

ДИНАМИКА ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ОБРАЗЦОВ СИЛЬНО СЖИМАЕМЫХ ГРУНТОВ

В соответствии с теорией фильтрационной консолидации [1] уплотняющая нагрузка в момент ее приложения к полностью водонасыщенному грунту передается на поровую воду. При этом возникает поровое давление, способствующее отжатию из пор грунта в зоне уплотнения некоторого количества свободной воды. В результате поровое давление снижается, часть уплотняющей нагрузки передается на скелет грунта и деформирует его. Если скелет относительно жесткий и хорошо проводит воду, то процесс его уплотнения и отжатия воды из пор деформированного грунта завершается с момента приложения нагрузки. В случае податливого скелета грунт сильно деформируется, отжимается большое количество воды. При малой водопроницаемости поровое давление снижается медленно, процесс уплотнения грунта может продолжаться очень долго.

При решении инженерных задач по строительству на слабых основаниях, т. е. при расчетах сроков консолидации, устойчивости оснований в момент загрузки, роль порового давления немаловажна. Тем не менее учесть его влияние в расчетах трудно, поскольку нормативные данные отсутствуют, а исследования в этом направлении весьма трудоемки. Экспериментальное изучение динамики порового давления проводилось прежде всего для водонасыщенных глинистых грунтов, имеющих малую водопроницаемость и относительно малую сжимаемость скелета. Даже под большими нагрузками из образца отжималось очень немного свободной воды. Поэтому приборы, показания которых зависели от количества потребляемой поровой воды, не могли фиксировать достаточно высоких значений порового давления.

В связи с этим сложилось представление, что поровое давление не всегда достигает максимальной величины сразу после приложения нагрузки, а может нарастать постепенно. Кроме того, считается, что на последующих ступенях уплотнения с возрастающей уплотняющей нагрузкой максимальная величина порового давления значительно снижается. Это относят и к исследованию сильно сжимаемых грунтов [2, 3].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального изучения динамики порового давления в образцах сильно сжимаемых грунтов, все поровое пространство которых заполнено свободной водой. Даже под весьма малыми уплотняющими нагрузками эти грунты сильно деформируются, отжимается большое количество воды. Величина и длительность рассеивания возникшего порового давления зависит не только от приращения уплотняющей нагрузки, но и от размеров и водопроницаемости образцов грунта.

Для изучения поровых процессов выбраны три вида грунта, основные характеристики которых приведены в табл. 1. Грунты эти совершенно различны по происхождению и структурному строению, по вели-

Грунт	Абсолютная влажность, %	Плотность, t/m^3	Коэффициент пористости	Коэффициент фильтрации, $m/сек$
Сапрпель тонкодетритовый	880—1090	1,43—1,47	13,1 —15,7	(1,3— 5,2) 10^{-8}
Торф гипновый, $R=25\%$	650—800	1,57—1,71	11,4 —13,9	(5,2—17,2) 10^{-6}
Ил заторфованный	140—160	2,40—2,45	3,38— 3,87	(1,8— 7,2) 10^{-7}

чине сжимаемости и водопроницаемости. Как показали опыты, процессы консолидации в них оказались схожими. Различными были в ряде случаев сроки консолидации, зависящие от совокупности присущих им факторов.

Для изучения процессов нарастания и рассеивания порового давления использовались малые компрессионные приборы. Образцы грунтов естественной структуры набирали в металлические обоймы цилиндрической формы высотой 0,02 м, диаметром 0,0565 м. Уплотняющую нагрузку (рис. 1) прикладывали к штоку верхней решетке при помощи рычажного пресса. Степень уплотнения определяли по величине опускания верхней решетки, фиксируемой мессуром. Верхняя камера прибора имела свободный слив отжатой воды, нижнюю (под нижней неподвижной решеткой) соединяли с прибором для измерения порового давления.

Процедура загрузки образца в опыте занимает считанные секунды. За этот короткий промежуток времени прибор, чтобы зарегистрировать поровое давление, должен потребить необходимое количество воды, забираемой из образца в месте его подключения. Надежность показаний в таких случаях зависит от выбора места подключения. Часто в образец внедряют медицинскую иглу, которая соединяет зону воды грунта вокруг конца иглы с измерительным прибором. В результате частичного обезвоживания этой зоны, когда прибор потребляет воду, поровое давление в ней снижается. Показания прибора не отражают действительного характера изменения порового давления во времени и распределения его по высоте образца. Кроме того, в случае сильно сжимаемых грунтов высота образца под уплотняющей нагрузкой непрерывно уменьшается, положение конца иглы, т. е. зоны измерения порового давления, изменяется.

При подключении прибора к нижней камере надежность измерений порового давления повышается в связи с тем, что его показания соответствуют давлению в нижней части образца независимо от высоты, что для питания прибора забирается вода со всего образца, что имеется полная уверенность в монолитности естественной структуры грунта, которая в данном случае не нарушается даже иглой.

В момент приложения уплотняющей нагрузки свободная поровая вода отжимается в верхнюю камеру прибора. Часть воды попадает в нижнюю камеру, а оттуда — в прибор. Давление воды в приборе и в нижней камере одинаково. В то время, когда вода из образца попадает в ниж-

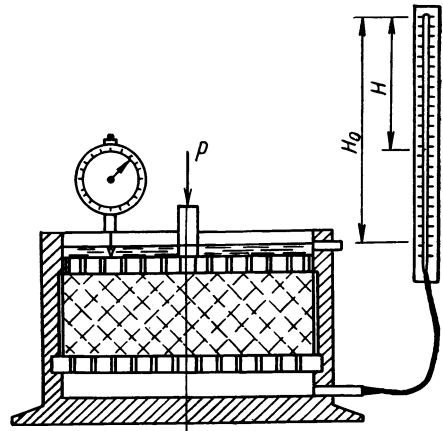


Рис. 1. Схема компрессионного прибора с трубкой-капилляром.

нюю камеру, давление в нем должно быть выше, чем в камере. В период снижения порового давления вода из прибора уходит обратно в нижнюю камеру, а оттуда фильтруется в верхнюю. Указанные явления несколько сглаживают пик порового давления, смещая его по времени. Отметим, что эти смещения в наших опытах несущественны.

Для измерения порового давления в наших опытах был использован гидроаэростатический метод. К размеченной миллиметровой шкале крепили стеклянную трубку-капилляр (рис. 1). Верхний запаянный конец трубки совмещали с началом шкалы. Нижний заполняли водой и при помощи тонкой хлорвиниловой трубки соединяли с нижней камерой прибора.

Перед началом опыта уровни воды в трубке-капилляре и в верхней камере прибора совмещали, для того чтобы начальное давление в трубке было равно атмосферному. Таким образом, атмосферному давлению p_a в трубке-капилляре соответствует высота замкнутого воздушного столбика H_0 . При появлении порового давления в образце вода через нижнюю камеру прибора поступает в трубку-капилляр. Уровень воды в трубке повышается, воздушный столбик сжимается до высоты H . Избыточное давление в трубке соответствует поровому давлению в нижней части образца.

На основании постоянства произведений объема на давление при изотермическом процессе для замкнутой массы газа получаем зависимость для определения порового давления в следующем виде:

$$p = p_a \frac{H_0 - H}{H}. \quad (1)$$

Все опыты выполнялись в лаборатории без заметных изменений температуры. Кроме того, поровое давление в образцах удерживалось в течение лишь нескольких часов. Это давало возможность при расчетах принимать атмосферное давление и температуру на время опыта постоянными. Расчеты показывают, что при изменении температуры в период опыта даже на 10° ошибка не могла бы превысить 3%.

В опытах использовались трубки-капилляры сечением $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, что в 1250 раз меньше площади сечения образцов, и рабочей длиной H_0 до 0,35 м. Чтобы давление в трубке-капилляре оказалось в 2,5 раза выше атмосферного, уровень воды в ней должен подняться на 0,25 м. Необходимое количество воды, которое изменит этот уровень, может отжаться из половины образца при относительной начальной деформации 0,02. Для сапропеля, например, эта деформация достигалась при уплотняющих давлениях, в 10 раз меньших.

При испытании образцов из малосжимаемых грунтов начальную высоту воздушного столбика в трубке-капилляре следует уменьшать. Это достигается заполнением трубки водой на большую высоту. При меньшем значении H_0 для измерения порового давления даже больших величин понадобится очень малый приток отжатой из образца воды. В таких случаях только заметно снижается точность измерений, так как цена деления шкалы возрастает.

Был также опробован электротензометрический способ измерения порового давления. С этой целью в закрытую нижнюю камеру помещали индуктивный датчик, который обладал достаточно высокой чувствительностью к изменениям порового давления и не требовал дополнительного объема воды при деформациях мембраны. Для выполнения замеров порового давления в момент приложения уплотняющей нагрузки приходилось делать настройку электроизмерительной аппара-

туры, которая при непрерывном изменении показаний оказалась весьма удобной. Наиболее подходящей, очевидно, могла быть осциллографическая запись процесса, если не принимать во внимание точность результатов после расшифровки осциллограммы по сравнению с точностью непосредственного замера при помощи трубки-капилляра.

В проведенных экспериментах нагружение образцов производили по двум схемам. По первой каждую уплотняющую нагрузку определенной величины прикладывали к образцу грунта в естественном состоянии. Для этого была заготовлена серия образцов-близнецов. По второй один образец загружали всеми последовательно возрастающими нагрузками. Приращение нагрузки на каждой следующей ступени было не меньше общей нагрузки на предшествующей ступени. В качестве вариантов второй схемы проводили дополнительные уплотнения образцов, предварительно частично разуплотнившихся после снятия с них нагрузки предшествующей ступени. Догрузку образцов производили после 6—8 суток действия уплотняющей нагрузки, хотя поровое давление снижалось до нуля уже в течение нескольких часов. Даже в самых исключительных случаях основная часть его не удерживалась свыше одних суток. Если порового давления после нагружения не оказывалось (т. е. оно рассеивалось, едва появившись в процессе нагружения), образцы догружали через 3—5 суток.

В опытах первой схемы загрузки поровое давление достигало максимального значения еще в процессе приложения уплотняющей нагрузки. После завершения нагружения оно постепенно снижалось. В некоторых образцах торфа при малых нагрузках оно вообще не появлялось. Только при больших уплотняющих нагрузках, когда образец сильно деформировался, водопроницаемость грунта значительно снижалась, приборы отмечали появление порового давления.

Опыты показали, что при непосредственном приложении уплотняющей нагрузки (без предварительного уплотнения) поровое давление возникало в грунтах с малой водопроницаемостью ($k < 1 \cdot 10^{-6}$ м/сек). В грунтах с $k > 1 \cdot 10^{-6}$ м/сек оно появлялось только при большом уплотнении. Следует иметь в виду, что все сказанное относится к образцам определенной высоты. При удлинении путей фильтрации (с ростом высоты образцов) отжатие поровой воды затруднится, сроки консолидации увеличатся. В случае интенсивного нагружения поровое давление в таких образцах может появиться и под малыми уплотняющими нагрузками.

Отжатой из образцов воды в период приложения нагрузки было вполне достаточно, чтобы приборы отметили соответствующее поровое давление. Это показано на рис. 2. Здесь кривая 4 — величина относительной деформации образцов, при которой из них отжимается необходимое количество воды для поднятия уровня в трубке-капилляре, создающего давление, равное уплотняющей нагрузке. Вполне естественно, что в трубку поступает не вся отжатая из образца вода в момент поднятия давления, так что в ряде случаев эту деформацию необходимо почти вдвое увеличить.

Кривые 1—3 (рис. 2) — осредненные действительные значения относительной начальной деформации торфяных (1), илстых (2) и сапропелевых (3) образцов, которые были получены в опытах к моменту завершения нагружения. Приложение нагрузки осуществляли со скоростью относительной деформации примерно 0,1—0,2 1/мин. Большие скорости соответствовали большим уплотняющим нагрузкам, когда необходимо было уловить ощутимый переход от стадии нагружения к начальной стадии консолидации, которая в некоторых случаях протекала с очень высокими скоростями деформации.

Логарифмический масштаб графиков, выбранный с целью компактного размещения кривых, уменьшает различие в положении линий. Тем не менее заметно, что фактическая начальная деформация (линии 1—3) в десятки раз превышает требуемую деформацию (линия 4), которая гарантирует качественную работу трубок-капилляров. Это означает, что за время приложения нагрузки, помимо той части воды, которая проходила через нижнюю камеру прибора и заполняла до необходимой высоты трубку-капилляр, из образца отжималось в верхнюю камеру в десятки раз большее количество воды. В торфяных образцах с высокой водопроницаемостью вся отжимаемая вода уходила в верхнюю камеру при очень малых градиентах, поскольку уровень воды в трубке-капилляре почти не изменялся.

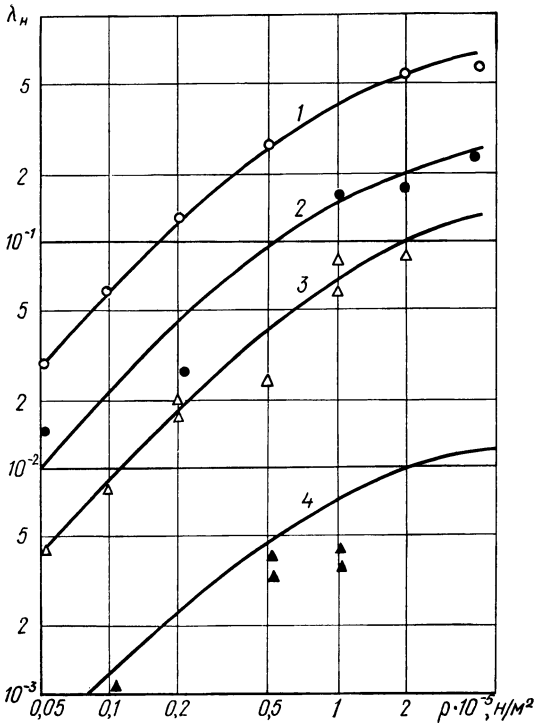


Рис. 2. Начальная деформация образцов торфа (1), ила (2), сфагнела (3) и необходимая деформация (4), обеспечивающая надежную работу прибора порового давления.

та пористости, ниже, чем у сфагнела (линия 3), имеющего почти в 300 раз меньшую водопроницаемость. Коэффициенты пористости образцов ила (линия 2) в 3—4 раза меньше, чем торфа и сфагнела, однако значения начальных деформаций оказались выше, чем у сфагнела, но ниже, чем у торфа. Водопроницаемость его занимает такое же положение среди исследованных грунтов.

При испытании образцов естественного состояния различными по величине нагрузками по первой схеме нагружения установлено, что максимальное поровое давление, возникающее в образце к моменту завершения приложения нагрузки, не достигало величины уплотняющего давления. К тому же оно было не одинаковым в различных грунтах. Как видно из рис. 3, а, наиболее высокими оказались значения порового давления в сфагнеле, имеющем самую низкую водопроницаемость. Причем с увеличением нагрузки доля порового давления несколько повышалась. Это означает, что за время приложения нагрузки возникла большая начальная деформация, отчего грунт сильнее уплотнялся, водопроницаемость его значительно снижалась.

Для удаления отжимаемой при уплотнении воды из образцов ила и торфа понадобились не столь высокие градиенты давления. Значения максимального порового давления (рис. 3, в, г) в большинстве случаев

Следует отметить, что линии начальных деформаций для различных грунтов разместились не в соответствии с их физико-механическими свойствами или особенностями строения, а в зависимости от водопроницаемости (рис. 2). Выше всех оказалась линия 1, осредняющая значения начальных деформаций в образцах из хорошо водопроницаемого торфа, хотя сжимаемая последне-го, характеризующаяся начальным значением коэффициента

порового давления (рис. 3, в, г) в большинстве случаев

не превышали 0,4 от полной уплотняющей нагрузки, хотя грунты совершенно различны по сжимаемости и по водопроницаемости. При одинаковой величине уплотняющей нагрузки торф деформировался сильнее и из торфяных образцов за время ее приложения отжималось большее количество воды, чем из илистых. Водопроницаемость образцов торфа была в 25—30 раз выше, чем ила. При равных скоростях роста нагрузки в период нагружения фильтрация воды в верхнюю камеру через образцы торфа и ила происходила примерно при тех же

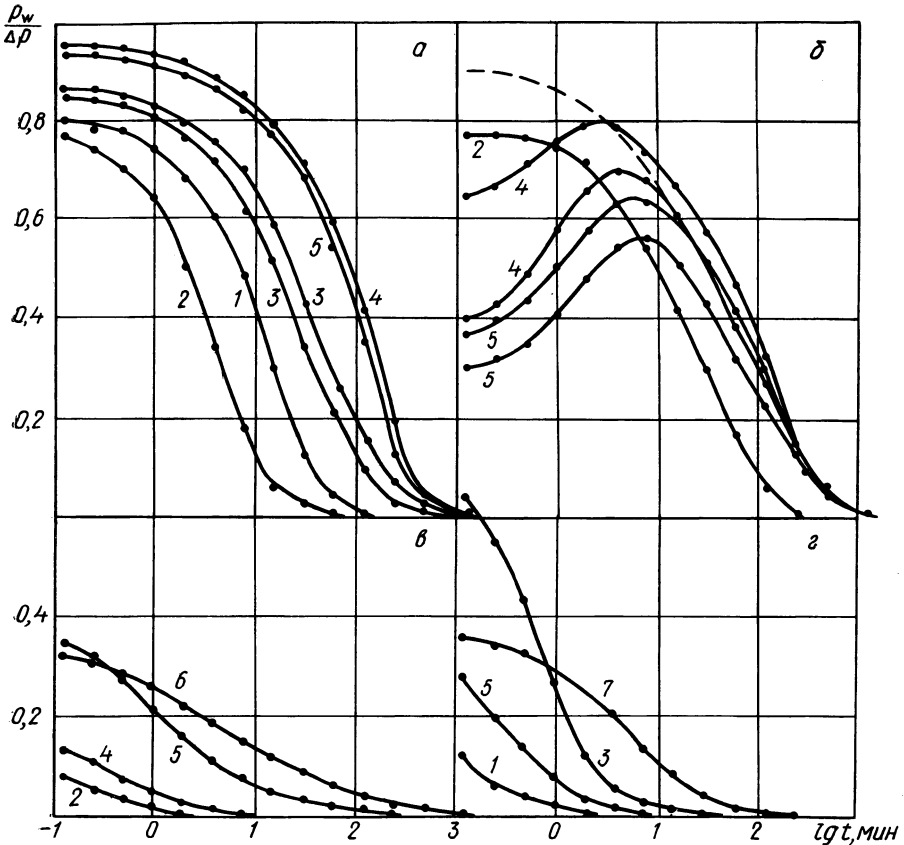


Рис. 3. Доля порового давления от величины догрузки в образцах сапропеля (а, б), торфа (в), ила (г):

1 — $p = 0,05 \cdot 10^5$ н/м²; 2 — 0,10; 3 — 0,21; 4 — 0,50; 5 — 1,01; 6 — 2,01; 7 — 4,01.

градиентах, отчего поровое давление к моменту окончания загрузки было примерно одинаковым.

Перечисленные факты характеризуют деформируемость образцов естественной структуры грунтов под уплотняющими нагрузками, примененными по первой схеме. Во всех случаях к моменту завершения нагружения образцы имели начальную деформацию и поровое давление, которое в большинстве случаев либо еще постепенно (сапропель), либо уже достаточно интенсивно снижалось (торф, ил). По мере снижения порового давления в скелете грунта нарастали эффективные напряжения, под действием которых продолжалась дальнейшая деформация образца. Такая картина взаимного роста эффективных напряжений и уплотнения сапропелевых образцов показана на рис. 4 (линии 3, 4).

Линиями 4 в начале каждого графика отсекаются на осях ординат значения начальных деформаций, а линиями 3 — соответствующие им

эффективные напряжения, которые постепенно увеличиваются и становятся равными приложенным уплотняющим нагрузкам (линия 1). К этому времени линии 4 резко перегибаются, дальнейший рост деформации замедляется. В соответствии с теорией консолидации это означает конец первичной (фильтрационной) и начало вторичной консолидации.

На рис. 4 показаны результаты испытаний одного из образцов сапропеля (линии 2, 5), выполненных по второй схеме загрузки. По-

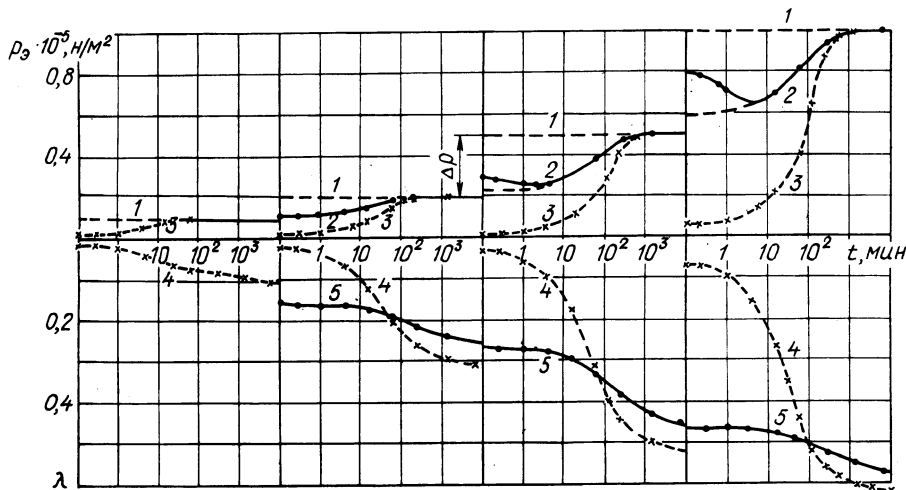


Рис. 4. Характер нарастания эффективного давления (2, 3) до полного (1) и деформации уплотнения (4, 5) сапропеля.

скольку к концу процесса уплотнения на предыдущей ступени наступало равновесие между скелетом грунта и уплотняющим давлением, то приращение нагрузки на последующей ступени вызвало только дополнительное уплотнение. Все процессы, происходящие в грунте, были продиктованы приращением нагрузки. Поровое давление составляло примерно ту же долю от полного давления (рис. 3, б), что и в опытах по первой схеме нагружения. Характер развития эффективных напряжений и относительных деформаций заметно не изменился.

В связи с тем, что при догрузке образцов грунта были уже частично уплотненными, значения начальных деформаций оказывались заметно сниженными по сравнению с деформациями грунтов естественного состояния. На рис. 4 видно, как линии уплотнения 5 продолжают на последующих участках с очень малыми смещениями после догрузок. На рис. 2 значения начальных деформаций таких опытов оказались ниже линии 4. Это означает, что к концу нагружения отжалось из образца недостаточное количество воды, чтобы обеспечить нормальную работу трубки-капилляра длиной 0,35 м. Если в таких опытах длину воздушного столбика в трубке-капилляре не снизить, то к концу нагружения давление в трубке остается меньшим, чем в нижней камере, и уровень жидкости продолжает подниматься еще и после того, как уплотняющее давление приложено. Создается впечатление, что максимум порового давления смещается во времени.

На рис. 3, б дана характеристика порового давления по показаниям трубки-капилляра с завышенной высотой воздушного столбика. Величины показаний отнесены к значениям приращений уплотняющих нагрузок на соответствующих ступенях. Кривые 4 и 5 имеют участки подъема, так как показания трубки-капилляра зависели от степени деформации образца. Участки спада кривых характеризовали действи-

тельные значения порового давления в образцах. Эти участки ничем не отличаются от таких же участков кривых, построенных для образцов естественной структуры после испытаний по первой схеме нагружения.

Кривые на рис. 3, б получены из опытов, в которых величина догрузки на очередной ступени была равна нагрузке на предшествующей ступени. Если величину догрузки принимали меньшей, чем предшествующая нагрузка уплотнения, то кривые порового давления располагались несколько ниже. Если догрузка намного превышала предшествующую нагрузку, значения порового давления в опытах оказывались самыми высокими. Рассеивание порового давления было более замедленным, поскольку образцы грунтов уже частично уплотнились, отчего водопроницаемость их понизилась. Это самые нежелательные случаи уплотнения, когда большие значения порового давления могут создавать опасные гидродинамические явления в грунтах.

Таким образом, выполненные исследования уплотнения трех разновидностей грунтов с замерами порового давления позволили выявить ряд особенностей консолидации. Наиболее высокие значения порового давления возникают в сильно сжимаемых грунтах с малой водопроницаемостью. Уплотнение таких грунтов следует выполнять путем последовательного догружения. Догрузки на последующих ступенях не должны превышать величины нагрузки на предыдущих ступенях. Догрузку производить после завершения фильтрационной консолидации от предшествующей нагрузки. Для понижения времени рассеивания порового давления желательно предусматривать инженерные мероприятия, сокращающие пути фильтрации отжимаемой воды.

Наиболее доступным и надежным способом измерения порового давления следует считать гидроаэростатический с применением трубок-капилляров. Размеры замкнутого воздушного столбика необходимо обязательно увязывать с количеством отжимаемой воды из зоны подключения трубки-капилляра за период приложения нагрузки. При недостаточном количестве отжимаемой воды прибор показывает заниженные значения порового давления до момента снижения, определяемого появлением максимума на графике.

Значения порового давления в грунтах при уплотнении составляют определенную долю не от полного уплотняющего давления, а от величины догрузки, т. е. приращения нагрузки на каждой ступени уплотнения. В слабо водопроницаемых сапропелях максимум порового давления возникал к концу загрузки и составлял 0,85—0,95 от величины приращения уплотняющего давления. В торфяных и илистых грунтах, имеющих более высокую водопроницаемость, максимум не превышал 0,4 от давления уплотнения.

Литература

1. *Флорин В. А.* Основы механики грунтов. Т. 2. М. — Л., 1961.
2. *Амарян Л. С.* Методы расчета прочности и сжимаемости торфяных грунтов. — В сб.: Строительство на торфяных грунтах. Ч. 1. Калинин, 1972.
3. *Соколов В. Д.* Изучение процесса изменения порового давления при уплотнении водонасыщенного торфа в компрессионном приборе. — В сб.: Строительство на торфяных грунтах. Ч. 1. Калинин, 1972.