

ВЛИЯНИЕ КАПИЛЛЯРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Л. А. Смоляницкий

Воронежский государственный университет

Капиллярные явления в грунтах изучались разными авторами. Кратко изложены результаты этих исследований. Не были ранее разработаны специальные приборы для прямого простого измерения капиллярного давления и методов его учета при расчетах земляных сооружений и оснований.

Автором разработан прибор для комплексного ускоренного определения свойств грунтов, в том числе капиллярного давления. Выполнены испытания большого количества различных глинистых грунтов. Установлено, что влияние капиллярного давления на сжимаемость грунта соизмеримо с действием внешнего и бытового давлений. Предложена методика учета капиллярного давления в расчетах осадок земляных сооружений. Дается методика пересчета прочностных характеристик при замачивании грунта.

ИЗ ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ГРУНТАХ

Известно, что капиллярные силы возникают в тонких трубках (капиллярах), например, в порах грунта в результате смачивания жидкостью (водой) грунта вокруг пор.

Капиллярная вода в почвах является источником жизни континентальных растений, которые в свою очередь служат пищей наземных животных и в том числе человека. Поэтому мы — люди обязаны своим существованием в значительной степени капиллярным явлениям в природе.

Очень кратко рассмотрим описание этого явления в трудах разных авторов.

Наиболее ранние исследования в этой области известны из трудов К. Терцаги, например, [11].

К. Терцаги пишет (это относится к 1942 г.), что физическая природа действия капиллярной силы является еще спорной, но механические ее действия могут быть рассчитаны из допущения, что сила действует по поверхностям контакта воды, воздуха и плотной массы. Он рассматривает равновесие столбика воды, поднятой в капиллярной трубке диаметром $2r$ на высоту h_c силой поверхностного натяжения пленки воды. Эта сила равна весу поднятого столба воды, и она может существовать только при условии, что механические свойства верхнего слоя водяного столба отличаются от механических свойств обыкновенной воды. Сила, препят-

ствующая опусканию элемента, должна находиться в этой пленке, так как другого места ей нет.

К. Терцаги отмечает, что экспериментальными исследованиями, проведенными более 100 лет назад, установлено двухмерное натяжение пленки, параллельного ее верхней поверхности некоторой силой, вызывающей поверхностное растягивающее натяжение пленки. Вертикальная составляющая этих напряжений — P . Толщина поверхностной пленки, являющейся местом поверхностного натяжения, составляет 10^{-7} см. Существование поверхностного натяжения, как напряжения, действующего внутри поверхностной пленки, принималось в течение последнего столетия без сомнений, и его величина была измерена разными способами с одинаковым результатом.

Математическое выражение не основано на каких-либо допущениях, так как оно справедливо независимо от физических причин поверхностного натяжения. Отмечается, что еще не наблюдалось каких-либо явлений капиллярности, которые противоречили бы математическому выражению поверхностного натяжения. Напряжения σ_0 по поверхности соприкосновения поверхностной пленки воды с воздухом при разных температурах по Смитсону (1934 г.) даны в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость поверхностного натяжения
от температуры

T, °C	0	10	20	30	40
σ_0 , г/см	0,0756	0,0742	0,0727	0,0711	0,0695

Верхняя поверхность воды в пределах трубки имеет форму мениска. Поверхность воды при-мыкает к вертикальной стенке под углом смачивания α . Угол α зависит от химического состава стенок трубки. Если стенки стеклянные, и они перед опытом очищаются, угол равен 0, если покрыты пленкой жира, угол равен 90° и даже больше. Обычно от 0 до 80° . Равновесие столба воды требует, чтобы:

$$\gamma_w \pi r^2 h_c = \sigma_p \pi r \cos \alpha,$$

$\sigma_o = 0,075$ г/см, если r в см, то $h_c \cos \alpha 0,15/r$.

На уровне свободного зеркала воды давление равно 0. Вес воды в трубке над зеркалом $\gamma_w z$, а сжимающее давление по верхней поверхности $= -p_{uz}$. Так как в при условии равновесия сумма сил равна 0, то: $P_{uz} + \gamma_w z = 0$, или $P_{uz} = -\gamma_w z$

Если в пространстве над водяным столбом воздух, находящийся под давлением P_u , то давление в воде повышается на P_u , но высота капиллярного подъема воды не изменится. В воде не имеют места растягивающие напряжения, пока высота капиллярного подъема h_c не превышает $h = P_u/\gamma_w$ или приблизительно 10 метров. Если опустить нижний конец свободной от воздуха капиллярной трубки в воду, находящуюся под давлением воздуха $P_{a,2}$, то вода в трубке поднимется на высоту $h + h_c = P_u/\gamma_w + \cos \alpha 0,15/r$. При извлечении трубки из воды на ее нижнем конце останется капля воды, удерживаемая капиллярными силами. Вес водяного столба, заключенного в трубке, удерживается поверхностным натяжением на верхней границе столба. Поверхностную пленку на капле можно сравнить с тонкой резиновой оболочкой, действующей как резервуар, а вес капли передается на нижний конец трубки.

Объем газа в поре грунта, полностью окруженный водой, называется пузырьком. В грунтах пузырьки прилипают к поверхности частиц грунта, но поверхность соприкосновения незначительна в сравнении с поверхностью пузырька. Если некоторое количество газа заполняет пространство, внешние границы которого состоят из независимых между собой менисков, то объем заполненный газом представляет собой *пору*. Поры имеют любую форму, а пузырьки газа шаровидные. Газ мог попасть из воздуха или выделиться из воды при изменении температуры или в результате химических реакций. Давление газа в пузырьке зависит от температуры, давления воды, от расположения частиц грунта, окружающих пору. Пусть вес газа независим от

напряженного состояния воды, и вначале пузырек может сообщаться, как и грунт, со свободным зеркалом воды.

Сначала диаметр пузырька равен $2r_o$. Если пузырек находится выше зеркала воды, то фактическое давление воды равно алгебраической сумме p_{w0} и давления воздуха p_a . Или

$$p_{w0} = p_{w0} + p_a \quad (1)$$

Давление газа может быть положительным и отрицательным.

Если r_o приближается к 0, давление газа p_{g0} стремится к бесконечности. Согласно закону Бойля, произведение объема на давление для каждого газа при постоянной температуре является const. Объем занятый газом до и после изменения давления соответственно равен: $4/3\pi r_o^3$ и $4/3\pi r^3$, поэтому, если известно r_o , то r может быть найдено из уравнения:

$$1,25\pi r_o^3 (p_{w0} + 2\sigma_o/r_o) = 1,25\pi r^3 (p + 2\sigma_o/r),$$

откуда:

$$p_u = r_o^3/r^3 (p_{w0} + 2\sigma_o/r_o) - 2\sigma_o/r.$$

Пузырек расширится соответственно уменьшению давления воды p_u :

Приращение радиуса пузырька бесконечно и он займет всю пору, в этом состоянии фактическое давление воды $p_{u1} = 1,25\sigma_o/r_1$, соответствующее гидростатическое давление будет:

$$p_{w1} = p_{u1} - p_a = -(1,25\sigma_o/r_1 + p_a)$$

и давление газа

$$p_{g1} = p_{a1} + 2\sigma_o/r_1 = 0,75\sigma_o/r_1.$$

Полость сверху и снизу ограничена менисками. После того, как газ заполнил полость, его давление зависит от объема полости

В начале опыта пузырек находился на уровне воды, где p_{w0} в (1) равно 0, а давление воздуха $p_a = 100$ кПа. При $r_o = 5 \cdot 10^{-5}$ (размер глинистой частицы) получаем размер $r_1 = 10 \cdot 10^{-5}$, $p_{u1} = -100$ кПа и $p_{w1} = -200$ кПа.

Если возникают растягивающие напряжения воды, то самые крупные пузырьки расширяются в полости, а если растягивающие напряжения возрастают, то расширяются и маленькие пузырьки. Растягивающие напряжения, необходимые для реализации этого процесса, зависят от начального напряженного состояния воды и величины самых крупных пузырьков газа. Когда пузырек расширится, зависимость между давлением газа и поверхностным натяжением теряет силу.

Как указывает Н. В. Орнатский [4], основной характеристикой равновесного состояния поро-

вой воды в грунте является поровое давление. Для любой точки ниже свободной поверхности H гидростатическое давление на единицу площади выразится:

$$u_r = \rho_b h = \rho_b (H - z_r),$$

т. к.

$$\rho_b = 1, u_r = H - z_r,$$

где u_r — гидростатическое давление в любой точке объема гравитационной воды, H — напор, т.е. ордината свободной поверхности жидкости, h — высота столба жидкости, выражающая гидростатическое давление, z_r — ордината в любой точке в объеме гравитационной воды.

Так как $z_r < H$, то $u_r > 0$, т.е. гидростатическое давление всегда положительно, его действие на частицы грунта подчиняется закону Архимеда.

Для капиллярной воды гидростатическое давление на единицу площади выражается аналогично:

$$u_k = H - z_k,$$

где: u_k — гидростатическое давление в любой точке столба капиллярной воды, z_k — ордината в любой точке столба капиллярной воды.

Так как $z_k < H$, то $u_k < 0$, т.е. давление капиллярной воды всегда отрицательно. Поэтому капиллярная вода, находясь под действием отрицательного гидравлического давления, даже при наличии прямой связи с открытым водоемом не может к нему продвигаться. Поэтому капиллярно увлажненный грунт представляет собой закрытую систему. Движущие силы вогнутых менисков относятся к категории явлений, связанных с молекулярным взаимодействием поровой воды и грунтового скелета.

Принимается допущение о том, что давление на плоской поверхности жидкости равно нулю, в действительности автором предполагается, что здесь действует атмосферное давление и давление плоской поверхностной пленки воды. Поэтому в действительности речь идет об алгебраической разности между давлениями капиллярным и на плоской поверхностной пленке.

К категории молекулярных междучастичных связей относятся и связи, возникающие в результате объединения адсорбционных пленок связанной воды, облегающих поверхности минеральных частиц при их близком расположении.

В грунте имеются связи:

а) капиллярные, определяемые взаимодействием свободной воды с поверхностями грунтовых зерен, образующих капиллярные ходы;

б) адсорбционные, определяемые взаимодействием между собой соседних минеральных зерен через пленочные контакты.

Сила капиллярного давления на стенках капилляра раскладывается на продольную и поперечную составляющие. В грунтовой массе, состоящей из системы прилегающих друг к другу капилляров, заполненных водой, поперечные составляющие капиллярного давления двух соседних капилляров приложены к одной и той же стенке в виде двух взаимно уравновешивающих сил, которые поэтому не могут оказать на скелет сжимающего давления. Продольные составляющие образуют общую систему сжимающих сил по сплошной поверхности, образуя поверхность менисков. Поверхность менисков параллельна поверхности уровня подземных вод. При точечном источнике подземных вод поверхность менисков может быть шаровой. По подошве фундаментов, заложенных ниже уровня поверхности менисков, она следует контуру подошвы.

Неверно, что препятствием капиллярному движению воды является только ее собственный вес и что при очень тонких капиллярах возможен подъем воды на сотни метров.

Капиллярное давление, это сила, распределенная по поверхности менисков, прижимает друг к другу минеральные частицы, лежащие по одну сторону от этой поверхности, создает механическую связь между ними, и грунт в условиях капиллярного увлажнения приобретает один из видов молекулярной связанности.

Капиллярное давление по отношению к грунтовому скелету является внешней силой, производящей его сжатие. Его следует выражать в виде напряжения σ_k , равномерно распределенной по всей поверхности менисков также как учитывается сжатие массива равномерно распределенной внешней силой. Так как капиллярное давление фактически приложено только к скелету, следует:

$$\sigma_k = (\sigma_k)_c / 1 + e,$$

или

$$(\sigma_k)_c = \sigma_k (1 + e),$$

где e — коэффициент пористости грунта.

Капиллярные силы не подчиняются действию экспериментатора, они подчиняются физическим факторам, например, состоянию поровой воды.

В лабораторных образцах они равномерно сжимают образец. При этом все три главных напряжения равны между собой:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_k.$$

При сжатии грунта капиллярным давлением происходит одновременно уменьшение порового пространства и передвижение поровой воды к поверхности менисков. Причиной движения является положительная разность между условным нулем гидростатического давления на свободном уровне воды и отрицательным гидростатическим давлением капиллярной воды на поверхности сжимаемого слоя.

При высушивании грунтовой массы свободный уровень воды постепенно отступает во внутреннюю часть грунтового массива, а в наружных его частях создается отрицательное капиллярное гидростатическое давление.

Для определения капиллярного давления в лабораторных условиях сначала определяется начальный коэффициент пористости, потом образец сжимается с построением кривой сжимаемости, на которой находится коэффициент пористости, равный начальному и соответствующее ему давление, которое и будет капиллярным давлением. Однако это приближенное значение, поэтому, следует исключить влияние жестких стенок кольца.

При высушивании грунта (в состоянии грунтовой массы) еще остается полное водонасыщение грунта в порах, так как потеря воды на испарение уравновешивается сжатием поры. Изменение физического состояния воды заключается лишь в переходе ее части из гравитационного состояния в капиллярное. Связность грунтовой массы легко уничтожится при ликвидации капиллярного давления, что достигается или полным высушиванием или увлажнением. В глинистых грунтах при высушивании остается прочно связанная вода.

Увеличение капиллярного давления при высушивании не может продолжаться безгранично. Наибольшая возможная кривизна вогнутого мениска зависит от диаметра капилляра D и постоянного угла β наклона сил молекулярного притяжения воды к стенкам трубки:

$$R_{\min} = D/2 \cos \beta.$$

По Герсванову [3] в капле над мениском кривизна меняет знак, тогда:

$$u = 2\alpha/R_{\max}$$

или

$$R_{\max} = 2\alpha/u.$$

Это отношение определяет возможность задержки начала фильтрационной консолида-

ции до достижения градиентом величины достаточной для прорыва пленки.

Наибольшей кривизне мениска соответствует наиболее возможное капиллярное давление. Этому состоянию соответствует *предел усадки*.

При дальнейшем высушивании грунт не сжимается. Его следует изучать как газонасыщенный грунт. При снижении давления из воды выделяется растворенный газ, увеличивающий степень газонасыщенности пространства. При переходе через предел усадки грунт светлеет.

При высушивании грунтовой массы испарение грунта идет неравномерно, более интенсивно вода испаряется в крупных порах, где она свободная, так здесь вода менее подвержена адсорбционному взаимодействию с поверхностью грунтовых зерен. В процессе сжатия грунта в этих порах остается защемленный газ. Образуется *гидроаэростатическая* смесь. Здесь газ является новым фактором, существенно влияющим на свойства грунта.

При высушивании грунт проходит ряд промежуточных состояний. Сначала образуются отдельные замкнутые пузырьки газа, но поверхность менисков еще имеет вид сплошной пленки, далее образуются отдельные крупные пустоты, капиллярные мениски проникают в глубинные пустоты и капиллярное давление действует уже и во внутренних частях объема, вызывая сжатие грунта внутри. Далее от воды освобождается основная часть порового пространства, а вода концентрируется на контактах частиц, это *четочная* капиллярная вода. По мере уменьшения влажности капиллярное давление увеличивается с увеличением кривизны менисков. Постепенно мениски отступают все ближе к пленочным контактам до тех пор, пока они не попадут в зону молекулярного притяжения. Теперь процесс испарения резко замедляется и сжатие грунта прекращается. Дальнейшее сжатие частиц грунта осуществляется силами адсорбционного притяжения, создающими также отрицательное гидростатическое давление.

Внешняя нагрузка прежде всего передается на поровую воду, вызывая повышенное гидростатическое давление. Если поры полностью заполнены капиллярной водой, то до перемены знака давления деформирование грунта невозможно. Должна быть достигнута *минимальная нагрузка деформирования*. Если в грунте есть защемленный газ, деформирование до достижения минимальной нагрузки деформирования

происходит за счет сжатия газа. Но вода из пустот не будет выделяться до тех пор, пока не будет достигнута минимальная нагрузка деформирования. Соотношение газа и воды, образующих в порах гидроаэростатическая смесь представляется из следующих данных.

Представим, что пузырьки имеют шарообразную форму и поверхность менисков тоже шарообразна.

Тогда:

$$u_r - u = 2\alpha/r, \quad (1)$$

или

$$u_r = u + 2\alpha/r, \quad (2)$$

где: u_r — давление защемленного газа, u — гидростатическое давление воды (поровое давление).

Радиус кривизны r является переменным, так как возможны пузырьки разного диаметра. Для трехфазного грунта в единичном объеме представим:

$$A + B + D = 1, \quad (3)$$

где A — объем частиц грунтового скелета, B — объем воды, D — объем защемленного газа.

Коэффициент пористости

$$e = (B - D)/A. \quad (4)$$

Следует иметь в виду, что в процессе уплотнения может изменяться объем растворенного в воде газа в соответствии с коэффициентом растворимости газа ψ (по закону Генри) в зависимости от соотношения объема газа и воды при определенных значениях давления и температуры. В общем случае объем газа

$$V_r u_r = D + \psi B. \quad (5)$$

При увеличении давления в газе до u_r объем газа уменьшится на величину ΔD равную величине уплотнения грунта, так как уплотнение воды и минеральной частицы грунта ничтожно.

Так как температура газа не изменилась по закону Бойля—Мариотта:

$$V_2 u_2 = V_r u_r' \quad (6),$$

где $V_r u_r'$ — новые объем и давление газа в поре. Из (3)—(6) следует:

$$[D + \psi(A_e - D)]u_r = [D - \Delta D + \psi(A_e - D)]u_r'. \quad (7)$$

Если газ первоначально был полностью растворен, имела место грунтовая масса, и объем защемленного газа был бы равен нулю ($D = 0$).

В этом случае

$$\psi A_e u_r = (\psi A_e - \Delta D)u_r', \quad (8)$$

откуда $= \psi A_e (1 - u_r/u_r')$, отнеся ΔD к единице объема грунтового скелета, имеем

$$\Delta D/A = A_e (1 - u_r/u_r') \quad (8)$$

Выделение газа из грунта возможно при его разгрузке, при загрузке, защемленный газ растворяется. С изменением состояния защемленного газа происходит деформирование пленочных контактов между минеральными частицами. В средней части пленочного контакта отрицательное давление меняется на положительное. Вода перемещается в стороны от контакта, перетекает в воду, заполняющую пустоты скелета. Это не касается адсорбционных пленок. Происходит закупоривание промежутка между адсорбционными пленками, что затрудняет или прекращает выдавливание воды из пор.

Приложенная внешняя нагрузка сближает минеральные частицы, уменьшая коэффициент пористости. Арифметическое суммирование этих воздействий невозможно, так как они независимы друг от друга. Если поровая вода имеет отрицательное гидростатическое давление, то она нагружает скелет капиллярным давлением. Если внешняя нагрузка меньше порового давления, то она уменьшит абсолютную величину отрицательного гидростатического давления, но не вызовет перемещения и удаления воды. Если внешняя нагрузка равна поровому давлению, то переводит поровую воду в гравитационное состояние, не вызывая ее перемещения. Изменение пористости в меньшую сторону не может произойти, пока не возникнет причина, заставляющая лишнюю воду вытекать наружу из поры. Если внешняя нагрузка меньше капиллярного давления, то она полностью воспринимается поровой водой и вызывает повышение порового давления ($u = -\sigma'_k$) до величины $u' = \sigma'_k + q$, где u' — поровое давление после приложения внешней нагрузки.

При этом напряжение грунтового скелета уравнивает оставшуюся часть внешней нагрузки, т. е. окажется равным:

$$\sigma = q - u' = q - (-\sigma'_k + q) = \sigma'_k. \quad (9)$$

При дальнейшем увеличении внешней нагрузки часть воды удалится и пойдет нормальная компрессия.

Газообразная составляющая в порах грунта чувствительна к изменению давления и температуры. При изменении температуры изменяется давление газа:

$$u' = (1 + T_1 - T_2/273), \quad (10)$$

Новое давление газа передастся на поровую воду, в которой также возникнет новое поровое давление. Последствие температурных изменений для грунта в целом такие. При повышении температуры в связи с расширением газа произойдет уменьшение коэффициента пористости, то есть разуплотнение грунта и наоборот. Процесс обратимый, если газ не будет удаляться в атмосферу через открытые поры.

При сжатии трехфазной системы (гидроаэроэрозийная смесь), если газ не удаляется и не растворяется в поровой воде, то его присутствие не оказывает влияния. Передаваемое давление на частицы грунта создают его связность. Молекулярные связи находятся в зависимости от внешнего давления, которое создает внутреннее трение. Часть его, зависящая от внешнего давления, составляет $\sigma_n \operatorname{tg} \varphi$, а часть, зависящая от молекулярных сил (капиллярного давления и адсорбционного притяжения) составит $\sigma_m \operatorname{tg} \varphi$. (здесь φ — угол внутреннего трения грунта).

Созданное вторыми силами нормальное напряжение существует и без внешнего давления и является начальным напряжением $(\sigma_m)_0$.

Полное сопротивление сдвигу состоит из трения созданного внешним давлением $t_1 = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$ и внутренним сопротивлением $t_2 = \sigma_m \operatorname{tg} \varphi$

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c = (\sigma_n + \sigma_m) \operatorname{tg} \varphi.$$

Это условие предельного равновесия для связных грунтов.

В работе Н. А. Цытовича [12], говорится о том, что существовавшее ранее мнение, будто высота капиллярного поднятия обуславливается подъемной силой менисков воды, неверно. Происходит оно за счет энергии гидратации ионов на пограничной поверхности твердой и жидкой фаз, при этом образование вогнутых менисков воды в промежутках между твердыми частицами грунта является вторичным явлением, как результат действия капиллярных сил. При неполном насыщении грунта водой мениски образуются внутри грунта, при полном — на поверхности уровня капиллярной воды. Капиллярная вода — это вода частично или полностью заполняющая поры грунта и имеющая поверхность, ограниченную вогнутыми менисками. Уровень ее в мелкодисперсных грунтах значительно выше уровня текущих вод.

Капиллярные силы зависят от кривизны мениска. Сила капиллярного натяжения, отнесенная к единице круглого поперечного сечения капиллярной трубки по Лапласу:

$$q = 2\alpha/r, \quad (1)$$

где r — радиус кривизны (радиус трубки), α — поверхностное натяжение воды, равное $7,5 \cdot 10^{-4}$ н/см. Например, при диаметре поры 0,01 см капиллярное натяжение q составит 3 кПа, при диаметре 0,005 мм — 60 кПа, а при диаметре 0,0002 мм — 150 кПа. В грунтах поры представляют собой сеть каналов неправильной формы разного направления, и зависимость капиллярного натяжения от свойств воды и грунта более сложная. Автор ссылается на работу А. В. Думанского, которым было установлено, что при размерах пор 10^{-7} см и меньше образование менисков воды невозможно, что является пределом применимости теории капиллярного давления в грунтах.

Н. А. Цытовичем [12] предлагается определение капиллярного давления по М. Н. Герсеванову для грунтовой массы как давление, обуславливающее связность дисперсных грунтов. Так уплотнение грунта происходит и при его высушивании, когда объем грунта уменьшается под действием всестороннего капиллярного давления p_k . Пусть слой грунта загружен равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью p , кПа, а поверхность грунта совпадает с поверхностью менисков. Вес столба воды от уровня менисков до поверхности грунтовых вод h , см создает сплошную добавочную равномерно распределенную нагрузку. В точке a выше уровня воды давление воды равно:

$$p_w = \rho_w (H - z_a),$$

где: H — напор (отметка поверхности уровня воды), z_a — отметка рассматриваемой точки, ρ_w — плотность воды (1 т/м^3).

Так как z_a больше H , то давление отрицательно — капиллярная вода будет испытывать растягивающие напряжения. Если высота капиллярного поднятия воды h , а высота капиллярной воды над точкой ah_a , получим:

$$p_w = -\rho_w (h - h_a).$$

Максимальное давление на скелет грунта будет равно и противоположно по знаку максимальным растягивающим напряжениям в воде у поверхности менисков при $h_a = 0$, то есть

$$p_{\max} = p_k$$

или

$$p_k = -\rho_w h.$$

Ниже уровня воды давление складывается из внешней нагрузки, веса грунтового скелета и веса воды:

$$p_a + p_w = \sigma_a + \rho_s \frac{h_a}{1+e} + \rho_w \frac{e}{1+e} h_a, \quad (3)$$

или, после подстановки и преобразований:

$$p_a = \sigma_a \frac{p_s - p_w}{1+e} r_w h. \quad (4)$$

Эквивалент капиллярного давления можно определить по компрессионной кривой (главной ветви). Сумма главных напряжений от действия капиллярных сил

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = 3p_k,$$

где p_k — эквивалент капиллярного давления. Если p_s уплотняющее давление в природе, а ξ — боковое давление грунта, то:

$$p_k = 1 + 2\xi p_s / 3 = 0,8 p_s \quad (5)$$

Величина p_s находится на главной ветви компрессионной кривой как давление, соответствующее коэффициенту пористости образца грунта естественной ненарушенной структуры. Или капиллярное давление находится в арретированном образце как давление, при котором образец начинает уплотняться после предварительного его увлажнения подачей воды снизу.

В работе Н. М. Герсевича и Д. Е. Польшиной [3] дается общее описание подъема воды в капиллярной трубке со ссылкой на первоисточник «Курс физики» проф. Хвольсона, т. 1.

Ими предлагается избегать понятия «растяжение воды», а для этого принять вместо нуля или атмосферного давления давление плоской поверхности воды ($r = \infty$) $K = 10\,700$ атм. Искривленная поверхность воздействует на воду меньшим давлением, равным $K - Q$, то есть отличается подъемной силой мениска. Теперь капиллярное давление будет положительным, но введение такого положения создает неудобства при использовании больших чисел. Поэтому вода определяется как вещество, способное воспринимать сжимающие и растягивающие напряжения, но неспособное в состоянии покоя сопротивляться касательным напряжениям.

Скелет грунта несет на себе в плоскости менисков нагрузку, совершенно так, как будто бы он был нагружен в этой плоскости внешней нагрузкой. Эта нагрузка полностью передается

на грунтовый скелет и называется капиллярным давлением. Капиллярная вода, заключенная в грунтовой массе между поверхностью менисков и уровнем подземных вод, не отличается от остальной грунтовой воды, находящейся ниже уровня подземных вод, и подчиняется всем гидростатическим законам. Существующие в ней давления принадлежат к нейтральным давлениям, с той лишь разницей, что эти давления отрицательны. Следовательно, каждая частица грунта претерпевает взвешивание. На нижнюю подошву фундамента, опущенного в грунт ниже поверхности менисков, капиллярная вода оказывает полное гидростатическое давление, но только отрицательное. Здесь к весу сооружения надо прибавить вес столба воды между подошвой фундамента и уровнем подземных вод. Таким образом, при изменении уровня подземных вод нагрузка на подошву фундамента будет меняться. Понижение уровня подземных вод увеличивает эту нагрузку, а повышение уменьшает ее.

При рассмотрении консолидации грунта утверждается положение о том, что «каждому эффективному напряжению в грунтовом скелете соответствует определенная величина влажности грунтовой массы. Это соответствие выполняется как в статическом состоянии, так и в любой момент состояния грунтовой массы».

В процессе высыхания грунта сначала уменьшается радиус кривизны, вызывая сжатие грунта на его поверхности (в уровне поверхностей мениска). Максимальное давление будет иметь место, когда кривизна мениска станет равной радиусу поры. Потом мениски начнут погружаться в грунт, постепенно сжимая его по всему объему, до тех пор, пока не разрушится пленка из-за нехватки воды. Грунт получил дополнительное уплотнение за счет капиллярного давления, которое имеет объемный характер.

Приводятся значения величин капиллярного давления из работ К. Терцаги, которые он получил путем уплотнения грунта под водой до природной влажности (табл. 2). (Считается, что это уплотняющее давление соответствует капиллярному давлению).

Таблица 2

Некоторые измеренные значения капиллярного давления по К. Терцаги

№пп	Состояние глины	Влажность, %	Коэффициент пористости	Капиллярное давление, кПа
1	Пластичное	26,9	0,792	272
2	Пластичное	26,0	0,741	408

Капиллярное давление, соответствующее переходу грунта из полутвердой консистенции в твердую, называется переходным давлением.

Внешнее давление, первоначально передается на воду, уменьшая капиллярное давление и, пока оно не будет преодолено, вода из грунта отжиматься не будет.

Авторами [3, 4] для определения капиллярного давления перед компрессионным испытанием предлагается арретировать образец грунта, чтобы подаваемая снизу вода не впиталась в него за счет капиллярного давления. Увеличивая давление, находится такое, при котором началось уплотнение образца грунта. Это давление и будет соответствовать капиллярному давлению. Наличие жестких стенок в кольце уменьшает сжимающее давление, поэтому предпочтительнее выполнять испытание на стабилометре.

М. Н. Гольдштейном [2] капиллярное давление в грунтах исследуется с позиций термодинамики. Сначала дается общее известное описание природы явления.

Сферическая капля жидкости с поверхностью $S = 4\pi r^2$ и объемом $V = 4/3\pi r^3$ испытывает уменьшение объема на ΔV под давлением p_k , тогда работа dA этого давления при обратимом изотермическом уменьшении объема капли будет равна:

$$dA = p_k S dr = p_k \Delta V = d(4/3\pi r^3) = p_k 4\pi r^2 dr \text{ г/см.} \quad (1)$$

При обратимом изотермическом уменьшении поверхности капли на dS ее поверхностная энергия уменьшится на величину:

$$dF = \sigma_{12} dS = \sigma_{23} d(4\pi r^2) = \sigma_{12} 8\pi r dr \text{ г/см,} \quad (2)$$

где σ_{12} — удельная поверхностная энергия жидкости в данной среде.

При адиабатическом процессе, который совершается без теплообмена с окружающей средой, температура жидкости изменяется и работа затрачивается не только на изменение свободной поверхностной энергии, но и внут-

ренней энергии системы.

Приравнивая согласно закону сохранения энергии (1) и (2), автор находит в состоянии равновесия сжимающее давление в капле:

$$p_k = 2\sigma_{12}/r = 2a/r, \quad (3)$$

где a — поверхностное натяжение воды на границе с воздухом. Капиллярная вода, как и гравитационная вода, является свободной водой. Максимальная высота капиллярного поднятия воды, учитывая, что:

$$-p_k + \gamma_w h_k = 0$$

и

$$p_k = 2a/r, \text{ г/см}^2,$$

будет $h_k = 0,15/r$, см.

Над вогнутой поверхностью молекул пара меньше, чем над плоской, поэтому между водой и газом затруднен обмен. Давление пара тем меньше, чем больше капиллярное давление. Когда в воде образуется пузырек, то поверхностная пленка его сжимает, тем сильнее, чем меньше радиус, поэтому мелкие пузырьки перетекают в крупные.

В. Д. Ломтадзе [5] обращает внимание на то, что капиллярное давление воздействует на стенки капилляров, на частицы породы, прижимая их друг к другу. Подъемные силы являются растягивающими по отношению к воде, а капиллярное давление является сжимающим по отношению к частицам грунта.

Он приводит высоту капиллярного поднятия воды в глинистых породах (табл. 3) из работы Ф. П. Саваренского [8]

В. Г. Булычев [1] считает, что капиллярное давление в набухающих грунтах при набухании играет второстепенную роль. Основное значение имеют процессы молекулярного взаимодействия между минеральным скелетом и влагой, вызывающее образование водно-коллоидных оболочек минеральных частиц и изменение

Таблица 3

Высота капиллярного поднятия воды в глинистых породах

Породы	Достигнутая высота, см	Число дней	Скорость, см/сут	
			В первые сутки	В последующие сутки
Суглинок	160,6	85	73,0	0,2
Глина	90,7	25	27,0	2,5
—“—	99,5	25	64,0	0,5
—“—	153,6	114	59,3	0,2
—“—	125,0	207	74,3	0,05
Суглинок легкий	196,0	207	73,0	0,1

их объема, а также проникновение молекул воды в промежутки между кристаллическими пачками у глинистых минералов с подвижной кристаллической решеткой.

Анализируя известные теории капиллярных сил, он разделяет их на две группы: первая — теория сил сцепления (Г. И. Покровский), вторая — теория капиллярного давления (К. Терцаги и Н. М. Герсеванов). Первая кладет в основу связности грунтов взаимодействие между минеральным скелетом и водой, вторая — капиллярное давление.

Обе теории исходят из принципа отрицательного гидростатического давления, но они существенно различаются между собой. Г. И. Покровский рассматривает трехфазный грунт, то К. Терцаги и М. Н. Герсеванов исследуют двухфазный грунт (грунтовую массу). Первая теория учитывает зависимость сил сцепления от радиуса частиц, от характера контактов между ними и количества воды в грунте, вторая — оценивает сцепление по величине капиллярного давления, которое в свою очередь определяется только радиусом частиц.

В. Г. Булычев считает, что обе теории дополняют друг друга. Но они дают разные выводы: по теории капиллярного давления напряжения в скелете, вызываемое отрицательным гидростатическим давлением, может быть полностью заменено внешней нагрузкой, то по теории капиллярных сил, по которой капиллярные силы сцепления развиваются преимущественно внутри скелета в местах контакта частиц, внешние силы не могут воспроизвести напряженность в скелета.

Опыты, выполненные В. Г. Булычевым в 1937 г. по программе Г. И. Покровского с целью проверки принципа Терцаги—Герсеванова “несжимаемости грунтовой массы”, показали, что удаление из грунта воздуха его длительным кипячением значительно уменьшает сжатие грунтовой массы.

Исследования сжимаемости трехфазного грунта показали, что при наличии заземленного газа в порах грунта зависимость между деформацией и давлением существенно отличается от линейной зависимости. Эта зависимость описывается гиперболой, при этом основная нагрузка передается на газ:

$$E_o = dP/dS = (P_a + P + 2\alpha/r)^2 1/P,$$

Здесь относительная объемная деформации

$$dS = S/V = 1 - \frac{p_a + \frac{2\alpha}{r}}{p_a + P + \frac{2\alpha}{r}},$$

где: P_a — атмосферное давление, P — внешнее давление на грунт, S — деформация от давления P , α — капиллярная постоянная 75 дин/см, r — радиус капилляра, $2\alpha/r$ — давление внутри воздушного пузырька (равное капиллярному давлению).

Деформация связного грунта тем больше, чем больше в нем заземленного газа.

В. Г. Булычевым [1] дается решение для определения капиллярного давления при разуплотнении образца, извлеченного из скважины ниже уровня воды. Теоретически капиллярное давление в грунте может достигать 250 КПа.

В труде В. И. Осипова [6] приведены результаты исследований капиллярного давления в глинистых грунтах. Автором отмечено, что многие исследователи этого явления объясняли наличие структурных связей в глинистых грунтах именно проявлением капиллярного давления.

Указывается, что рядом авторов в разные годы изучались структурные связи в глинистых грунтах, вызванные капиллярным давлением (30—40 годы прошлого века). Позднее возникла теория коллоидных связей, (работы Тюлина, 1933, Вершинина, 1941, Виленского, 1945, Денисова и Ребиндера, 1946, Шарова, 1940), а еще позже (90-е годы) — преобладала теория ионно-электростатических сил. (*Van Olphen H. Forces between suspenders bentonite particles. Prnc. 2nd National Conf. on Clay and Clay Minerals. Publications 327, Washington, 1954.*)

Осиповым и В. Н. Соколовым [6] изучались связи между частицами глинистых грунтов, начиная от самых слабых — магнитных. Изучались в том числе и капиллярные силы. Определялась прочность в широком диапазоне влажности от *мв* до *границы текучести* с применением конического пластомера при высоких влажностях и двухплоскостного среза — при низких. Установлено, что зависимость прочности от влажности имеет сложный характер. На графиках имеются перегибы — увеличение прочности при влажностях проявления капиллярных сил имеет место в области границы раскатывания. Соколовым было установлено, что при влажности *мв* (соответствующей максимальной

ной молекулярной влагоемкости) величина капиллярного давления достигает в каолине 230 КПа, в гидрослюдах 420 КПа, в монтмориллоните — 290 КПа, что составляет 40—75 % прочности грунта.

Г. И Покровским [7] установлено, что сцепление в грунтах образуется капиллярными и адсорбционными силами. При сдвиге под водой капиллярные силы исчезают.

Анализ описанных выше фундаментальных исследований перечисленных авторов, позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Капиллярные силы (капиллярное давление) зависят от размера пор между частицами грунта.

2. Высота капиллярного поднятия воды в грунтах также определяется размером пор.

3. При размерах пор меньше определенного значения капиллярные явления исчезают, а при относительно больших порах капиллярные силы настолько малы, что ими можно пренебречь.

4. Капиллярное давление всегда отрицательно в отличие от порового давления, которое всегда положительно.

5. Капиллярное давление уменьшается при увлажнении грунта по мере заполнения пор водой и исчезает, когда поверхность грунта (частиц грунта) покрыта слоем воды, то есть когда исчезают условия для существования поверхностного натяжения пленок воды в порах грунта.

6. Капиллярное давление возрастает по мере высыхания грунта и продвижения воды в глубины пор. При уменьшении влажности грунта до границы усадки происходит разрыв капиллярных пленок, и капиллярное давление исчезает.

7. Частицы грунта прижимаются друг к другу капиллярным давлением, поэтому капиллярное давление существенно влияет на экспериментально определенные параметры сжимаемости и прочности грунта.

8. Поступление дополнительной капиллярной воды в глинистый грунт, находящийся под внешним давлением при достигнутом равновесии «напряжения—влажность», возможно только в том случае, когда капиллярное давление превышает эффективные напряжения в грунте.

9. Капиллярное давление воздействует на частицы грунта дополнительно и независимо от приложенного к нему внешнего давления по

мнению одних авторов, по мнению других авторов оно может быть уменьшено внешним давлением.

10. По результатам измерения, выполненных некоторыми исследователями, поровое давление в глинистых грунтах может превышать 400 кПа.

11. Воздух (газ), находящийся в порах грунта сжимается при уменьшении размера пор с увеличением капиллярного давления и расширяется при уменьшении капиллярного давления. При этом часть воздуха при возрастании порового давления растворяется в поровой воде и, наоборот, выделяется из нее при уменьшении давления. Если под давлением мелкие поры «захлопываются», воздух из них продавливается в более крупные поры.

12. При испытании грунта в одомере полное капиллярное давление измерить невозможно, так как оно является всесторонним и не может проявляться в зоне расположения колец. При испытании грунта в стабиломере очень сложно подать воду в грунт, находящийся внутри водонепроницаемой оболочки. Испытание грунта на прочность в срезном приборе для исключения капиллярного давления должно выполняться под водой, при этом грунт не должен соприкасаться с кольцами, в которых он размещен, что реализовать не возможно. Кроме того, при любых испытаниях, в которых измеряется поровое давление, должен быть обеспечен доступ воды к любой поре грунта.

Таким образом, прямое измерение порового давления в существующих приборах очень сложно и не точно.

13. Уплотнение и разуплотнение трехфазного грунта под действием порового давления связано со сжатием и расширением воздуха в порах, а также с растворением воздуха в поровой воде при увеличении давления и выделением его при уменьшении давления.

14. Отсутствуют приборы и методы прямого экспериментального определения порового давления в инженерной практике, предложения определять поровое давление для грунтов ненарушенной структуры по компрессионной кривой по нашему мнению не состоятельно, так как это испытание выполняется в одомере.

15. Отсутствуют методы учета порового давления при расчетах сжимаемости (осадок) и устойчивости грунтовых массивов.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ АВТОРОМ

Автором данной работы приводятся, полученные им результаты прямого определения порового давления в пылевато-глинистых грунтах с помощью разработанного им многоцелевого прибора «Грунтомер».

Прибор «Грунтомер» позволяет строить однозначную для каждого образца пылевато-глинистого грунта нарушенной структуры идентификационную кривую в координатах «влажность грунта начальная (исходная) — влажность грунта после уплотнения заданным давлением», на которой как одна из экстремальных точек фиксируется граница раскатывания грунта.

Кроме того, с помощью прибора определяется сжимаемость грунта (модуль общей деформации или по желанию испытателя модуль упругости), прочностные характеристики грунта (по результатам двухплоскостного среза), а также **капиллярное давление** грунта.

Прибор снабжен съемным оборудованием: одним комплектом — для испытания на сжимаемость и капиллярное давление, другим — для испытания грунта на двухплоскостной срез.

Основой прибора является пресс, в котором сжатие образцов грунта, приготовленных в шаблоне, осуществляется механическим способом (первый вариант) — винтом, а передаваемое давление фиксируется образцовым динамометром ДОСМ-02. В процессе испытания измеряется изменение внешнего давления, которое происходит в результате релаксации напряжений в грунте. Начальная (исходная) и конечная (после уплотнения) влажности грунта определяются традиционным способом путем взвешивания и сушки.

При испытании на сжимаемость образцы грунта помещаются во влагоемкие специальные оболочки и размещаются между жесткими пластинами (промежуточными поршнями). В зависимости от поставленной задачи одновременно могут испытываться пять или десять образцов. Для измерения сжимаемости образцы грунта испытываются при разных давлениях, для измерения капиллярного давления образцы после предварительного обжаривания (до условной консолидации) увлажняются (вода подается шприцем во влагоемкие оболочки). В процессе увлажнения грунт разуплотняется, что фиксируется динамометром. Изменение давления на дина-

мометре, соответствующее изменению напряжений в грунте, является капиллярным давлением. В процессе этого испытания образцы грунта не соприкасаются с водонепроницаемым материалом, вода имеет возможность войти в каждую пору.

Для испытания на срез вместо пластин в прибор помещается образец грунта в кольцах. Здесь нет принципиальных отличий от традиционных испытаний грунта на двухплоскостной срез.

Отработка конструкции прибора и оптимальных размеров образцов грунта выполнялась автором в течение 13 лет со времени публикации им первых работ на эту тему [9, 10]. За это время было разработано более десяти вариантов приборов и испытано более тысячи разных образцов грунта. Так были изготовлены и испытаны приборы с одновременным испытанием 1, 2, 3, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30 и 32 образцов. Испытывались образцы диаметрами 16, 20, 25; 30, 35, 40 и 50 мм и толщиной 2, 3, 4, 5, 8 мм.

Оптимальными оказались по условиям продолжительности уплотнения до условной консолидации 0,001 мм/мин или скорости релаксации 0,05 кПа/мин (эта величины соизмеримы с погрешностью измерения силы на динамометре — погрешность отсчета по мессуре динамометра 0,001 мм), времени подготовки образцов, времени сушки уплотненных образцов, промачиваемости (равномерного увлажнения грунта), диапазона реальных давлений на образцы грунта, массы и габаритов самого прибора, габаритов весовых стаканчиков, имеющегося полевого оборудования и других факторов следующие параметры прибора:

- диаметр образца грунта 35 мм,
- толщина образца 3 мм,
- диапазон давлений на образец 25—300 кПа,
- количество одновременно испытываемых образцов 5—10 — при испытании на сжимаемость и капиллярное давление, 10 — при испытании для построения идентификационной кривой,
- полная продолжительность испытания с учетом сушки образца при температуре 105—110 °С 45—60 минут,
- масса прибора со вспомогательными принадлежностями 3 кг,
- максимальный размер прибора 30 см.

Прибор первоначально предназначался для испытания грунтов нарушенной структуры (об-

разцов грунта, отобранных из насыпей), однако его можно использовать и для испытания образцов ненарушенной структуры при увеличении их толщины до 5 мм.

Прибор предназначен для работы в стационарных и полевых условиях.

Целью исследований по данной проблеме являлось изучение влияния на величину **капиллярного давления** следующих факторов: начальной влажности грунтов, величины предварительного уплотнения (величины эффективных напряжений в грунте в момент увлажнения образца), количества циклов увлажнения, количества образцов в пакете и др.

Рассмотрим результаты исследований двух грунтов покровно-делювиально светло-коричневого суглинка нарушенной структуры с границами текучести $w_l = 32\%$, раскатывания $w_p = 17\%$ (лабораторный № 03) и каолиновой глины с $w_l = 53\%$ $w_p = 38\%$ (лабораторный № 02).

Основное количество опытов выполнено с суглинком (лаб. № 03).

Приведем (таб. 4—6) результаты испытания грунта с лаб. № 03 при в пакете из 5 образцов при различном предварительном (до увлажнения) уплотнении до стабилизации или достижения условной консолидации (скорость релаксации 0,05 кПа в минуту). Продолжительность уплотнения до подачи воды 30—40 минут. При этом сначала на грунт прилагалось заданное давление в течение 5 минут (стартовое давление). После стабилизации (или условной стабилизации) фиксировалось по индикатору часового типа на динамометре установившееся сжатие скобы динамометра, то есть установившееся давление, и соответственно, эффективное напряжение в грунте. Медицинским шприцом через иглу в пористые влагоемкие оболочки образцов подавалась вода.

По достижении стабилизации фиксировалось установившееся новое давление. Образцы

Таблица 4

Результаты испытаний грунта № 03 при стартовом давлении 5 минут с пакетом из 5 образцов

Уплотняющее давление P , кПа					Капиллярное давление в циклах, σ_k , кПа				Влажность грунта, W , %				
Начальное	Установившееся в циклах								Начальная	Установившаяся в циклах после увлажнения			
	1	2	3	4	1	2	3	4					
25	20	20	15	—	33	41	43	—	18,9	19,9	20,1	20,1	—
25	20	15	15	—	35	55	66	—	21,0	20,8	20,8	20,7	—
75	50	52	55	—	63	65	54	—	25,5	20,8	19,8	17,7	—
75	50	58	65	—	39	35	29	—	20,0	18,3	17,2	16,4	—
125	95	97	—	—	75	84	—	—	13,7	14,6	14,6	—	—
125	83	76	73	80	87	80	52	46	17,1	15,3	14,4	14,4	14,2
125	77	92	104	104	86	88	101	91	22,9	19,5	17,7	16,7	15,8
190	106	135	142	—	57	84	82	—	18,2	16,8	15,5	15,2	—
190	122	120	139	—	64	84	83	—	22,1	18,5	16,7	15,5	—
300	255	212	255	—	21	48	21	—	24,3	19	16,9	15,7	—
300	204	229	243	—	36	38	41	—	18,6	15,7	14,5	13,8	—

Таблица 5

Результаты испытаний грунта № 03 при стартовом давлении 5 минут с пакетом из 10 образцов

Уплотняющее давление P , кПа					Капиллярное давление в циклах, σ_k , кПа				Влажность грунта, W , %				
Начальное	Установившееся в циклах								Начальная	Установившаяся в циклах после увлажнения			
	1	2	3	4	1	2	3	4					
25	20	18	—	—	53	60	—	—	19,4	19,2	19,1	—	—
75	51	—	—	—	37	—	—	—	20,4	17,0	—	—	—
75	62	—	—	—	97	—	—	—	17,8	17,5	—	—	—
125	80	—	—	—	15*)	—	—	—	16,1	17,8	—	—	—
125	47	82	—	—	37	50	—	—	22,3	21,7	—	—	—
125	85	—	—	—	101	—	—	—	18,1	17,5	—	—	—
190	124	—	—	—	75	—	—	—	19,1	17,1	—	—	—
190	100	—	—	—	14*)	—	—	—	15,3	16,8	—	—	—
190	92	127	—	—	71	67	—	—	17,7	15,7	15,7	—	—
300	150	195	—	—	59	44	—	—	21,9	19,5	—	—	—

* В этих опытах перед замачиванием было восстановлено начальное внешнее давление на образцы.

Результаты испытаний грунта 03 при стабилизированном давлении

Количество образцов в пакете	Уплотняющее давление, P , КПа	Капиллярное давление, σ_k , КПа	Влажность грунта, W , %	
			Начальная	После увлажнения
5	10	32	18,8	19,2
	25	50	18,8	19,3
	50	40	18,8	18,2
	75	32	18,8	17,3
	100	32	18,8	17,0
	150	19	18,8	16,9
	200	14	18,8	16,2
	250	0	18,8	15,4
10	300	0*)	18,8	15,2
	50	59	17,7	19,1
	100	46	19,0	17,1
	200	14	19,8	18,9
	300	6	19,6	18,4

* Для этого случая при той же начальной влажности проведено испытание и по другой методике.

грунта извлекались, взвешивались, перекладывались в сухие оболочки, и испытание повторялось по описанной выше методике. Таким образом, производилось несколько циклов испытаний (обычно 3—4) до тех пор, пока не разрушался (разламывался) какой-либо из образцов.

Для упрощения последующих описаний назовем условно время предварительного начального постоянного давления до релаксации стартовым давлением.

Была выполнена серия опытов, в которых уплотнение образцов грунта до увлажнения выполнялось без релаксации давления, то есть заданное давление поддерживалось постоянным до стабилизации (или условной стабилизации).

Давление на образцы грунта в пакете было сначала доведено до 450 кПа, но не поддерживалось, произошла релаксация напряжений в грунте, и давление стабилизировалось на величине 300 кПа. Далее грунт был увлажнен по описанной выше методике, в результате чего капиллярное давление составило 15 кПа.

Испытания каолиновой глины (лаб. № 02)

Все испытания выполнялись с пакетом образцов в количестве 10 шт. со стартовым давлени-

ем в течение 5 минут. Отличие этой методики заключалось в том, что после релаксации напряжений уплотняющее давление перед увлажнением образцов грунта увеличивалось до первоначального значения. Результаты испытаний приведены в табл. 7.

Результаты испытаний некоторых опытов с суглинком (лаб. № 03) показаны на рис. 1—4. На этих рисунках на оси абсцисс отложено время от начала опыта в минутах, на оси ординат относительная деформация пакета образцов $\Delta H/H \cdot 10^{-4}$, где ΔH — величина сжатия образца, мм; H — его первоначальная высота, мм. Сплошная линия соответствует первому циклу, точечная — второму, пунктирная — третьему циклу испытаний.

Рассмотрим процесс самого испытания.

Пять образцов грунта, с одинаковой заданной начальной влажностью или при их естественной влажности, изготовленные с помощью шаблона, помещаются во влагоемкие оболочки и размещаются между жесткими промежуточными поршнями. Через верхний поршень на образцы передается заданное внешнее давление, которое контролируется по показанию мессуры. Заданное давление поддерживается постоянным

Таблица 7

Результаты испытания каолиновой глины (грунт № 02)

Уплотняющее давление, P , КПа	Капиллярное давление σ_k , КПа	Влажность грунта, W , %	
		Начальная	После увлажнения
50	51	39,3	40,7
100	30	41,4	40,5
200	16	40,3	38,7
300	18	36,0	29,0

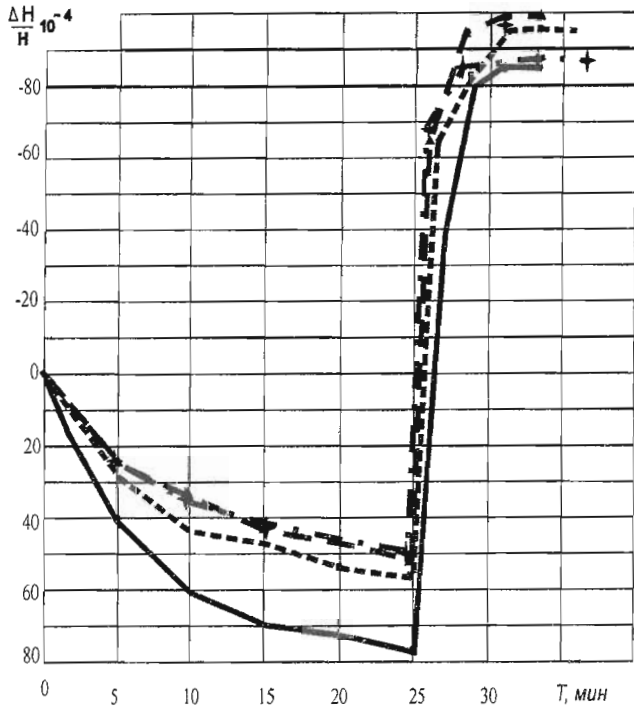


Рис. 1. Изменение относительной деформации образцов во времени (показат. текуч. — 0,11; $P = 100$ кПа)

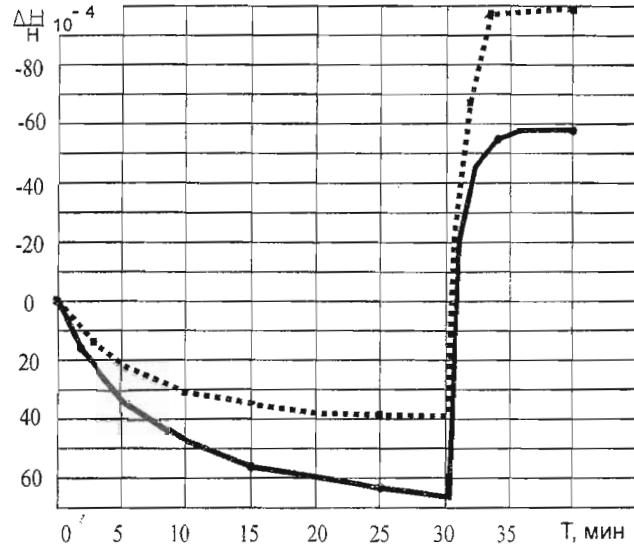


Рис. 3. Изменение относительной деформации образцов во времени (показат. текуч. 0,2; $P = 50$ кПа)

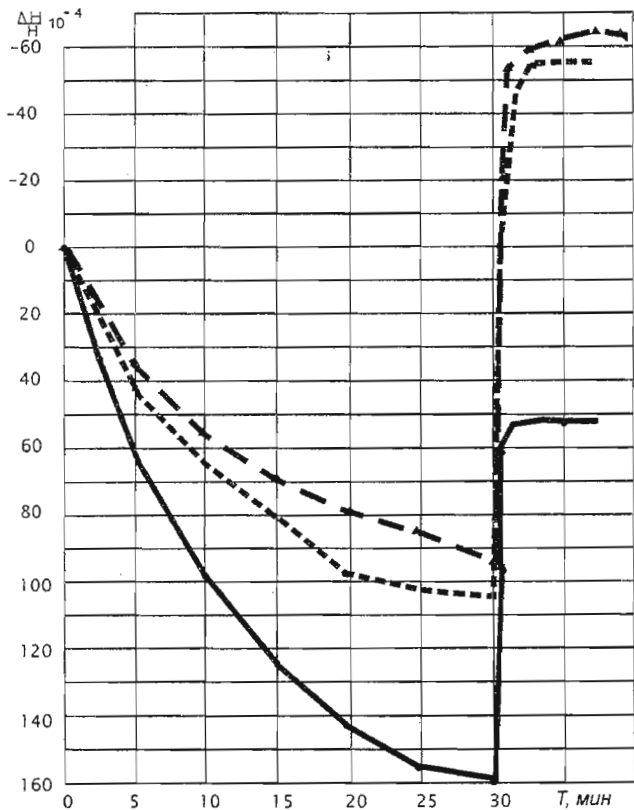


Рис. 2. Изменение относительной деформации образцов во времени (показат. текуч. 0; $P = 200$ кПа)

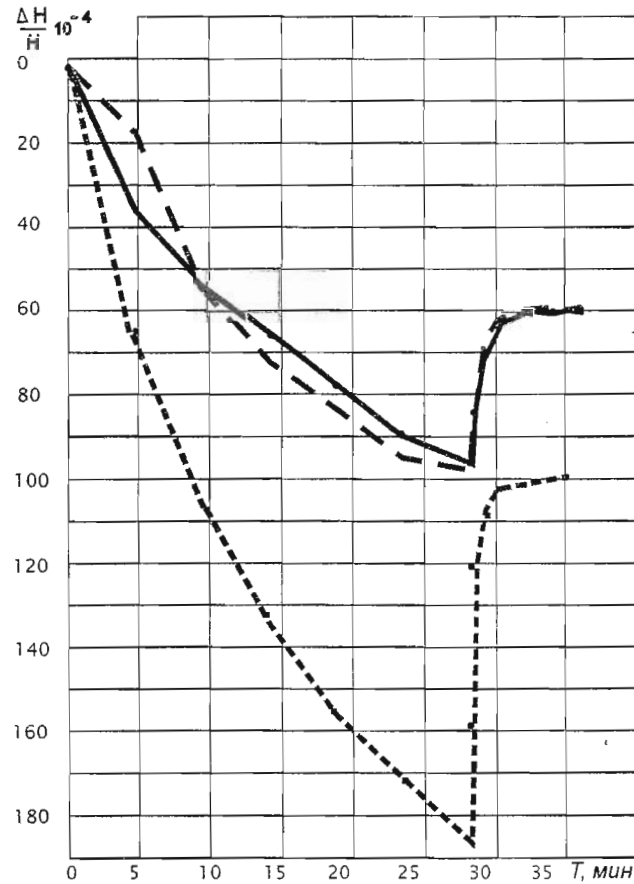


Рис. 4. Изменение относительной деформации образцов во времени (показат. текуч. 0,45; $P = 300$ кПа)

в течение стартового времени. Стартовое давление осуществляет предварительное обжатие грунта. Были отработаны две методики. По одной — стартовое давление составляет 5 минут, по другой — 10 секунд. Эти величины выбраны не случайно. Стартовое время при второй методике соответствует продолжительности 3—5 кратного прохода катка при уплотнении грунта насыпи в процессе ее возведения, а стартовое время при первой методике обеспечивает полную передачу давления на образцы, начальное увлажнение материала влагоемких оболочек, выдавливаемой из грунта водой. Различие в продолжительности стартового периода практически, как показали результаты испытаний, не отражается на измеряемой величине капиллярного давления, оно влияет на последующую сжимаемость грунта. В описываемой ниже части опытов применялась первая методика.

По истечении времени действия стартового давления это давление постоянным более не поддерживалось, при этом продолжалось уплотнение грунта. В процессе стартового давления деформация образцов грунта не фиксировалась, а после его завершения производилось непрерывное наблюдение за падением давления, происходящего в результате уплотнения грунта с частичным удалением из его пор воздуха и воды с соответствующей релаксацией напряжений.

По достижении полной или условной консолидации во влагоемкие оболочки, как указывалось выше, подавалась вода, фиксировалось время и величина разуплотнения грунта и, следовательно, изменение напряжений, возникающих в грунте. При этом, как уже указывалось, выполнялось несколько циклов измерений и фиксировалось изменение влажности образцов. Каждое испытание повторялось 3—5 раз для оценки погрешности. Различие в параллельных испытаниях не превышало 5—10%, что соответствовало коэффициенту вариации 0,03—0,05.

На приведенных рисунках видно, что уплотнение образцов грунта до увлажнения (полная или условная консолидация) происходило достаточно медленно — в течение 30 минут с явным экспоненциальным замедлением. После подачи воды, наблюдается скачкообразное разуплотнение грунта в течение 1—2 минут, при этом на динамометре фиксируется резкое повышение давления. Этот процесс объясняется следующим образом. В момент достижения полной или частичной консолидации частицы грунта были

сжаты внешним давлением, которое зафиксировано на индикаторе динамометра и дополнительным капиллярным давлением. После попадания воды на поверхностные поры грунта или вовнутрь образца грунта, выпуклость менисков исчезла, следовательно, исчезло и капиллярное давление. Таким образом, с частиц грунта была снята часть давления, произошла декомпрессия, и образцы грунта разуплотнились, приобретя плотность соответствующую только внешней нагрузке. Разность по индикатору между установившимся давлением до подачи и установившимся давлением после подачи воды соответствует капиллярному давлению. Образцы грунта помещены во влагоемкие оболочки без колец. Это обеспечило проявление всестороннего капиллярного давления по всему объему образцов.

Следует отметить, что увеличение диаметра образцов (в диапазоне твердой — тугопластичной консистенции грунта) незначительно — не более 0,25—0,5 мм, что около 1% от первоначального диаметра. Сжатие влагоемких оболочек незначительно (установлено измерением) и не учитывалось. Другая серия опытов с большим количеством образцов различных грунтов от супесей до жирных глин была выполнена по другой — комплексной методике с одновременным определением модуля деформации.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ

Из теории сжимаемости грунтов на основании лабораторных испытаний, например [12, 13], модуль деформации грунта может быть рассчитан для определенного интервала давлений следующим образом:

$$E = \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right) \frac{\Delta p}{\Delta s} = \beta,$$

где ν — коэффициент Пуассона (коэффициент бокового давления), h — высота образца, Δs — величина его сжатия в интервале давления Δp .

Применительно к испытаниям в приборе «Грунтомер», где возможно боковое расширение грунта $\nu = 0$, а $\beta = 1$, тогда формула (1) упростится:

$$E = H\Delta p/\Delta s. \quad (2)$$

В нашем приборе первоначальная высота образца H соответствует суммарной первоначальной толщине образцов в пакете, то есть для пакета из пяти образцов она составляет 15 мм, для пакета из 10 образцов — 30 мм.

В приборе «Грунтомер» при испытании грунта на сжимаемость все измерения сводятся к отсчетам по индикатору часового типа, фиксирующего сжатие скобы образцового динамометра, для которого величина сжатия скобы и приложенное к ней давление связаны линейной зависимостью. Изменение приложенного давления происходит в результате релаксаций внутренних напряжений в испытываемом грунте, что вызывает его сжатие, то есть оно зависит от свойств грунта, от его сопротивляемости.

Выведем формулу для расчета модуля общей деформации применительно к прибору «Грунтомер».

Пусть первоначально приложенному давлению P_1 соответствует отсчет по индикатору λ_1 , по истечении определенного времени происходит релаксация напряжений в грунте в результате уплотнения грунта и равного ему разжатия пружины-скобы. На индикаторе установится отсчет λ'_1 , соответствующий установившемуся давлению P'_1 . После этого к грунту было приложено новое давление P_2 с соответствующим отсчетом по индикатору λ_2 . После завершения релаксации на индикаторе установится новый отсчет λ'_2 , соответствующий установившемуся давлению P'_2 .

Деформация образца (пакета)

$$\Delta s = (\lambda_2 - \lambda'_2) - (\lambda_1 - \lambda'_1),$$

а интервал давления

$$\Delta p = 1/2 k(\lambda_2 + \lambda'_2) - (\lambda_1 + \lambda'_1).$$

При этом принято, что в течение периода релаксации напряжений давление уменьшалось линейно и в формуле применены средние значения давлений в первом и втором нагружениях. Это обосновано изучением характера изменения внешнего давления во времени в период релаксации внутренних напряжений.

k — коэффициент жесткости пружины динамометра. (Для динамометров типа ДОСМ-02 он составляет 300—350 Н на 1 мм сжатия)

Подставив приведенные выше значения в формулу (2), после соответствующих преобразований получим:

$$E = 0,5kh \frac{(\lambda_2 - \lambda_1) + (\lambda'_2 - \lambda'_1)}{(\lambda_2 - \lambda_1) - (\lambda'_2 - \lambda'_1)}. \quad (3)$$

Как видно из формулы (3), член $(\lambda_2 - \lambda_1)$ представляет разность между первоначально приложенными давлениями P_2 и P_1 , которая отражает жесткость скобы динамометра и не зависит от свойств грунта, а выражение $(\lambda'_2 - \lambda'_1)$ соответствует паде-

нию давлений в результате релаксации напряжений в грунте и определяет его сжимаемость. Для нашего конкретного прибора при пакете из 5 образцов значение $0,5kh$ равно 2,63 мПа.

Испытывается комплект из пяти образцов грунта примерно одинаковой влажности твердой — тугопластичной консистенции в приборе «Грунтомер». После предварительного взвешивания всех образцов вместе, они быстро помещались во влагоемкие оболочки (каждый образец в свою оболочку) и укладывались в прибор. На образцы плавно с постепенным нарастанием и убыванием общей продолжительностью 10—12 секунд передается пикообразное стартовое давление P_1 с максимумом 300 кПа (вторая методика), потом давление снижается до значения $P_2 = 25$ кПа. Считалось, что в образцах возникли напряжения сначала σ_1 и потом σ_2 . После этого напряжение в образцах изменяется без дополнительного воздействия (оно может уменьшаться — релаксировать или увеличиваться за счет упругого разуплотнения образцов).

После стабилизации давления σ_2 (допускается условная стабилизация — скорость изменения давления 0,05 кПа в минуту, или 0,2 %, в минуту от первоначального значения) фиксируется установившееся значение давления P'_2 , которому соответствует напряжение в образцах грунта σ'_2 . Его можно считать эффективным, потому что произошла стабилизация грунта.

Далее давление быстро (в течение одной — двух секунд) увеличивается винтом динамометра до значения, равного 75 кПа. После этого внешнее воздействие на образцы грунта прекращается и напряжение в грунте релаксирует до стабилизации (или такой же условной стабилизации). После стабилизации фиксируется значение P'_3 , которому соответствует эффективное напряжение в образцах грунта σ'_3 .

Изменениям толщин образцов в процессе изменения давлений от P_2 и P_3 до P'_2 и P'_3 соответствуют деформации скобы образцового динамометра l_1 и l_2 , измеряемые по индикатору часового типа (мессуре). Следует еще раз отметить, что при твердой — тугопластичной консистенциях в процессе испытания диаметр образцов увеличивается незначительно. Но это учитывается в расчетах давления — площадь образцов принимается равной 10 см² вместо значения 9,62 см² до приложения давления.

Далее медицинским шприцом через иглу, втыкаемую поочередно во влагоемкие оболочки

вокруг образцов грунта, многократно подается небольшими порциями вода до полного насыщения оболочек. Происходит резкое набухание образцов грунта, приводящее к сжатию скобы динамометра, что отражается на его индикаторе. После стабилизации фиксируется отсчет по индикатору динамометра, то есть установившееся давление P'_4 и, следовательно, установившееся напряжение в образцах грунта σ'_4 . Образцы грунта извлекаются из оболочек, взвешиваются и сушатся для расчета влажности.

Все описанное испытание на приборе «Грунтомер» осуществляется в течение 50–60 минут. Образцы (они имеют форму тонких пластинок диаметром около 35 мм и толщиной менее 3 мм) полностью высыхают при температуре 105–110 °С в течение 25–30 минут. Таким образом, полная продолжительность всего этого комплексного испытания грунта, включая расчеты, составляет примерно один час.

РАСЧЕТ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ И КАПИЛЛЯРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Деформация грунта между установившимися давлениями P'_2 и P'_3 рассчитывается как разность между изменениями деформаций образца и этими давлениями, а именно: $l_2 - l_1$. Имеется ввиду алгебраическая разность этих величин, так как величина l_1 может иметь отрицательное значение, когда образцы при давлении 25 кПа, приложенном к образцам после снятия кратковременного давления 300 кПа, разуплотняются.

Суммарная относительная деформация образцов составляет:

$$\Delta H = \frac{l_2 - l_1}{H} = \frac{l_2 - l_1}{15}, \quad (4)$$

где H — суммарная первоначальная толщина образцов, равная 15 мм.

Для оценки средневзвешенных давлений было изучено изменение давлений во времени в процессе релаксации напряжений в образцах от начальных напряжений σ до установившихся напряжений σ' . Уплотнение образцов грунта в диапазоне небольших давлений 0,25–0,75 кПа происходит почти линейно. Поэтому в расчетах принималось среднее давление между начальным, приложенным внешним давлением, и установившимся в процессе релаксации напряжений в грунте, то есть:

$$P_p = P + \frac{1}{2}(P - P'), \quad (5)$$

где P_p — расчетное давление в конкретном случае.

Модуль общей деформации рассчитывался как отношение разности расчетных давлений к соответствующей разности деформаций:

$$E_o = \frac{P_{2,p} - P_{1,p}}{\Delta H}. \quad (6)$$

Капиллярное давление, испытываемое частицами грунта, равно разности между установившимися напряжениями в грунте после его увлажнения и до его увлажнения:

$$\sigma_k = P'_4 - P'_3. \quad (7)$$

Результаты испытаний даны в таблице 8.

В процессе опытов, выполненных по первой и второй методикам, было выявлено несколько очень важных факторов:

1) в ряде опытов во втором и третьем циклах испытаний имело место увеличение капиллярного давления, что свидетельствует о некотором уменьшении размера пор при многократном уплотнении — разуплотнении образцов,

2) поданная к поверхности образцов вода впитывалась в поры грунта в тех случаях, когда капиллярное давление превышало поровое давление или равное ему внешнее давление, которому соответствуют внутренние напряжения, испытываемое частицами грунта,

3) величина капиллярного давления практически не зависит от начальной влажности грунта и консистенции (в диапазоне твердой — тугопластичной),

4) величина капиллярного давления не зависит от количества одновременно испытываемых образцов,

5) наибольшие из измеренных значений величины капиллярного давления (до 100 кПа) наблюдались при стабилизированном внешнем давлении на грунт 50–100 кПа,

6) при стабилизированных давлениях, внешних давлениях более 200 кПа, капиллярное давление уменьшалось и почти исчезало при внешнем давлении 300 кПа, что можно объяснить уменьшением суммарного объема капиллярных пор при уплотнении грунта большим внешним давлением,

7) в случаях, когда образцы грунта были предварительно уплотнены очень большим давлением (в наших опытах до 450 кПа), а потом внешнее давление не поддерживалось, и напряжение в образцах грунта релаксировало до 300 кПа, при подаче воды возникало небольшое капиллярное давление (18 кПа).

8) величина капиллярного давления в суплинках и глинах в общем выше, чем в супесях,

Результаты определения модуля деформации и капиллярного давления

№ п. п.	№ обр. лаб.	Границы пластичности, %		Влажность начальная, W , %	Влажность после увлажнения, $W_{sa,1}$, %	Показатель текучести, I_L , %	Модуль общей деформации, E_s , мПа	Капиллярное давление, $\sigma_{с.к.п.}$
		W_l	W_p					
1	111	25	15	13,7	15,2	< 0	4,4	45,5
2	129	23	14	14,1	12,9	0	3,5	31,5
3	264	37	19	19,9	18,7	0,05	5,6	57,9
4	146	43	22	19,6	20,3	< 0	5,8	55,7
5	112	31	23	23,5	21,2	0,08	9,1	58,5
6	102	28	22	24,0	21	0,33	1,6	50,8
7	123	22	14	15,0	13,9	0,12	5,5	40,6
8	274	37	22	22,4	24,7	0,03	4,4	64,8
9	142	39	18	22,5	22,6	0,19	3,4	60,2
10	119	20	14	12,4	14,6	0,40	2,3	10,5
11	162	32	16	19,4	19,9	0,21	2,8	69,0
12	110	18	11	13,7	15,3	0,39	3,0	31,5
13	127	31	20	23,7	24,6	0,25	8,3	48,3
14	159	29	16	19,4	17,8	0,26	3,5	75,2
15	137	27	18	20,1	21,3	0,23	2,8	56,0
16	280	50	29	29,2	31,3	0,10	4,5	53,6
17	236	18	12	14,8	12,2	0,47	3,2	32,2
18	140	40	22	22,9	21,7	0,05	2,1	61,2
19	268	42	20	24,4	20,2	0,15	1,8	52,7
20	245	26	17	17,9	17,2	0,10	2,2	49,0
21	101	27	22	23,1	24,3	0,22	3,7	27,3
22	145	33	18	25,4	25,2	0,49	2,5	88,0
23	161	51	33	31,2	37,3	< 0	4,4	51,0
24	143	49	23	28,7	26,2	0,22	2,6	77,3
25	18Э	81	31	36,6	38,7	0,11	3,1	91,7
26	02	53	38	42,0	38,6	0,27	3,1	58,1
27	104	24	14	16,3	16,8	0,23	3,3	57,4
28	115	19	9	12,8	11,9	0,38	3,0	34,3
29	132	42	26	27,4	30,0	0,09	4,2	45,2
30	148	61	32	32,8	31,0	0,03	3,5	60,0
31	141	49	24	23,3	24,9	< 0	4,3	79,8
32	03	32	18	22,7	22,5	0,34	3,3	81,0
33	03	32	18	23,6	21,1	0,40	3,5	77,7
34	2-3ж	43	26	28,9	27,2	0,17	4,8	80,5
35	1ж	26	13	18,7	16,0	0,44	4,1	54,3
36	2ж	31	15	19,6	18	0,29	6,2	54,2
37	3ж	20	12	13,0	15,8	0,13	12,1	27,3
38	2-5ж	49	31	31,4	30,9	0,02	2,2	77,0
39	4ж	35	24	23,2	22,8	< 0	3,9	59,5
40	2-4ж	47	28	28,8	28,6	0,04	3,3	66,5

что объясняется разным диаметром капиллярных пор.

УЧЕТ КАПИЛЛЯРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ДЕФОРМАЦИЙ И УСТОЙЧИВОСТИ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Проведенные автором исследования (и известные ранее данные) показали, что капиллярное давление существенно влияет на величины осадок земляных сооружений и их устойчивость. До того момента, пока поры в грунте открыты для взаимодействия с атмосферой при его влажности выше границы усадки, существуют мениски на

поверхностных пленках воды в порах и, следовательно, реализуется капиллярное давление. При этом капиллярное давление добавляется к внешнему давлению, дополнительно сжимая грунт.

Существенным является следующее. Капиллярное давление увеличивает уплотнение грунта в земляном сооружении и его осадку. Капиллярное давление повышает устойчивость сооружения, так как прочностные характеристики грунта, определенные в условиях действия капиллярного давления, имеют более высокие значения.

При исчезновении капиллярного давления (интенсивные атмосферные осадки в виде дож-

для, создающие слой воды на поверхности откосов или при подтоплении сооружения) приводят к разуплотнению грунта и снижению его прочностных характеристик.

Существующие методы расчета осадок и устойчивости земляных сооружений не учитывают влияния капиллярного давления.

Покажем на конкретных примерах влияние капиллярного давления на уплотнение (осадку) и устойчивость дорожных насыпей высотой, например, 6 метров, возведенных из грунтов с данными из таблицы. 8.

Для упрощения задачи будем учитывать в расчете только действие собственного веса грунта (бытовое давление), считая плотность грунта для всех вариантов одинаковой и равной 2 т/м^3 (удельный вес 20 кН/м^3). Примем для всех вариантов ширину насыпи поверху (так называемая, «основная площадка» для железнодорожных насыпей) равной 7 метров, заложение откосов 1:2.

Разобьем насыпи по высоте на слои толщиной 1 метр, рассчитаем осадки каждого слоя и насыпей в целом.

Результаты расчетов показаны в табл. 9.

Таблица 9

Осадки насыпей с учетом и без учета капиллярного давления

Лабор. № грунта	Осадка насыпи под давлением, см		
	бытового и капиллярного	только бытового	только капиллярного
111	15,7	9,6	6,1
122	18,0	12,0	6,0
264	13,7	7,5	6,2
146	13,0	7,2	5,8
112	8,5	4,6	3,9
102	45,2	26,3	18,9
123	12,1	9,6	2,5
274	18,4	9,6	8,2
142	55,8	30,1	25,7
119	21,0	18,3	2,7
162	29,8	15,0	14,8
110	20,3	14,0	6,3
127	8,6	5,1	3,5
159	24,9	12,0	12,9
137	27,0	15,0	12,0
280	16,5	9,3	7,2
236	19,2	13,1	6,1
140	37,5	20,0	17,5
268	40,8	23,3	17,2
245	32,5	19,1	13,4
101	15,8	11,4	4,4
145	37,9	16,8	21,1
161	16,5	12,2	4,3
143	34,0	16,2	17,8
18-э**	70,8	29,1	41,7
02	55,5	29,1	26,4
104	18,4	9,7	8,7
115	16,4	10,7	5,7
132	13,0	7,6	5,4
148	17,7	9,1	8,6
141	16,7	7,4	9,3
03	22,0	9,7	11,3
03	20,2	9,1	11,1
2-3ж*)	15,1	6,7	8,4
1ж*)	14,4	7,8	6,6
2ж*)	9,7	5,2	4,5
3ж*)	3,4	2,6	0,8
2-5ж*)	32,0	14,5	17,5
4ж*)	15,8	8,2	7,6
2-4ж*)	19,8	9,7	10,1

* Образцы отобраны из железнодорожных насыпей.

** Набухающий грунт (монтмориллонитовая глина).

Как видно из приведенной таблицы, осадки насыпей могут достигать 3—5 % и более от их первоначальной высоты, при этом доля уплотняющего капиллярного давления от суммарного давления в некоторых грунтах может достигать 50 % и более. Капиллярное давление действует независимо от бытового давления и независимо от дополнительной внешней нагрузки, например, от веса поезда на железнодорожной насыпи. В однородном грунте оно одинаково на любой глубине от поверхности грунта.

Следует отметить, что в приведенных примерах рассматривалась осадка грунта в боковых призмах насыпи на глубину до 3—3,5 метров. Поэтому использовались значения модуля общей деформации, измеренного в интервале давлений 25—75 кПа. Следует всегда измерять сжимаемость грунта нарушенной структуры в интервале тех давлений, которые используются в конкретном расчете.

Когда к поверхностям грунта насыпи (откосы, основная площадка) подступает вода, ликвидируя мениски в порах, капиллярное давление исчезает, грунт разгружается и разуплотняется. Если вода подступает (подтапливает) только с одной стороны насыпи, например, при паводке, то разуплотняется грунт только с этой стороны насыпи. При этом происходит перекосяк поперечного профиля насыпи. На земляном полотне железнодорожного пути происходит перекосяк рельсошпальной решетки, что угрожает безопасностью движения поезда.

Наиболее неблагоприятное сочетание обстоятельств в этом случае будет иметь место на кривой, где наружный рельс приподнят над внутренним (до 15 см), если одностороннее подтопление насыпи происходит со стороны наружного рельса. При замедлении поезда в этом месте (например, установлено по какой либо причине ограничение скорости движения), суммарный перекосяк пути может быть за пределами, и произойдет авария. На автодорогах перекосяки в верхней части насыпей приводят к растрескиванию асфальтобетона.

При подтоплении насыпи или выпадении атмосферных осадков на поверхность грунта, может иметь место впитывание воды в грунт на разную глубину, а может быть и так, что увлажнение грунта практически произойдет только на незначительную глубину. В насыпях из суглинков и глин второй случай наиболее характерен. Здесь, если поровое давление превышает капил-

лярное давление, капиллярная вода в поры поступать не сможет. Гравитационная вода (фильтрация) переместится в грунт только в том случае, если будет преодолен критический градиент. Именно по этой причине невысокие гидротехнические и мелиоративные дамбы, возведенные даже с низкой степенью уплотнения грунта (0,8—0,9 от максимальной стандартной плотности), устойчиво стоят подтопленными в течение многих лет, при этом незначительное повышение влажности грунта имеет место на глубину до полуметра-метра от поверхности мокрых откосов.

При уходе воды от откоса и испарения ее из пор грунта, капиллярное давление возникает вновь, и начинается обратный процесс — уплотнение грунта насыпи, то есть происходят деформации противоположного знака.

Следует отметить, что деформации грунта, вызванные исчезновением капиллярных сил, происходят очень быстро — часы и сутки. В связи с неоднородностью грунта по вещественному составу и плотности, различием в условиях подтопления или замачивания атмосферными осадками, реализуется разное капиллярное давление даже в близко расположенных друг от друга местах (метры, десятки метров). Деформации, происходящие при высыхании грунта, протекают значительно медленнее — недели, месяцы. Они также не равномерны в разных местах, так как процесс испарения воды из грунта зависит от многих факторов — ориентации откоса относительно стран света, вида и густоты растительности на откосах, заложения откосов, наличия на обочинах и откосах старого балласта и пр.

Деформации, связанные с капиллярными процессами, по внешним признакам напоминают зимнее пучение грунта, хотя имеют совершенно другую природу.

Для того, чтобы акцентировать внимание специалистов на деформации земляных сооружений, вызванные именно капиллярными явлениями, предлагается назвать их «*летними пучинами*».

Итак, *летние пучины* представляют собой один из видов обратимых деформаций земляных сооружений, не приводящих к общей потере устойчивости (к разрушению) сооружений. Разумеется, они могут иметь место не только летом, но и весной и осенью, то есть тогда, когда нет отрицательных температур воздуха.

Влияние капиллярных процессов на устойчивость сооружений, например, на устойчивость откосов, проявляется в первую очередь в уменьшении значений прочностных характеристик грунтов (угла внутреннего трения φ и удельного сцепления c). При определении этих параметров в лабораторных или в полевых условиях частицы грунта сжимались одновременно внешним и капиллярным давлениями. Когда к грунту подступила вода, капиллярные силы исчезли, поэтому значения прочностных характеристик уже не соответствуют новым условиям. Их можно пересчитать, перестроив график уравнения Кулона для одноплоскостного среза или график Мора для трехосного испытания грунта. На графиках на оси абсцисс следует вместо приложенных к образцам сжимающих давлений P_1, P_2, P_3 отложить значения $(P_1 + \sigma_{к1}), (P_2 + \sigma_{к2}), (P_3 + \sigma_{к3})$ и построить новый график. Новая линия расположится ниже предыдущей (рис. 5) и уточненные таким образом значения удельного сцепления и угла внутреннего трения окажутся ниже. Для каких-то грунтов капиллярное давление, измеренное при $P = 200\text{—}300$ кПа, может оказаться ниже, чем при меньших значениях прилагаемого давления P , тогда угол внутреннего трения возрастет, однако удельное сцепление всегда уменьшится. В действительности прочностные характеристики грунта при фактическом исчезновении капиллярного давления снизятся еще больше в сравнении с нижним графиком.

При этом следует иметь в виду, что прочностные характеристики, используемые для расчета устойчивости существующего, давно построенного земляного сооружения или природного склона, всегда следует определять в условиях неконсолидированного среза в диапазоне тех нормальных давлений, которые действуют в зоне поверхности скольжения. Неправильно испытывать грунт на прочность при нормальных давлениях $100\text{—}300$ кПа и применять полученные результаты для расчетов по поверхности скольжения, залегающей на глубине менее 10 метров.

Испытание грунта с предварительным его увлажнением не снимает, как было выше сказано, капиллярного давления. В лучшем случае при такой методике удастся повысить влажность грунта.

Изложенные в настоящей работе результаты исследований и обобщений позволяют сделать следующие основные выводы.

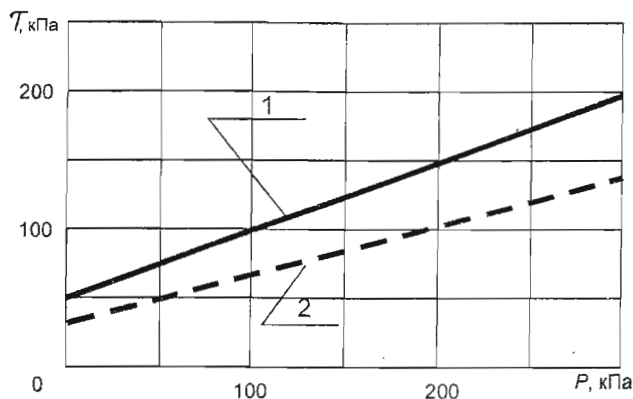


Рис. 5. График сдвига: 1 — без учета капиллярного давления, 2 — с учетом капиллярного давления

1. Капиллярное давление в глинистом грунте можно однозначно и ускоренно определять на приборе автора «Грунтомер».

2. Капиллярное давление действует на частицы грунта независимо от приложенного к грунту внешнего давления и давления от собственного веса грунта (бытового давления).

3. Капиллярное давление увеличивает сжатие (уплотнение) грунта в земляном сооружении.

4. Капиллярное давление необходимо учитывать при исследовании деформаций грунта, так как при его изменении в глинистом грунте происходят неравномерные в плане и по глубине осадки разного знака, которые автором предложено именовать «летними пучинами».

5. В периоды интенсивных атмосферных осадков или подтопления земляного сооружения (земляного полотна), особенно со стороны одного откоса, летние пучины могут быть значительными по величине и вызывать недопустимые для нормальной эксплуатации сооружения деформации.

6. При расчете прочностных характеристик по результатам образцов грунта следует вводить поправку на капиллярное давление.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булычев В.Г. Механика дисперсных грунтов. М.: Стройиздат, 1974, С. 111—118.
2. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. М.: Стройиздат, 1973, 375 с.
3. Герсеванов Н.М. Польшин, Д. Е. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения. М.: Стройиздат, 1948, 247 с.
5. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. Изд. 2-е, Л.: Недра, 1984, 503 с.
4. Орнатский Н.В. Механика грунтов. М.: Изд. МГУ, 1962, С. 142—173.

6. *Осипов В.И.* Природа прочностных и деформационных свойств глинистых грунтов. М.: Изд. МГУ. 1979. 231 с.
7. *Покровский Г.И.* Трение и сцепление в грунтах. М-Л.: Стройиздат Наркомстроя, 1941. 60 с.
8. *Саваренский Ф.П.* Инженерная геология. 2-е Изд. ГОНТИ, 1939, 488 с.
9. *Смоляницкий Л.А.* Оценка свойств грунтов по величине релаксации напряжений. Геоэкология, инженерная геол., геокриология, 1993. № 1.
10. *Смоляницкий Л.А.* Усовершенствование комплекса инженерно-геологических изысканий для строительства. Сб. «Расчет и проект. оснований и фундаментов в сложных инж.-геол. условиях», Воронеж. 1992.
11. *Терцаги К.* Теория механики грунтов» М.: Госстройиздат, 1961, С. 307—319.
12. *Цытович Н.А.* механика грунтов. М.: Госстройиздат, 1963, 636 с.
13. *Швец В.Б., Гинзбург Л.К., Гольдштейн В.М., Капустин В.К., Феклин В.И., Швец Н.С.* Справочник по механике и динамике грунтов. Киев: Будівельник, 1987. С. 60.