глинистого грунта посредством вибрации, значительно превышает энергию теплового движения глинистых частиц и их агрегатов при увеличении температуры. В этом случае глубина разрушения структуры грунта определяется в основном энергией, интенсивностью вибрационного воздействия и мало зависит от нагрева системы. Эти обстоятельства необходимо учитывать в природных условиях. Разупрочнение водонасыщенных глинистых грунтов при сейсмических и других вибрационных воздействиях может явиться причиной потери устойчивости склонов, откосов и подпорных сооружений, вероятность которой увеличивается с ростом температуры.

Мгновенное восстановление структуры после прекращения вибрационного воздействия увеличивается при повышении температуры от 20 до 60° С (рис. 3). При этом абсолютное приращение прочности мгновенно восстановленной структуры за счет нагрева при влажностях меньше 2W, невелико и составляет 2—5%, но при влажностях порядка 3W, эта величина увеличивается до 30—70% (в зависимости от минерального состава и влажности). По-видимому, нагрев грунта и частичное разрушение структурированных оболочек воды вокруг частиц увеличивают возможность их взаимодействия на более близких расстояниях. Кроме того, разрушение агрегатной структуры грунта при вибрации обеспечивает практически мгновенное образование большего числа связей между глинистыми частицами. В результате этого с ростом температуры повышается начальная прочность системы. При последующем деформировании наблюдается снижение прочности и вязкости глинистой пасты, тем более существенное, чем выше температура (рис. 3). Примерно через 10 мин после прекращения вибрации устанавливается новый равновесный уровень разрушения структуры, которому соответствует определенное значение остаточной сдвиговой прочности. Следует отметить, что время формирования новой зоны сдвига (после вибрации) и установления стационарного режима течения с постоянной при данной скорости деформирования вязкостью и сопротивлением сдвига, равном $\tau_{ост}$, выше, чем при деформировании образца, не подвергавшегося вибрационному воздействию. При этом чем выше температура, тем быстрее идет этот процесс.

Сравнение данных, представленных на рис. 2, 3, показывает, что пластическая прочность предельно разрушенной структуры с повышением температуры снижается в начальный период упрочнения (рис. 2, б). В то же время прекращение вибровоздействия приводит к мгновенному увеличению прочности, усиливающемуся с ростом температуры (рис. 3). Эти факты можно объяснить тем, что при вибрации структура практически предельно разрушена, а в момент снятия вибрации происходит мгновенное «схватывание» структуры. В последующие моменты времени, когда начинают осуществляться процессы тиксотропной перестройки, прочность несколько падает (рис. 2, б), а затем начинает закономерно возрастать во времени.

Известно [3, 13], что тиксотропные свойства присущи лишь глинистым грунтам с коагуляционным типом взаимодействия и определяются процессами дальней агрегации частиц, т. е. фиксацией их в устойчивых положениях, соответствующих вторичному минимуму на суммарной потенциальной кривой взаимодействия частиц. Очевидно, что в этом смыс-

ле водонасыщенные глинистые грунты, обладающие тиксотропными свойствами, можно рассматривать как периодические коллоидные структуры (ПКС), закономерности формирования которых интенсивно изучаются в последнее время на основе теории ДЛФО (Дерягина—Ландау—Фервея—Овербека). В имеющихся по этому вопросу исследованиях [3, 12] вскрыты механизм формирования ПКС, особенности их физико-механических свойств, влияние на них заряда ионов и концентрации электролитов.

Для теоретического обоснования полученных нами закономерностей и с целью изучения влияния температуры на соотношение сил притяжения и отталкивания, действующих между частицами глины, нами была рассчитана энергия взаимодействия частиц Na-монтмориллонитовой глины в растворе NaCl низкой концентрации при температуре 20 и 70° С. Для этого использовалась методика, изложенная в работах [3, 9].

При расчетах было принято, что формирование структуры глин обуславливается молекулярными силами притяжения (F_m) между частицами и электростатическими силами отталкивания (F_i), возникающими при перекрытии одноименных двойных электрических слоев, считая, что силы пластического сопротивления граничных фаз связанной воды сжатия или растяжению в случае больших межчастичных расстояний можно не учитывать. Таким образом, в отсутствие внешней нагрузки условие равновесия глинистых частиц принято в виде

$$\begin{cases} F_m + F_i = 0 \\ \frac{d(F_m + F_i)}{dH} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Энергия ионно-электростатического отталкивания (U_i) была вычислена по уравнениям [3]

$$U_i = \frac{\epsilon r^2 \psi_0^2}{H + 2r} \cdot \exp(-\kappa H) \text{ при } \kappa r \ll 1, \quad (2)$$

$$U_i = \frac{\epsilon r \psi_0^2}{2} \cdot \ln(1 + e^{-\kappa H}) \text{ при } \kappa r \gg 1,$$

где r — радиус частицы (микроагрегата); ψ_0 — потенциал поверхности; H — расстояние между частицами; κ — параметр Дебая; ϵ — диэлектрическая проницаемость.

В расчетах, согласно данным микроагрегатного анализа, приняли средний радиус частиц микроагрегатов равным $2 \cdot 10^{-5}$ см; значения диэлектрической проницаемости брались равными для воды при соответствующих температурах. Приведенная толщина двойного электрического слоя $\delta = 1/\kappa$ рассчитывалась по уравнению Дебая—Гюккеля и при температурах 20 и 70° С бралась равной соответственно 30,4 и 29,3 Å. Потенциал поверхности ψ_0 в уравнениях (2) заменялся значениями ξ -потенциала, определяемыми экспериментально при различных температурах в Na-монтмориллонитовой глине с помощью метода электроосмоса [5]. Результаты определения ξ -потенциала Na-монтмориллонитовой и Na-каолиновой глин, взаимодействующих с 0,01 н. раствором NaCl при различных температурах, приведены в табл. 2.

Энергию молекулярного притяжения (U_m) вычисляли по уравнению (3)

$$U_m = \frac{\pi A r}{2H^2}, \quad (3)$$

где r — радиус частиц (микроагрегатов); H — расстояние между частицами; A — постоянная молекулярного притяжения, равная для водной среды, согласно [3, 9, 14], $\approx 10^{-19}$ Дж.

Таблица 2

Электрокинетический потенциал частиц исследуемых глин при различных температурах

Образец глины	— ζ , мВ				
	2° С	20° С	40° С	60° С	70° С
Na-монтмориллонитовая глина	79	91	107	124	133
Na-каолиновая глина	41	42	43	44	45

В результате расчетов были получены энергии суммарного взаимодействия ($U = U_m + U_i$) частиц монтмориллонитовой глины при температурах 20 и 70° С в зависимости от расстояния между двумя частицами (рис. 5). Как показано в работе [9], для определения U достаточно

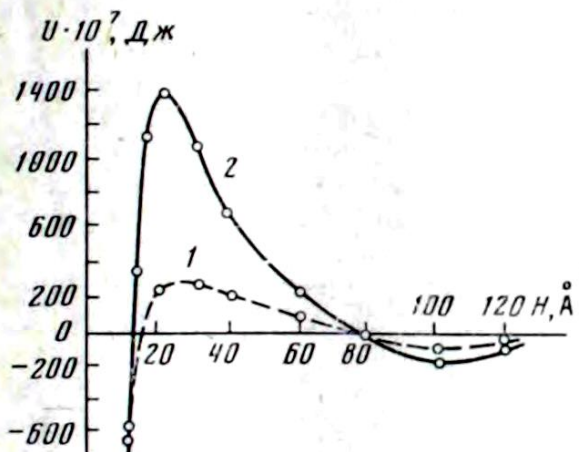


Рис. 5

Рис. 5. Суммарные потенциальные кривые парного взаимодействия частиц монтмориллонита при температурах 20 (1) и 70° С (2)

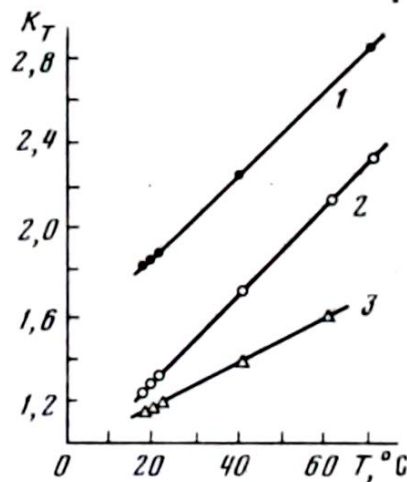


Рис. 6

Рис. 6. Зависимость коэффициента тиксотропного упрочнения (K_T) от температуры для Са-монтмориллонитовой ($W=115\%$) (1), Na-монтмориллонитовой ($W=130\%$) (2) и Na-каолиновой ($W=53\%$) (3) глин

учитывать парное взаимодействие между ближайшими глинистыми частицами. Полученные результаты могут быть применены к оценке тиксотропного структурообразования глинистых паст при температурных воздействиях.

Как следует из рис. 5, с увеличением температуры глубина вторичного минимума $U''_{\min}$ увеличивается, что свидетельствует об усилении проявления тиксотропного структурообразования, дальней агрегации (коагуляции). В этом случае действие температуры аналогично повышению концентрации электролита. В то же время рост температуры до 70° С приводит к тому, что на более коротких расстояниях ($\sim 20-80$ Å) преобладают силы отталкивания, выражающиеся в увеличении потенциального барьера $U_{\max}$. При этом с повышением температуры система становится агрегативно-устойчивой. Действие электролита обычно обратно — увеличение его концентрации снижает $U_{\max}$ вследствие сжатия диффузной части двойного электрического слоя.

Исходя из этого, можно заключить, что некоторое падение величины P_m (рис. 2) через определенное время (10 мин — 1 ч) происходит, по-видимому, вследствие потери устойчивости частиц в процессе их сближения при переходе через энергетический барьер ($U_{\max}$). Поскольку дисперсионная среда обладает определенными вязкопластическими свойствами, то фиксация частиц в устойчивых положениях после пре-

кращения перематия образца или после прекращения вибрации длится в течение некоторого времени (период упрочнения), т. е. имеет релаксационный характер. Увеличение температуры снижает вязкость связанной воды в глинах и тем самым значительно ускоряет процесс фиксации частиц (дальней коагуляции). Все это свидетельствует о том, что при нагревании На-монтмориллонитовой глины от 20 до 70° С происходят процессы коагуляции отдельных микрочастиц, интенсифицирующиеся с ростом их трансляционного движения в условиях пониженной вязкости связанной воды. В более плотных глинах (при $W < W_p$) повышение температуры почти не влияет на процесс агрегации частиц, поскольку последние имеют уже довольно плотную агрегатную структуру. Кроме того, при влажностях ниже W_p концентрация ионов электролита в порах образца глины достигает значительной величины, сравнимой с концентрированными растворами. Вследствие этого высокая концентрация электролита и уменьшение при этом барьера отталкивания ($U_{\text{макс}}$) приводят к усилению процесса ближней коагуляции глинистых частиц даже при 20° С, а дальняя коагуляция не получает своего развития. Таким образом, с развитием процесса ближней коагуляции, имеющего место при малых влажностях глин, очевидно, постепенно исчезает и способность к тиксотропному упрочнению такой системы.

В соответствии с данными, приведенными на рис. 5, при вибрации и непрерывном сдвиговом деформировании, когда происходит уменьшение расстояния между частицами, последние оказываются на расстояниях, соответствующих потенциальному максимуму (энергетическому барьеру отталкивания), что и приводит к резкому снижению прочности системы в целом.

По результатам опытных данных кинетики упрочнения образцов при различных температурах (рис. 2) были рассчитаны коэффициенты тиксотропного упрочнения исследуемых глин ($K_T = P_m^i / P_m^0$), зависимость которых от температуры показана на рис. 6. Из графика $K_T = f(T)$ видно, что коэффициент тиксотропного упрочнения для всех исследуемых глин почти линейно возрастает в области температур от 18 до 70° С и изменяется в пределах от 1,2 до 2,8. В интервале изучаемого времени (до 10 сут) наибольшее влияние температура оказывает на усиление тиксотропного упрочнения в глинах монтмориллонитового состава, характеризующихся более высокими значениями коэффициента тиксотропного упрочнения (рис. 6). Каолиновые глины менее тиксотропны, и температура в меньшей степени влияет на процесс их тиксотропного упрочнения.

Выводы

1. Температура в диапазоне 20—70° С оказывает существенное влияние на процессы тиксотропного структурообразования глинистых грунтов каолинового и монтмориллонитового состава с коагуляционным типом контактов. Повышение температуры вызывает наибольшие структурные изменения в глинах при влажности большей нижнего предела пластичности ($> W_p$) вследствие коагуляции глинистых частиц. В более плотных системах при влажности глин $< W_p$ роль температуры вплоть до 70° С в формировании структуры незначительна.

2. В зависимости от минерального состава пасты монтмориллонитовые глины являются более тиксотропными по сравнению с каолиновыми и в большей мере реагируют на внешние воздействия (повышение температуры, вибрацию и др.).

3. Пластическая прочность (P_m) структурированных глин с ростом температуры повышается во времени вследствие интенсификации при этом процесса тиксотропного структурообразования. Наряду с этим увеличивается также начальная и мгновенно восстанавливаемая прочность на сдвиг. Нарушение структуры при сдвиговом деформиро-

нии приводит к снижению прочности, и тем большему, чем выше температура грунта. В результате прочность глинистого грунта с предельно разрушенной структурой снижается при повышении температуры.

4. Тиксотропное восстановление структуры во времени обуславливается «дальней» коагуляцией глинистых частиц, интенсивность которой увеличивается при повышении температуры в соответствии с ростом глубины вторичного потенциального минимума.

5. Вибрационное воздействие приводит к интенсивному разрушению структуры грунта, в результате которого прочность резко снижается. Увеличение температуры способствует интенсификации разупрочнения грунта при вибрационном воздействии.

6. В природных условиях разупрочнение водонасыщенных глинистых грунтов при сейсмических и других вибрационных воздействиях может явиться причиной потери устойчивости склонов, откосов и подпорных сооружений, вероятность которой увеличивается с ростом температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Августиник А. И.* Тиксотропное упрочнение глин. Ленингр. технологич. ин-т. Всекопромсовета.— Сб. тр., вып. 3, КОИЗ, 1940, с. 51—70.
2. *Гуменский Б. М.* Тиксотропия грунтов и влияние на нее некоторых факторов.— В кн.: Мат. технич. совещ. по вопросам внедрения новой техники при инж.-геол. и гидрогеол. исследов. на железнодорожном транспорте. Днепропетровск, 1957, с. 67—84.
3. *Ефремов И. Ф.* Периодические коллоидные структуры. Л.: Химия, 1971, 191 с.
4. *Злочевская Р. И.* Связанная вода в глинистых грунтах. М.: Изд-во МГУ, 1969, 176 с.
5. *Злочевская Р. И., Королев В. А.* Влияние температуры на электроосмотический перенос влаги в глинах различной влажности.— В кн.: Связанная вода в дисперсных системах. Вып. 5. М.: Изд-во МГУ, 1980, с. 139—149.
6. *Кожобаев К. А.* Исследование природы тиксотропных явлений в глинистых грунтах: Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1977, 24 с.
7. *Королев В. А.* Роль температурного фактора при формировании электроповерхностных и физико-механических свойств водонасыщенных глинистых грунтов: Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1977, 22 с.
8. *Овчаренко Ф. Д., Агабальянц Э. Г., Рябченко В. И.* Особенности структурообразования высокотиксотропных дисперсий глинистых минералов в гидротермальных условиях.— Укр. хим. ж., 1967, т. 33, вып. 8, с. 869—871.
9. *Серебровская М. В., Усъяров О. Г., Муллер В. М.* Внутрикристаллическое набухание монтмориллонита в водных растворах электролитов.— Колл. ж., 1972, т. 34, вып. 5, с. 730—737.
10. *Стреленя Л. С.* Исследование упруго-пластичновязких свойств глинистых суспензий в гидротермальных условиях: Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. хим. наук. Киев: Ин-т колл. химии и химии воды АН УССР, 1971, 24 с.
11. *Урьев Н. Б.* Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980, 320 с.
12. *Усъяров О. Г.* Исследование в области устойчивости дисперсных систем и смачивающих пленок: Автореф. дис. на соискание уч. ст. докт. хим. наук. Л.: АФИ, 1977, 35 с.
13. *Фрейндлих Г.* Тиксотропия. Л.— М.: ГОНТИ, 1939, 48 с.
14. *Чураев Н. В.* О расчете констант Гамакера для тел, взаимодействующих через прослойки жидкости.— Колл. ж., 1972, т. 34, вып. 6, с. 959.