

Н. Я. ДЕНИСОВ

## К ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 15 VI 1947)

Наиболее распространенные глинистые породы водного происхождения на протяжении истории своего существования переходят из почти жидкого состояния (коллоидные растворы) в твердое (1,2). В соответствии с этим и характер возможных их деформаций изменяется от течения, свойственного коллоидным растворам, до скалывания, присущего хрупким телам. Деформации глинистых пород, как и вообще всех тел, представляют объемное отображение перемещений (сдвигов) основных структурных элементов этих пород. При наиболее распространенных деформациях уплотнения такими перемещающимися друг относительно друга структурными элементами будут частицы и агрегаты частиц. Проявление подобных деформаций не ограничивается лишь изменением формы или объема глинистых пород. Характернейшей их особенностью является резкое изменение состояния и свойств этих пород: изменение плотности, величины сопротивления сдвигу, модуля деформации и т. п. Таким образом, эти деформации представляют резко выраженный неустановившийся процесс.

Процессы формирования (консолидации) глинистых пород складываются из уплотнения, протекающего под влиянием силы тяжести, и отвердения, протекающего под влиянием процессов физико-химических и химических.

Рис. 1 иллюстрирует значение процессов уплотнения и отвердения в жизни глинистых пород. Кривая *abcde* отображает уплотнение осадка в оптимальных условиях — при непрерывном его накоплении при минимальном влиянии связности. Вначале уплотнение при возрастающем давлении протекает за счет сокращения свободного объема пор, и подобные невозстановимые деформации (отрезок *ac*) можно назвать структурными. Вместе с сокращением свободного объема пор при повышении давления будет происходить уменьшение толщины коллоидных пленок, окружающих более крупные частицы, приводящее к структурно-упругим деформациям. Значение этих деформаций при повышении давления будет возрастать и на протяжении отрезка кривой *cd* они будут преобладающими. Уплотнение осадка сводит к минимуму возможности перемещений частиц друг относительно друга, и дальнейшее повышение давления вызовет появление упругих дефор-

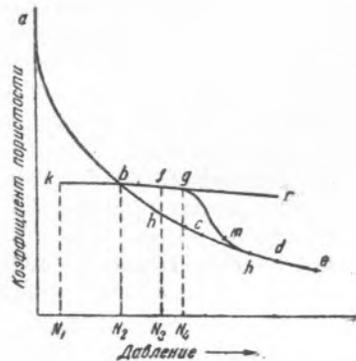


Рис. 1. Кривые консолидации водного глинистого осадка в различных условиях

маций, заключающихся в изменении объема породы в целом (отрезок  $de$ ). Таким образом, для начальной фазы естественного уплотнения глинистых пород характерны структурные деформации, затем структурно-упругие, после чего упругие. Понятно, что четких границ между проявлением этих деформаций быть не может и на определенной фазе уплотнения могут преобладать какие-то определенные деформации, наименование которых и присваивается всей фазе. Уменьшение значения структурных деформаций приводит к увеличению значения деформаций структурно-упругих. По размерам наибольшее значение имеют структурные деформации, проявление которых в некоторых, весьма малых размерах будет сопровождаться упругими деформациями.

Четвертичные и многие более древние глинистые отложения являются примерами пород с незавершенными структурными деформациями. Глинистые породы нижнего мела, распространенные в пределах Поволжья, являются примером пород с полностью закончившимися структурными деформациями и испытавших структурно-упругие деформации.

Перейдем к анализу влияния на свойства глинистых пород процесса отвердения. Предположим, что в состоянии породы, иллюстрируемом точкой  $b$  (рис. 1), произошли существенные изменения, которые привели к возникновению и усилению связей между частицами (<sup>3</sup>) и ее отвердению. При последующем повышении давления эта порода будет испытывать, пока не разрушатся связи между частицами, деформации сжатия в целом, являющиеся упругими (отрезок  $bf$ ). Если в состоянии, отображенном точкой  $f$ , может произойти, вследствие изменения условий существования породы, разрушение связей между частицами (например под влиянием воды), то это приведет к возникновению структурных деформаций (отрезок  $fh$ ). При значительной прочности связей, сохраняющихся при повышении давления выше значения  $N_3$ , будут продолжаться упругие деформации (отрезок  $fg$ ). В дальнейшей истории существования породы возможны два крайних случая изменений. Если повышающееся давление будет не в состоянии разрушить связи между частицами, то будут продолжаться упругие деформации (отрезок  $gr$ ). При прочности связей, меньшей прочности частиц, повышение давления приведет к разрушению структуры, протекающему постепенно, в пределах большей или меньшей части массива породы, аналогично разрушению структуры и понижению вязкости коллоидных растворов (<sup>4</sup>). Это приведет к уплотнению, протекающему вначале в зоне структурных деформаций  $gm$  и структурно-упругих деформаций  $mh$ . Кривая  $abcde$  отображает состояние истинного соответствия пористости давлению, отрезки  $bfgr$  и  $bfgmh$  — состояние кажущегося соответствия пористости давлению при недоуплотнении породы. Если порода из состояния, иллюстрируемого точкой  $b$ , независимо от того, отвердеет она или нет, придет в состояние, отображаемое точкой  $k$  (при уменьшении нагрузки, вследствие, допустим, эрозии), то она окажется переуплотненной.

Важным выводом из проведенного анализа влияния отвердения породы на процесс ее уплотнения является то, что в процессе уплотнения структурные деформации не заканчиваясь могут переходить в упругие деформации, отличные от рассмотренных ранее, при анализе уплотнения в оптимальных условиях.

Процесс естественной консолидации глинистых пород можно представить себе как слагающийся из следующих фаз: структурные деформации, затем при медленном накоплении осадков или при наличии перерывов, способствующих тиксотропному структурообразованию или проявлению цементации, упругие деформации, затем вновь структурные, сменяющиеся упругими деформациями, и т. д. В этом чередовании отдельных видов деформаций структурные деформации начинают

проявляться во всех тех случаях, когда сила тяжести накапливающихся осадков оказывается в состоянии преодолеть влияние физических, физико-химических и химических факторов, создающих связи между частицами. Такое чередование будет происходить до тех пор, пока не произойдет значительное уплотнение, при котором начинают играть заметную роль структурно-упругие и упругие деформации.

В строительной практике в качестве оснований обычно используются в той или иной мере отвердевшие глинистые породы. Деформации, протекающие в этих породах в результате повышения давления, при невозможности выпирания, могут быть следствием перемещений (сдвигов) частиц, с уменьшением пористости породы, и сдвигов элементов кристаллической решетки без изменения пористости. Деформации могут проявляться в виде сжатия породы в целом, без разрушения структуры пород, и в виде перемещения их частиц. Развивая в применении к глинистым породам представление о характеристике механических свойств материалов по величине сопротивления разрушению и пластическим деформациям (5), целесообразно использовать следующие показатели:  $p_1$  — сопротивление разрушению структуры породы (аналогично понятию о предельном напряжении сдвига коллоидных растворов) (4);  $p_2$  — сопротивление разрушению минеральных частиц скелета породы;  $q_1$  — сопротивление пластическим деформациям породы в целом;  $q_2$  — сопротивление пластическим деформациям частиц скелета. Обычно  $p_1 < p_2$  и  $q_1 < q_2$  и только для весьма плотных и прочных пород типа сланцев  $p_1 = p_2$  и  $q_1 = q_2$ .

Деформации типа течения, происходящие в виде перемещения частиц без изменения объема пород (выпирание и некоторые оползни), целесообразно называть псевдопластическими, в отличие от пластических деформаций, протекающих за счет сдвигов элементов кристаллической решетки. Сопротивление, оказываемое этим деформациям, аналогично проявлению вязкости коллоидных растворов.

Если, как это характерно для подавляющего большинства глинистых пород,  $p_1 < q_1$ , то при повышении давления пластические деформации породы в целом проявляться не могут. После незначительных по размерам упругих деформаций в подобных породах произойдет разрушение структуры и возникнут структурные деформации уплотнения (пород неуплотненных) или, в соответствующих условиях, псевдопластического течения (пород, находящихся в состоянии истинного соответствия пористости давлению и переуплотненных). Ширина диапазона давлений, при которых проявляются последние деформации, определяется разностью  $N - p_1$ , где  $N$  — величина давления, находящегося в истинном соответствии с коэффициентом пористости в естественных условиях (1).

Если  $p_1 > q_1$ , то разрушению структуры предшествуют, помимо упругих, и пластические деформации породы в целом. Такое явление характерно лишь для весьма плотных и прочных пород. В свою очередь характер деформаций частиц может быть следующим: если  $p_2 < q_2$ , то пластические деформации частиц не проявляются; если  $p_2 > q_2$ , то они проявляются.

В соответствии с изложенным выше деформации глинистых пород при повышении давления при невозможности выпирания проявляются в виде двух последовательно сменяющих друг друга циклов. На протяжении первого цикла, цикла консолидации пород, к той или иной части которого относятся в своем большинстве условия работы пород в качестве оснований сооружений, упругие деформации обычно сменяются разрушением структуры и структурными и структурно-упругими деформациями. В пределах цикла одни деформации могут накладываться на другие. На протяжении второго цикла, сменяющего первый и характерного главным образом для процессов геологических (динамо-

метаморфизм), проявляются упругие и пластические деформации, завершающиеся разрушением и перекристаллизацией слагающих породу минералов. Характеристика циклов деформаций и слагающих их фаз приведена в табл. 1.

Таблица 1

Развитие деформаций глинистых пород при повышении давления при невозможности выпирания

Фазы деформаций	Физическая сущность деформаций	
	первый цикл	второй цикл
Упругая . . . . .	Восстановимые перемещения элементов кристаллической решетки	
Пластическая . . . . .	Не характерна	Остаточные перемещения элементов кристаллической решетки
Разрушение . . . . .	Разрушение связей между частицами, обуславливающее возможность их перемещений	Раздробление частиц и перекристаллизация минералов
Структурная . . . . .	Остаточные перемещения частиц с уменьшением объема породы	Не проявляются
Структурно-упругая	Восстановимое перемещение частиц за счет уменьшения толщины коллоидных пленок, с уменьшением объема породы	Не проявляются

Возможность проявления деформаций тех или иных циклов и фаз определяется историей предшествующей консолидации пород. Деформации пород неотвердевших, малой плотности (илы, лёссы во влажном состоянии и т. п.) начинаются обычно с третьей и четвертой фаз. Лишь в некоторых случаях разрушению структуры таких пород предшествуют упругие деформации, верхний предел проявления которых зависит от темпов нагружения и соответствует давлению порядка 0,1—0,3 кГ/см<sup>2</sup>. В наиболее распространенных породах средней плотности и твердости упругие деформации имеют несколько большее значение и вместе с постепенно протекающим разрушением структуры сменяются структурными деформациями. В таких переуплотненных породах, как глины нижнего мела, упругие деформации после разрушения структуры сменяются структурно-упругими. Для весьма переуплотненных и твердых пород типа сланцев возможны лишь деформации второго цикла.

Московский инженерно-строительный институт  
им. В. В. Куйбышева

Поступило  
15 VI 1947

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Н. Я. Денисов, ДАН, 55, № 5 (1947). <sup>2</sup> Н. Я. Денисов, ДАН, 56, № 1 (1947). <sup>3</sup> Н. Я. Денисов и П. А. Ребиндер, ДАН, 54, № 6 (1946). <sup>4</sup> П. А. Ребиндер, Тр. совещания по вязкости жидкостей и коллоидных растворов, изд. АН СССР, 1941. <sup>5</sup> Я. Б. Фридман, Механические свойства металлов, 1946.