

ПРИРОДА НАЧАЛЬНЫХ ГРАДИЕНТОВ ФИЛЬТРАЦИИ

В настоящее время считается [1–3], что основной причиной начального градиента i_n фильтрации воды в грунтах является наличие пленок связанной воды вокруг частиц грунта и их последующий сдвиг при увеличении градиента напора i .

Однако известно, что i_n существует и в песчаных грунтах [4], в которых невозможно заполнение пор одной только связанной водой. Отсюда вытекает предположение, что начальные градиенты в грунтах должны обуславливаться наличием пузырьков воздуха, защемленных в свободной воде.

Положение о наличии свободной воды на пути фильтрации в порах насыщенных глинистых грунтов не требует специальных доказательств. Концепция же о защемленных пузырьках воздуха нуждается во всестороннем рассмотрении, ибо, по существующему мнению, в определенных условиях можно увлажнить грунт так, чтобы он не содержал защемленного воздуха. Рассмотрим различные возможные случаи увлажнения грунта.

Наличие защемленного воздуха легко установить, если увлажнение образца грунта происходит с одной стороны, но под действием напора воды. Тогда струйки воды, обогнав соседние, взаимно перемыкаются на своем пути и отсекают замкнутые объемы воздуха. С течением времени защемленные пузырьки воздуха перемещаются из меньших пор в большие, так как в последних они имеют минимум поверхностной энергии.

Легко объясняется защемление воздуха в порах грунта при его увлажнении без напора, но при смачивании образца грунта одновременно со всех сторон.

Следующий случай является более сложным. Как принято считать, защемленного воздуха не образуется, если увлажнять образец с одной стороны за счет капиллярного всасывания воды. В этом случае говорят, что воздух свободно выходит через еще не увлажненные поверхности образца. Если предварительно прокипятить воду или провакуумировать ее [1], то в порах грунта, насыщенного такой водой, защемленный воздух отсутствует [1].

Чтобы проверить это положение, автором были проведены специальные наблюдения на установке, представляющей прозрачный тонкостенный сосуд с грунтом и прикрепленным к нему переоборудованным оптическим микроскопом. Различные виды грунтов увлажнялись предварительно прокипяченной и вакуумированной водой. Увлажнение производилось с одной стороны образца.

В результате было установлено, что в начале увлажнения образца грунта мениск одного из углов (1 на рис. 1, а) поры на стыке гранул скелета тянет воду из соседнего пространства. При этом мениск уменьшает кривизну. Слой воды в углу утолщается, и дуга его удлиняется (рис. 1, а и б). Затем, вследствие того что дуга удлинилась, этот слой соединяется с соседним меньшим мениском большей кривизны. Тогда второй, более сильный мениск перетя-

гивает воду к себе из первого, а первый в это время — из остальной соседней с ним массы воды. Аналогичная картина наблюдается и на третьем стыке, но в общем случае несинхронно со вторым. Затем дуги трех менисков (и других соседних с данной полостью в пространстве трех измерений) объединяются в замкнутую одну кривую поверхность, стремящуюся к сферической по закону минимизации поверхностной энергии, так как эти дуги удлиняются и кривизна их уменьшается. При смыкании дуг соседних менисков ставшая замкнутой кривая сначала уплощается, слой воды по концам дуг менисков утолщается (рис. 1, в). Образовавшаяся полость может заполняться

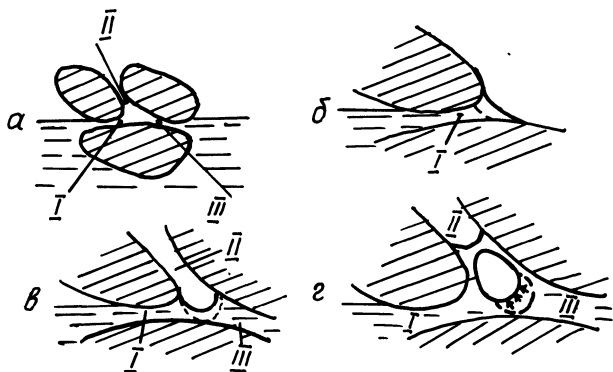


Рис. 1. Фазы образования защемленного воздуха при увлажнении образца грунта с одной стороны.

водой, если при сокращении ограничивающей ее кривой поверхности воздух выходит через одну из верхних щелей. Тогда в ней создается мениск (если он отсутствовал). Однако было обнаружено, что данный верхний мениск часто образуется раньше, чем полость начнет сокращаться. В этом случае при достаточной силе верхний мениск противодействует выталкиванию воздуха через заблокированную им щель, действуя против сил сокращения мениска общей кривой поверхности воды в полости (рис. 1, г). Объем воздуха отсекается. Появляется защемленный пузырек воздуха. В итоге установлено, что защемленный воздух в грунте может образоваться и при его увлажнении подпитыванием с одной стороны, даже если вода предварительно дегазирована.

Наблюдение на опытной установке за дальнейшим увлажнением грунта показало, что ранее образовавшиеся пузырьки воздуха создают препятствия для всасывания воды в грунт менисками, ибо возникают жаменовские цепочки. Сопротивление этих цепочек тяге менисков вызывает подсосывание воды через другие, еще не закрытые защемленным воздухом поры. Это приводит к образованию новых пузырьков по описанной выше схеме. При опытах с глинистыми грунтами было замечено, что следом за фронтом увлажнения в порах, которые сплошь заняты водой, образуются также пузырьки воздуха, хотя вода предварительно дегазирована.

Образование этих пузырьков можно объяснить следующим образом. При возрастании сопротивления движение воды за менисками фронта увлажнения сила тяги увеличивается, так как кривизна менисков зависит от сопротивления позади них. Процесс увлажнения продолжается при больших силах тяги менисков, преодолевающих сопротивление жаменовских цепочек и большое вязкостное сопротивление поровых каналов, которое обратно пропорционально пятой степени поперечного размера поры [6]. Большая сила тяги менисков в глинистых грунтах при соответствующем большом сопротивлении движению тащимой воды вызывает появление позади тянущих менисков больших разрежений. Это в свою очередь приводит к тому, что увлажненная часть скелета начинает выделять в воду газ, который всегда имеется в материале скелета. В результате создаются новые пузырьки воздуха, образующие новые жаменовские цепочки.

В тех порах, где пузырьки еще не образовались, скорость тока воды увеличивается, что приводит к росту вязкостных сил сопротивления и соответственно к образованию новых пузырьков воздуха. Таким образом, тяга менисков вызывает полное перекрытие пути воде пузырьками воздуха.

Дальнейшие наблюдения показали, что сопротивление пузырьков, перекрывающих поры, преодолеваются менисками фронта увлажнения за счет перетягивания этих пузырьков в соседние, меньшие поры, что отражено на схеме (рис. 2). Эти перемещения происходят в тех местах, где меньше количество рядов пузырьков (горизонтальных при увлажнении снизу). Затем здесь образуются все новые ряды пузырьков за продвигающимися вперед менисками, что, очевидно, вызывается возрастанием вязкостных сил. Возросшее сопротивление жаменовских цепочек продолжает преодолеваться тягой менисков фронта увлажнения грунта, ибо их кривизна здесь достигает весьма больших значений. Так, по приближенным расчетам [7], тяга мениска в этом случае может достигать $n \cdot 10^9$ Па.

К приведенным выше четырем схемам образования заземленного в глинистом грунте воздуха сводятся и другие возможные условия увлажнения грунта. Потому можно заключить, что свободная вода глинистого грунта включает многочисленные заземленные пузырьки воздуха.

Далее наблюдениями на той же установке обнаружено: когда фронт увлажнения приходится на верхнюю границу образца, т.е. после прекращения увлажнения пузырьки, образовавшиеся в грунте, стремятся занять те ближайшие большие поровые полости, в которых они меньше деформированы, т.е. в которых они ближе к сферической форме. При этом иногда происходит объединение двух и более малых пузырьков в один больший, что, очевидно, объясняется стремлением к уменьшению общей поверхностной энергии. Процесс перемещения пузырьков из меньших пор в большие происходил таким образом, как это изображено на рис. 2, но фазы этого процесса протекали в обратном порядке.

Таким образом, установлено, что в увлажненном глинистом грунте по всему объему рядом с большей порой, занятой пузырьком воздуха, находится не занятая им меньшая пора, т.е. поры грунта после его увлажнения заблокированы совокупностью пузырьков, препятствующих движению воды.

Далее наблюдения были продолжены при исследовании процесса фильт-

рации воды после увлажнения грунта. Для этого изучаемый образец подвергался действию напора воды. Фильтрация при малых градиентах напора отсутствовала. И лишь по достижении определенного градиента напора (назовем его по традиции начальным) пузырьки отжимались из больших пор в соседние мелкие поры. Отжатие происходило по той же схеме, что и при отсосе менисковой тягой при увлажнении (см. схему рис. 2, p_1 и p_2 в этом случае положительны и $p_2 > p_1$).

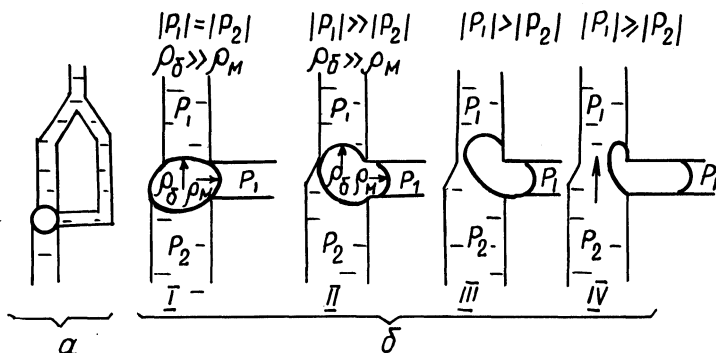


Рис. 2. а — схема элементарного участка грунта; б — фазы перемещения пузырька в соседнюю пору:
 P_1, P_2 — давления в грунтовой воде с разных сторон пузырька; ρ_δ, ρ_M — радиусы кривизны мениска соответственно в большей и меньшей порах.

Как и в вышеописанном случае, если общая поверхность нового пузырька с увеличенной площадью оказывается неустойчивой, он при отжатии дробится на несколько мелких. При небольшом падении градиента напора пузырьки стремятся на прежние места — в большие поры и перекрывают частично или полностью каналы фильтрации воды. Этот переход был обусловлен, очевидно, тем, что состояние пузырьков в меньших порах энергетически невыгодно.

Рассмотрим изображенный на рис. 2 и 3 элементарный участок грунта с водой и пузырьком с точки зрения теории автоматического управления. Каждый пузырек вместе с водой и непосредственно прилегающими к нему пора́ми и каналами является объектом управления — динамической системой [8], которая в зависимости от параметров может иметь аperiodические переходные процессы, быть способной к колебаниям или вообще работать в автоколебательном режиме. Совокупность режимов работы таких элементарных систем в грунте, очевидно, обуславливает режимы фильтрации. Соответственно параметры элементарных объектов управления (коэффициенты усиления, постоянные времени, коэффициенты демпфирования, запаздывания) будут определять значения фильтрационных параметров — начального градиента и скорости фильтрации v_ϕ на нелинейном участке кривой $v_\phi = f(i)$. Но так как параметры элементарного объекта управления обуславливаются физическими характеристиками грунта и воды (пористостью грунта, вязкостью воды и ее поверхностным натяжением и др.), появляется возможность опре-

деления фильтрационных параметров через указанные параметры элементарного объекта управления, который в этих условиях, с одной стороны, выступает как промежуточное звено между фильтрационными характеристиками грунта и, с другой — физическими параметрами грунта и воды. Это означает, что указанный объект управления является тем недостающим звеном цепи, которое позволит установить указанную выше связь.

Опишем установленный объект управления, пользуясь основными положениями теории автоматического управления. Данный объект, как следует из вышеприведенного, будет иметь чаще всего две емкости: первую (большую) поровую полость и вторую — меньшую (реже — несколько меньших, см. выше). Пузырек воздуха отжимается односторонним внешним воздействием — давлением в фильтрующей воде. Препятствуют этому перемещению

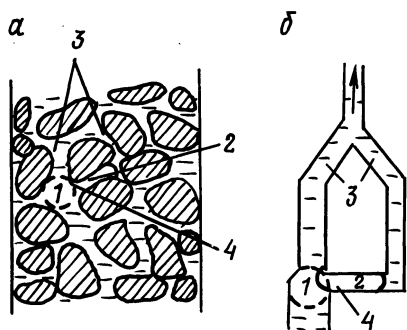


Рис. 3. Динамическая система: а — схема реальной системы; б — функциональная схема; 1 — первая емкость (большая); 2 — вторая емкость (меньшая); 3 — естественный байпас (может быть несколько параллельных); 4 — основной канал.

упругость поверхности воздушного пузырька и гидравлическое сопротивление каналов (пор) (3, рис. 3), байпасирующих эти две емкости (1, 2, рис. 3), т.е. каналов, соединяющих их параллельно основному каналу (4, рис. 3), по которому перемещается пузырек из одной емкости в другую. Из характера физических свойств жидкости вытекает, что упругость пузырька обусловливается стремлением площади поверхностного слоя к минимальному значению и проявляется при любых (быстрых и медленных) изменениях давления в воде. Из гидромеханики в свою очередь известно, что гидравлическое сопротивление байпаса тем больше, чем выше скорость перемещения воды. Поэтому его сопротивление проявляется при быстрых изменениях давления и соответственно быстрых перемещениях пузырька из одной емкости в другую и обратно.

Описанная система склонна к колебаниям [8], если:

- 1) гидравлическое сопротивление байпасирующих каналов сравнительно невелико, т.е. система незадемпфирована;
- 2) пузырек обладает достаточно большой упругостью;
- 3) названные емкости мало отличаются по объему.

Указанные требования отвечают грунтам с определенными физическими характеристиками: первое требование — глинистым грунтам с наиболее крупными поровыми каналами; второе — минимальным для пор данного грунта размерам пузырьков; третье — грунтам с малым несовпадением [5] порозности. Если указанные параметры будут близки к экстремальным зна-

чениям, система неустойчива и при малейшем возмущении внешнего давления в воде работает в автоколебательном (пульсирующем) режиме. При этом автоколебания могут принимать такой размах амплитуды, при котором пузырек не возвращается в одну из своих двух прежних емкостей, а перейдет в новую. Тогда динамика новой системы, очевидно, станет иной, так как сменяются емкости и, соответственно, байпасирующие каналы.

Если же, в отличие от предыдущего случая, глинистый грунт имеет поровые каналы минимальных сечений, а воздушные пузырьки, напротив, — максимальные размеры и большее несовпадение порозности, система будет работать устойчиво, т.е. в аperiodическом режиме, в пределе при экстремальных значениях указанных параметров — в ключевом режиме. Тогда воздушный пузырек будет работать устойчиво как упругий шаровый клапан, который полностью перекроет канал фильтрации или полностью его откроет.

В реальном грунте, очевидно, наиболее часто встречаются смешанные динамические режимы работы воздушных пузырьков, насыщающих поровое пространство образца. При этом отжатие пузырьков всегда начинается лишь по достижении определенного значения градиента напора воды, являющегося начальным, а дальнейшее увеличение скорости фильтрации зависит от указанных выше характеристик элементарной динамической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грунтоведение / Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др. — М., 1971.
2. Цытович Н.А. Механика грунтов. — М., 1979.
3. Чугаев Р.Р. Гидравлика. — Л., 1971.
4. Костюкович П.Н. Гидрогеологические основы вертикального дренажа. — Минск, 1979.
5. Качинский Н.А. Физика почвы. Ч. II. Водно-физические свойства и режимы почв. — М., 1970.
6. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. — Л., 1969.
7. Кумачев В.И. Механизм кавитационной эрозии. — В сб.: Науч. тр. БСХА, Горки, 1979, вып. 57.
8. Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. — М., 1971.