

Н. Я. ДЕНИСОВ

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 16 XII 1947)

Для глинистых пород характерна ярко выраженная механическая неоднородность. Более или менее резкие различия в размерах сцепления внутри частиц и между частицами, понижающиеся в процессе консолидации и исчезающие лишь под влиянием процессов динамометаморфизма, вызывают возникновение неоднородности первого рода. Неоднородность второго рода заключается как в различиях в размерах сцепления между разными частицами, так и в неодинаковой, в связи с различиями в размерах, форме и в пространственном расположении частиц, степени концентрации напряжений в их контактах. В процессе структурных (3) деформаций, вызываемых перегруппировкой частиц, осуществляется непрерывное изменение в степени концентрации напряжений в различных контактах и в размерах сцепления. В первое время после приложения нагрузки приобретают возможность перемещения те частицы (и их агрегаты), в контактах которых с их соседями наиболее высокие деформирующие напряжения сочетаются с низкими размерами сцепления. Происходящие вначале некоторые перемещения отдельных частиц приводят к изменениям в распределении напряжений в контактах и их повышению в отдельных пунктах. Там, где деформирующие напряжения превысят значение сцепления, вновь появляется возможность перегруппировки частиц. Подобное вовлечение в движение все новых и новых групп частиц приводит к затягиванию деформаций во времени. Масштабы приращения деформаций при постоянной нагрузке в связи с повышением сопротивления, оказываемого сцеплением, с течением времени уменьшаются и происходит постепенное затухание процесса сжатия.

Таким образом, наблюдаемое при уплотнении глинистых пород возникновение эффекта последствия, выражающегося в большей или меньшей продолжительности процесса необратимого сжатия при постоянной нагрузке, не связано, вопреки обычным представлениям, только с влиянием вязкости удаляемой из их пор воды. Наглядным подтверждением этого служат результаты опытов\* по сравнительному изучению продолжительности сжатия глинистых порошков, паст и водных осадков в компрессионных приборах (табл. 1).

В большинстве случаев стабилизация осадки порошков не наступала и по истечении 100 час., причем, как правило, продолжительность сжатия сухих порошков была не меньшей, а большей, чем паст и водных осадков.

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что растягивание сжатия глинистых пород во времени является проявлением общей особен-

\* Проведенных при участии В. М. Жуковой и А. И. Каратаевой.

Затухание процесса сжатия глинистых порошков, паст и водных осадков, приготовленных из кудиновской глины (осадка в мм при давлении 0,5 кг/см<sup>2</sup>)

Состояние	Продолжительность действия давления в часах					
	1	2	24	48	72	96
Сухой порошок . . . . .	0,284	—	0,328	0,331	0,346	0,355
Паста . . . . .	—	0,059	0,110	0,111	—	0,111
Водный осадок . . . . .	1,950	—	2,420	2,420	—	—

ности минеральных полидисперсных систем, не зависящей от их состояния, в том числе и от заполнения пор водой. Осуществляемая за счет расходования потенциальной энергии работа по разрушению структуры и перемещению частиц не может, конечно, осуществляться мгновенно.

После преодоления деформирующими напряжениями сцепления между теми или иными частицами возникает их движение, в процессе которого эти напряжения преодолевают непрерывно возрастающее влияние первичного сцепления (3), а при весьма малых скоростях движения и влияние возникающего при этом сцепления упрочнения (например в силу проявления тиксотропного структурообразования). Поэтому быстро протекающее увеличение давления, испытываемого породами, а следовательно и деформирующих напряжений, должно приводить при прочих равных условиях к большему уплотнению, чем медленно осуществляемое повышение давления. Это положение подтверждается экспериментальными данными, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Влияние скорости нагружения на величину коэффициента пористости глинистых паст (коэффициент пористости при давлении 3 кг/см<sup>2</sup>)

Порода	Характер передачи давления		
	полностью (сразу)	ступенями 0,5; 1,0; 2,0 кг/см <sup>2</sup> через 30 мин.	ступенями 0,5; 1,0; 2,0 кг/см <sup>2</sup> после стабилизации при каждой ступени
Кудиновская глина . . . . .	0,95	1,02	1,16
Юрская глина . . . . .	1,59	1,70	1,80

Данные табл. 2 показывают, что значительных осадок сооружений, возводимых на слабых глинистых породах, находящихся в структурно-активном состоянии, можно избежать при медленно протекающем повышении нагрузок, при котором проявляется влияние сцепления упрочнения. Значение длительного тиксотропного упрочнения в формировании глинистых пород становится особенно ощутимым, если учесть значительную продолжительность времени их существования. Весьма малые приращения прочности, которыми пренебрегают при лабораторных исследованиях процессов тиксотропного структурообразования, в течение геологически длительных периодов могут привести к весьма значительному упрочнению пород.

Обычно принято считать, что в начале сжатия глинистых грунтов вызывающее его давление полностью воспринимается водой, заполняющей поры, и лишь после затухания осадки оно передается на скелет. Так как перемещения частиц скелета могут происходить лишь под влиянием испытываемых ими напряжений, то на этом основании можно было бы предполагать, что наиболее значительные деформации глинистых пород должны возникать в конце процесса сжатия. Неправильность этого предположения очевидна. Частицы скелета глинистых пород непрерывно испытывают влияние силы тяжести вышележащих толщ или внешней нагрузки, и возникающие при этом деформирующие напряжения, как показано выше, и вызывают перемещения частиц. Поэтому рассматриваемое положение в отношении к структурным и

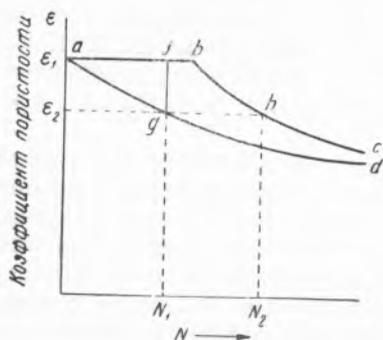


Рис. 1. Кривые уплотнения глинистых пород:  $abc$  — при влиянии сцепления упрочнения,  $agd$  — в оптимальных условиях, без влияния сцепления упрочнения

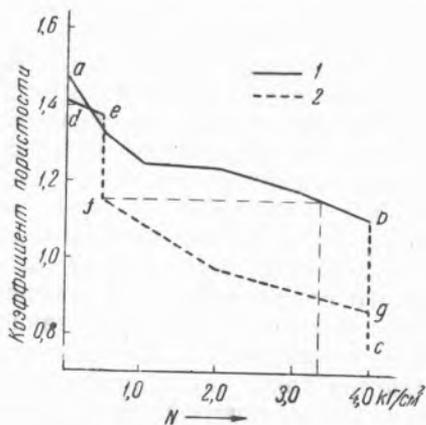


Рис. 2. Кривые уплотнения порошков кудиновской глины: 1 — сжатие сухого порошка, 2 — сжатие при увлажнении

структурно-упругим деформациям нельзя считать применимым. В свете изложенного нельзя также согласиться с тем, что скорость сжатия глинистых пород определяется исключительно степенью их водопроницаемости. Поэтому пользующаяся большой популярностью математическая теория консолидации не может рассматриваться как обоснованная.

В процессе уплотнения глинистых пород весьма существенное значение имеет влияние сцепления упрочнения<sup>(3)</sup>. Влияние процессов, снижающих значение сцепления упрочнения на сжимаемость глинистых пород, иллюстрируется рис. 1. Изменение условий существования (в результате увлажнения, оттаивания или выветривания и т. п.) глинистой породы с коэффициентом пористости  $\epsilon_1$  (точка  $f$  на кривой  $abc$ ) вызывает устранение или снижение влияния сцепления упрочнения и приводит к уплотнению, характеризуемому разностью  $\epsilon_1 - \epsilon_2$  (отрезок  $fg$ ). Для получения такого же уплотнения в неизменных условиях (точка  $h$  на кривой  $abc$ ) необходимо увеличить давление до величины  $N_2$  с соответствующим повышением деформирующих напряжений. Таким образом, устранение влияния сцепления упрочнения в результате отмеченного выше изменения условий существования эквивалентно по своим последствиям повышению давления.

При уплотнении глинистых порошков, увлажнение снижает трение между частицами, оказывающее сопротивление сжатию этих порошков. Насколько существенно влияние увлажнения показывает рис. 2. Увлажнение, осуществленное, например, при нагрузке  $0,5 \text{ кг/см}^2$ , снизило коэффициент пористости порошка кудиновской глины с 1,36 до 1,15.

Чтобы вызвать такое же снижение коэффициента пористости без влияния воды, надо было бы увеличить давление до  $3,3 \text{ кг/см}^2$ . Таким образом, в рассматриваемом случае давление, эквивалентное увлажнению, составляет  $2,8 \text{ кг/см}^2$ .

Заметим, что в результате дополнительной осадки, вызванной увлажнением порошка при давлении  $4 \text{ кг/см}^2$ , его коэффициент пористости имеет более низкое значение (точка *c*), чем порошка, испытывавшего увлажнение при меньшем давлении (точка *g*) и уплотнявшегося в дальнейшем во влажном состоянии. Подобное соотношение, наблюдавшееся во всех аналогичных опытах, объясняется следующим. В порошке, уплотнявшемся в сухом состоянии, увлажнение при значительном давлении вызывает перемещения частиц с большими скоростями, при которых влияние сцепления упрочнения сводится к минимуму. Если же увлажнение осуществляется при малом давлении, которое в последующем возрастает медленно, ступенями, то сказывается влияние сцепления упрочнения, уменьшающего размеры сжатия.

Все изложенное выше показывает, что установленные акад. П. А. Ребиндером <sup>(4)</sup> закономерности деформаций твердых тел, вытекающие из физико-химического понимания их природы и роли среды, приложимы и к глинистым породам.

В качестве реологической модели суглинка М. Рейнер <sup>(5)</sup> предлагает кельвиново тело с упругим последствием, состоящее из параллельного соединения двух элементов: идеально упругой пружины и поршня с отверстиями, погружающегося в цилиндр с вязкой жидкостью. Скорость сжатия и удлинения пружины в этой модели определяется скоростью движения поршня. Подобная аналогия суглинка с кельвиновым телом, повторяющая соответствующие положения Терцаги, является принципиально неправильной: она не отображает сути процессов, протекающих в глинистых породах при их деформации. Наиболее характерные для глинистых пород структурные деформации <sup>(3)</sup> являются остаточными, тогда как для кельвинова тела характерна обратимость деформаций со временем. Нельзя не отметить, что для возникновения структурных деформаций далеко недостаточно наличия путей для удаления воды. Эти деформации возникают лишь после того, как деформирующие напряжения достигнут размеров, превышающих значение „запаса“ сцепления <sup>(3)</sup>, и вызовут устранение или уменьшение влияния сцепления упрочнения. Поэтому деформация глинистых пород начинается не при первых ступенях нагрузки, и графическое изображение зависимости деформаций от напряжений ничего общего не имеет с прямой, характерной для гуковских тел. В модели кельвинова тела удлинение пружины является причиной перемещения воды, тогда как, напротив, набухание глинистых пород вызывается перегруппировкой молекул воды. Эта перегруппировка может осуществляться и без поступления воды извне <sup>(1)</sup>.

Всесоюзный научно-исследовательский институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии „ВОДГЕО“

Поступило  
12 XII 1947

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Н. Я. Денисов, О природе просадочных явлений в лессовидных суглинках 1946. <sup>2</sup> Н. Я. Денисов, ДАН, 56, № 1 (1947). <sup>3</sup> Н. Я. Денисов, ДАН, 58, № 6 (1947); 59, № 2 (1948). <sup>4</sup> П. А. Ребиндер, Юбил. сборн. АН СССР к 30-летию Октябрьск. Революции, 1, 1947. <sup>5</sup> М. Рейнер, Десять лекций по теоретической реологии, 1947.