

В. В. ВЕДЕРНИКОВ

**ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЕ
СВОБОДНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

(Представлено академиком Л. С. Лейбензоном 25 XI 1946)

1. Для разрешения намеченных в работе (1) вопросов нами в 1933 г. были проведены опыты на снабженном пьезометрами-вакуумметрами лотке размерами 262×25 см, высотой 83 см, одна из длинных стен которого была заменена зеркальным стеклом. На основе этих опытов и последующего теоретического их обобщения и новых исследований были опубликованы работы (2, 3), посвященные построению физической картины свободной фильтрации.

Для дальнейшего исследования физической картины путем экспериментов в большем масштабе в 1936 г. (в лаборатории Московского гидромелиоративного института) был оборудован лоток размерами 288×50 см, высотой 180 см, снабженный пьезометрами-вакуумметрами (кроме того, в опытах применялся переносный пьезометр-вакуумметр типа пьезометра Пеннинка) и застекленный с одной стороны. Изложим основные положения*, к которым приводят наши эксперименты и теоретические исследования свободной фильтрации.

2. Опыты 1936 г. показали, что наиболее отвечает действительности классификация категорий жидкой воды (ее передвижений в жидком виде) в грунтах, данная Верслюйсом (5), которая, с учетом наблюдений в опытах 1933—36 гг., формулируется так:

1) Капиллярная вода, давление в которой меньше атмосферного в порах грунта вне зоны насыщения;

2) Грунтовая вода, давление в которой больше атмосферного в порах грунта вне зоны насыщения.

Капиллярная вода, в свою очередь, делится на три категории (сверху вниз в колонне грунта):

а) Пендулярная или разъединенная (разомкнутая) вода, задерживающаяся в наиболее узких местах пор. Передвижения ее при поступлении воды сверху, недостаточном для образования постоянных соединений между отдельными ее сосредоточениями, периодические и направлены в общем вертикально вниз, поскольку сплошной связи между отдельными ее сосредоточениями не имеется.

б) Фуникулярная вода или капиллярно-воздушная зона — вода, соединенная между собой непрерывно (в виде сетки). Но также непрерывно соединены между собой поры, за отдельными исключениями занятые воздухом, давление которого поэтому мало отличается от атмосферного. Образуется, главным образом, при промачивании сверху.

* На необходимость опубликования их указал нам Ф. П. Саваренский.

В фуникулярной воде, в силу ее непрерывности, давление, измеряемое высотой p/γ , передается от одной части воды к другой путем изменения кривизны ее поверхности в порах, и поэтому фуникулярная вода передвигается в сторону меньшего напора $H_2 = z + p/\gamma$ (удельной энергии) как от большей влажности к меньшей, так и от меньшей к большей.

Вакуумметры в капиллярно-воздушной зоне, осуществляемые по простой связи грунт — вода вакуумметра, не работают (так же как и в пендулярной зоне), поскольку в них поступает воздух из пор грунта. Отсчет давления возможен при помещении между грунтом и водой вакуумметра фильтрующей прокладки, для материала которой высота капиллярного насыщения больше, чем высота вакуума в данной точке фуникулярной воды. Влажность, «проницаемость» и давление воды между собой связаны, причем эта связь нарушается явлением гистерезиса Haines'a.

Скорость распространения (или передачи) изменений давления (напряжения в жидкости) в фуникулярной воде существенно отличается от скорости распространения изменений давления в зонах капиллярного насыщения и грунтовой воды (где она равна скорости распространения гидравлического удара или звука в среде вода — грунт — заземленный воздух). В фуникулярной воде она равна скорости продвижения волны изменения кривизны поверхности этой воды в порах в связи с поступлением или отдачей влаги и, следовательно, зависит от начальной влажности грунта и сравнима со скоростью продвижения самой фуникулярной воды*.

в) Зона капиллярного насыщения отличается от фуникулярной тем, что воздух, если он имеется в этой зоне (как и в грунтовой воде), «заземлен», поэтому давление в нем (вакуум) равно давлению воды в этой зоне. Вакуумметры поэтому работают (при предварительной их зарядке). Движение происходит в сторону меньших напоров H_p .

3. Движение капиллярной воды и грунтовой воды представляет одно нераздельное целое, подчиняющееся одним и тем же общим силам. Движение воды в капиллярной зоне отличается от движения в зоне грунтовой воды знаком давления по отношению к атмосферному и уменьшением «скоростей фильтрации» вследствие изменения влажности и давления по высоте зоны (2, 3).

Указанная целостность потока нарушается при неустановившемся движении, так как неустановившееся движение фуникулярной воды сопровождается появлением границы — фронта волны изменения кривизны поверхности воды в порах грунта, перемещающегося в сторону нарушаемого волной движения. Медленность передвижения фуникулярной воды приводит к сосуществованию в различных областях капиллярно-воздушной зоны грунта различных направлений движения и различных видов этих волн (волн увеличения и уменьшения влажности), разделенных указанными передвигающимися границами.

Движение в пендулярной зоне имеет указанный выше характер и поэтому не представляет одного нераздельного целого.

* А. Ф. Лебедев (6) вместо понятия фуникулярной воды вводил понятие «пленочная вода» и определял ее, в отличие от изложенного, как воду, которая передвигается только от более влажного грунта к менее влажному, причем сила тяжести не оказывает влияния на ее движение и давление в ней отсутствует. Рассмотрение других классификаций дано ранее (7).

Опыты Лебедева с раствором хлористого лития говорят не об отсутствии передачи давления в фуникулярной воде, а о наличии определенных выше особенностей скорости передачи давления в этой воде.

Высокие колонны Кинга, а также Лебедева (при учете влияния плотности набивки отдельных слоев) дают оценку зависимости влажности в фуникулярной зоне от высоты над уровнем грунтовых вод, а следовательно, от давления жидкости.

4. Результаты наших опытов полностью подтвердили схемы, данные ранее (2, 3), и позволяют дать их дальнейшее развитие.

В зависимости от размеров канала и глубины залегания дренирующего слоя, капиллярные свойства которого ничтожны по сравнению со свойствами подстилаемого им грунта, физическая схема (рис. 1, а) зависит от относительной по отношению к размерам канала глубины залегания дренирующего слоя.

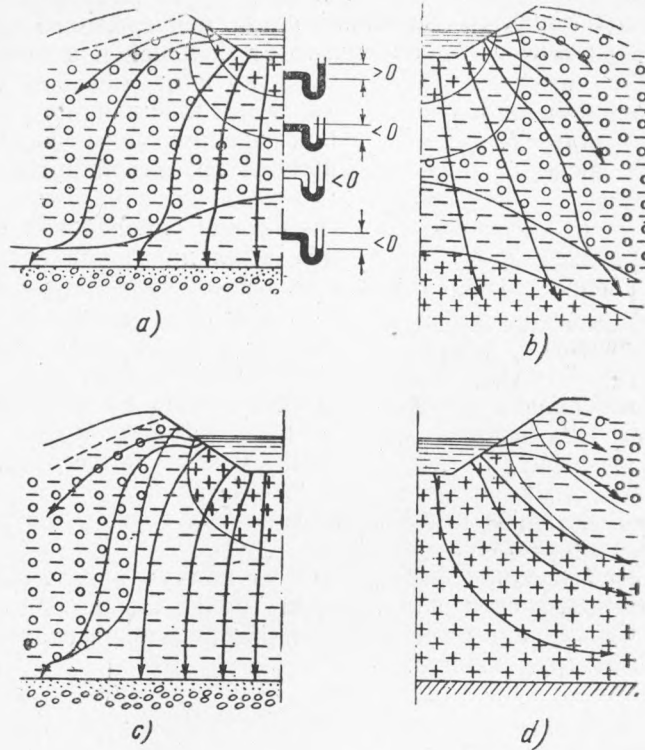


Рис. 1

На рис. 1 представлены схемы для случаев, когда канал прорыт в ранее имевшейся капиллярно-воздушной зоне или немного выше ее. При фильтрации из малого канала наблюдаются все три зоны*. Под периметром канала зона грунтовой воды, затем зона капиллярного насыщения и ниже капиллярно-воздушная зона. Еще ниже давление в капиллярной воде возрастает и опять появляется зона капиллярного насыщения. Такой ход смены зон, отвечающий ранее нами данному, еще более наглядно виден на рис. 1, b, где показана схема фильтрации из небольшого канала при наличии на достаточно большой глубине в этом же грунте грунтовых вод, и поэтому смена зон сверху вниз оканчивается зоной грунтовой воды.

При увеличении глубины воды в канале или при более близком залегании дренирующего слоя или грунтовых вод между верхней и нижней зонами капиллярного насыщения зоны капиллярно-воздушной не будет, и верхняя и нижняя зоны капиллярного насыщения сливаются в одну, как показано на рис. 1, c (для случая подстилания дре-

* Зона грунтовой воды обозначена +, поскольку давление в ней больше атмосферного. Зона капиллярного насыщения —, поскольку давление в ней меньше атмосферного, а капиллярно-воздушная зона — и ○, поскольку давление воды в ней меньше атмосферного, а давление воздуха следует за давлением атмосферным или равно ему.

нирующим слоем). Наконец, при еще более близком залегании грунтовых вод (или высоком поднятии их от фильтрации¹ из каналов) уже под каналом будет отсутствовать оставшаяся в предыдущем случае зона капиллярного насыщения; зона грунтовой воды под каналом и зона нижней грунтовой воды сливаются в одну зону, а капиллярные зоны остаются лишь по бокам канала, над депрессионной линией, как показано на рис. 1, d.

5. Наличие фуникулярной зоны и под дном канала и определившийся в опытах характер сплошного или непрерывного движения в ней в сторону меньшего H_p не только от большей влажности к меньшей, но и от меньшей к большей

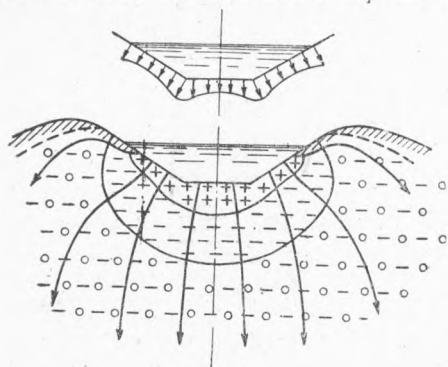


Рис. 2.

(к зоне капиллярного насыщения над дренирующим слоем или над нижней грунтовой водой) только и можно объяснить, исходя из указанного выше определения фуникулярной воды и условий ее передвижения. Способ определения зон ясен из рис. 1, a, где показана схема работы пьезометров ($h_p = (p - p_a) / \gamma' > 0$), вакуумметров ($h_p < 0$) и отсутствие отсчетов по обычным вакуумметрам в фуникулярной зоне. Граница между фуникулярной зоной и зоной капиллярного насыщения

легко наблюдается через стекло, так как зона грунта с фуникулярной водой значительно светлее.

6. Физическая картина фильтрации из канала при глубоком залегании дренирующего слоя или зеркала грунтовых вод представлена на рис. 2*. Сверху дана наша эпюра распределения скоростей фильтрации по периметру канала.

Секция водохозяйственных проблем
Академии Наук СССР

Поступило
18 III 1946

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. В. Ведерников, Фильтрация из каналов, 1932, стр. 67. ² Его же, Еидротехническое строительство, № 5 (1935). ³ Его же, ДАН, 3 (12), № 4 (1936); Его же, ДАН, 28, № 5 (1940). ⁴ F. Versluys, Intern. Mitt. Bodenkunde, 7, (1917). ⁵ А. Ф. Лебедев, Почвенные и грунтовые воды, 1936. ⁶ В. В. Ведерников, Иригация и гидротехника, № 5 (1936).

ПОПРАВКА

В статье автора, папечатанной в ДАН, 52, № 3 (1946), формулу (6) следует читать в виде

$$\frac{M(1+\beta)U}{p(W-U)} + \frac{U}{g_{if}} \frac{1}{2pF} \frac{dF}{ds} \left[(12U - 3W) + (5W - 4U) \frac{F}{B} \frac{dB}{dF} \right] \Big|_{<}^> = 1.$$

* В одной и той же горизонтальной плоскости кривизна менисков в порах фуникулярной зоны под каналом будет меньше кривизны менисков в пендулярной зоне (или фуникулярной зоне) вне фильтрационного потока. Поэтому возможно передвижение, в соответствии с уравнением Томсона (Кельвина) для давления паров на изогнутой поверхности воды, парообразной воды из фуникулярной зоны фильтрации в стороны за счет энергии фильтрационного потока.