

Н. Я. ДЕНИСОВ

**ВЛИЯНИЕ СВЯЗНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД НА ПРОЦЕСС  
ИХ ГРАВИТАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ**

(Представлено академиком Д. С. Белянкиным 25 IX 1946)

Значение связности<sup>(3)</sup> в понимании природы сопротивления сдвигу вполне сформировавшихся плотных глинистых пород очевидно, но вопрос о том, когда, на каком этапе образования и существования рассматриваемых пород начинает сказываться ее влияние, до сих пор остается неясным. Чтобы разобраться в обстановке формирования глинистых пород, полезно рассмотреть данные, относящиеся к состоянию современных глинистых отложений, образующихся в озерах, морях, долинах рек и водохранилищах.

Физическое состояние современных глинистых отложений. Исследования, проведенные в связи с изучением вопроса о заилении водохранилищ, показывают, что плотность отлагающихся под водой осадков повышается с увеличением содержания крупнозернистых частиц и с возрастанием скорости их уплотнения. Данные о плотности глинистых осадков, характеризуемой величиной объемного веса, приведенные в ряде работ<sup>(5, 6, 8)</sup>, показывают, что для современных отложений, постоянно находящихся под водой, характерны значения объемного веса порядка 0,5 г/см<sup>3</sup>.

При такой величине объемного веса и удельном весе 2,7 пористость верхней части толщи интересующих нас отложений составляет 81,5% (коэффициент пористости 4,4), влажность 163% и плотность 1,31. Вода, занимая 82% объема осадков, является основным их компонентом, и физическое их состояние обычно характеризуется как полусуспензия, жидкий ил и т. п. Такая характеристика находится в соответствии и с действительным состоянием извлекаемых образцов, их текучестью. Все это создает представление о подобных отложениях как о близкой по свойствам к жидкостям массе, совершенно лишенной связности и способности оказывать какое-либо сопротивление внешнему механическому воздействию.

Механические свойства современных глинистых отложений. При рассмотрении этих свойств наше внимание привлекают приведенные К. Терцаги<sup>(9)</sup> весьма интересные данные, относящиеся к глинистым образованиям Золотого Рога и одного из итальянских озер. Анализ результатов исследования этих глин до глубины в 60—80 футов показывает, во-первых, что их влажность примерно равна величине нижнего предела текучести и не понижается, как следовало бы ожидать, с глубиной. Второе, весьма важное, обстоятельство заключается в том, что влажность образцов нарушенной структуры с глубины 80 футов в компрессионных приборах при давлении, равном природному, оказалась на 20% меньше естественной. Эти данные наглядно показывают, что сила тяжести не является ре-

шающим фактором в уплотнении рассматриваемых отложений. Отсутствие закономерного уменьшения пористости и влажности с глубиной отмечалось (1) и для плотных глин.

Для многих разрезов аллювиальных, озерных и морских отложений характерно погребение глин под слоями крупнозернистого материала — песков и галечников.

Трудно допустить, чтобы во всех случаях подобного залегания накоплению крупнозернистого материала предшествовало уплотнение ранее образовавшихся глинистых осадков благодаря высушиванию. Приходится считаться с тем, что отложение песка и галечника происходило в воде на поверхности осадков, выше охарактеризованных, как жидкие илы, из которых впоследствии образовались рассматриваемые глины. Наличие в большинстве случаев четких границ между слоями глин и крупнозернистого материала свидетельствует о том, что зерна этого материала не тонули в илах, оказывавших их проникновению определенное сопротивление, не увязывающееся с представлением о малой плотности этих илов.

В этой связи интересны некоторые данные из практики строительства морских сооружений (7). Перед возведением одного из доков в Италии „жидкие илы“ были покрыты слоем песка, что позволило осуществить строительство с довольно значительными нагрузками. Буровая скважина, пройденная после семнадцатилетней работы песчаного слоя, показала, что проникновения песка в ил не произошло, и ил ниже контакта не отличался от природного, не покрытого песком ила.

Возникновение связности и структуры глинистых пород. Все приведенные в предыдущем разделе фактические данные согласованно находятся в явном противоречии с ранее изложенными представлениями о физическом состоянии современных глинистых отложений. Выход из этого противоречия может быть найден лишь в признании того, что для глинистых осадков в воде, даже при весьма малой их плотности, характерно в той или иной мере наличие связности и структуры. Эта связность и структура зарождаются на самой ранней стадии формирования глинистых пород — в период седиментации. Подобное представление полностью соответствует результатам лабораторного изучения тиксотропных свойств глинистых осадков (3) и исследований структурообразования в коллоидных суспензиях глин (4). Обычно же наблюдаемое текучее состояние извлекаемых из-под воды образцов глинистых осадков является следствием разрушения связей между частицами, вызываемого проникновением грунтоноса, и проявления тиксотропных свойств рассматриваемых отложений.

Понятие о граничных условиях гравитационного уплотнения. Различие в плотности глинистых отложений одного и того же состава может быть следствием: а) различия в условиях седиментации осадка и б) влияния неодинаковых условий его уплотнения.

Многообразие естественных путей накопления механических глинистых осадков, по характеру влияния на свойства пород, может быть сведено к двум основным типам образования: водным путем и в субаэральных условиях. Для начальной стадии формирования глинистых пород характерно, что водные образования менее плотны, чем субаэральные, причем водным отложениям свойственна и большая сжимаемость.

Влияние условий уплотнения на плотность осадка сказывается внутри каждого из выделенных выше двух основных генетических типов отложений. Образовавшиеся, допустим, водным путем глинистые осадки одинакового состава могут иметь одинаковую начальную (седиментационную) плотность, но различия в условиях дальнейшего их существования, даже в условиях одинакового давления, приводят к

образованию пород с различной пористостью. Подобное положение характерно, конечно, и для субаэральных отложений.

Анализ пределов возможных изменений условий гравитационного уплотнения образовавшихся тем или иным путем глинистых осадков дает возможность установить для каждого из них граничные условия уплотнения — оптимальные и наихудшие. Для водных отложений оптимальные условия уплотнения будут иметь место при окружении частиц снижающими трение коллоидными пленками при отсутствии связности и при значительных темпах накопления осадка. Наихудшие условия уплотнения будут определяться наибольшим влиянием содержащихся в воде электролитов, содействующим повышению трения и возникнове-

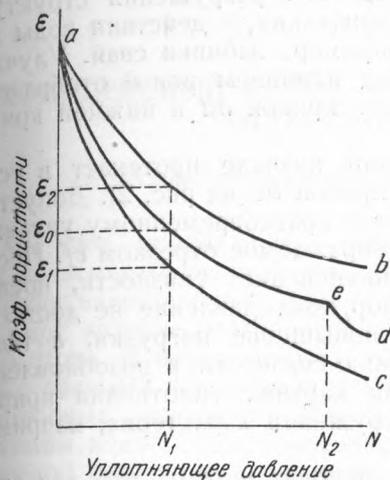


Рис. 1. Кривые консолидации глинистых осадков водного происхождения: *ab* и *ac* — кривые граничных условий уплотнения; *aed* — кривая природного уплотнения или уплотнения под влиянием давления от сооружения

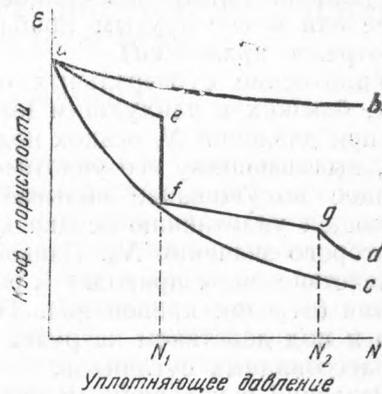


Рис. 2. Кривые консолидации глинистых осадков субаэрального происхождения: *ab* и *ac* — кривые граничных условий уплотнения; *aefd* — кривая природного уплотнения или уплотнения под влиянием давления от сооружений

нию связей между частицами, медленным повышением величины уплотняющего давления в связи с низкими темпами накопления покрывающих осадков и наличием перерывов в осадконакоплении.

Для субаэральных отложений оптимальные условия уплотнения обусловлены постоянным влиянием влаги и отсутствием связности, наихудшие — при уплотнении в сухом состоянии.

На графике зависимости коэффициента пористости от давления для пород водного (рис. 1) и субаэрального (рис. 2) образования каждому из граничных условий уплотнения осадка будет отвечать своя кривая. Кривая, отвечающая наихудшим условиям уплотнения (кривые *ab*), будет занимать верхнее предельное положение кривой кажущегося соответствия пористости давлению<sup>(2)</sup>, кривая же уплотнения в оптимальных условиях будет одновременно отображать состояние истинного соответствия пористости давлению (кривые *ac*). Понятно, что для таких крупнозернистых пород, как пески, обе кривые будут более или менее полно совпадать. Для пород глинистых, в пределах обычных величин нагрузок, характерно расхождение этих кривых, причем для субаэральных образований более значительное, чем для водных.

Для естественных процессов гравитационного уплотнения не характерны ни оптимальные, ни наихудшие условия уплотнения — они осуществляются в промежуточных условиях, которым отвечает кривая

кажущегося соответствия пористости давлению, лежащая между кривыми граничных условий (кривые *ad* на обоих рисунках). Таким образом, любому глинистому осадку, испытывающему давление  $N_1$  (рис. 1), соответствуют два граничных значения коэффициента пористости  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , между которыми находится значение коэффициента пористости в естественных условиях  $\varepsilon_0$ .

При медленно протекающем ухудшении условий уплотнения кривая *ad* (рис. 1) будет более или менее плавно приближаться к верхней кривой граничных условий *ab*. Чем дальше отклоняется кривая *ad* от кривой *ac* и чем меньше, следовательно, показатель энергетической устойчивости породы <sup>(2)</sup> по сравнению с единицей, тем в большей мере опасны для строительства последствия разрушения структуры пород, независимо от причин, его вызывающих, — действия воды или механического воздействия в виде, например, забивки свай. Улучшение условий уплотнения (например, под влиянием воды) отобразится более или менее крутым приближением кривой *ad* к нижней кривой *ac* (отрезок кривой *ed*).

Уплотнение субаэральных отложений вначале протекает в условиях, близких к наихудшим (отрезок кривой *ae* на рис. 2). Допустим, что при давлении  $N_1$  осадок подвергается кратковременному увлажнению, вызывающему его уплотнение, отображаемое отрезком *ef*. Последующее высушивание вызывает возникновение связности, препятствующей уплотнению осадка до тех пор, пока давление не достигнет некоторого значения  $N_2$ . Дальнейшее повышение нагрузки, а также воздействие воды приводят к разрушению связности и возобновлению сжатия (отрезок кривой *gd*). Подобная картина уплотнения природного и под действием нагрузки от сооружений характерна, например, для лессовидных суглинков.

Различия в условиях уплотнения приводят к тому, что для отложений водного происхождения характерна большая связность и большая водоустойчивость связей между частицами, чем для отложений субаэральных.

Изменение условий существования глинистых пород приводит к изменению их плотности. Возможное изменение последней под влиянием силы тяжести на протяжении всей истории существования породы ограничено рамками кривых граничных условий. Масштаб этого изменения в процессе выветривания, под влиянием его основного агента — маломинерализованной воды, определяется степенью расхождения кривых уплотнения природного и в оптимальных условиях.

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

Поступило  
25 IX 1946

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Н. Я. Денисов, ДАН, 52, 7, 615 (1956); Изв. АН СССР, ОТН, 6, 913 (1946).  
<sup>2</sup> Н. Я. Денисов, ДАН, 53, 4, 347 (1946). <sup>3</sup> Н. Я. Денисов и П. А. Ребиндер, ДАН, 54, № 6 (1946). <sup>4</sup> Н. Н. Серб-Сербина и С. А. Никитина, Колл. журн., 8, 1—2, 63 (1946). <sup>5</sup> H. A. Bell, Proc. Am. Soc. Civ. Eng., 69, 10, 1630 (1943). <sup>6</sup> H. F. Blaney, *ibid.*, 69, 10, 1632 (1943). <sup>7</sup> J. Feld, *ibid.*, 69, 1, 151 (1943). <sup>8</sup> E. Lane and V. A. Koelzer, Density of Sediments Deposited in Reservoirs, University of Iowa, 1943. <sup>9</sup> K. Terzaghi, J. Bost. Soc. Civ. Eng., 28, 3, 211 (1941).