

УДК 536.338

## О ПОВЫШЕНИИ ИНФОРМАТИВНОСТИ ОПЫТОВ ПО НАЛИВУ ВОДЫ В ШУРФЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ЗОНЫ АЭРАЦИИ

Е.К.УЧАЕВ

Наливы в шурфы на протяжении длительного времени остаются основным методом оценки проницаемости горных пород в зоне аэрации. Техника проведения и интерпретации наливов подробно описана в литературе [1, 2, 6]. При этом неоднократно отмечалось, что по ряду причин, в основном из-за сложности реальной картины фильтрации вблизи шурфа, результаты наливов часто резко искажают значения коэффициента фильтрации, особенно при опробовании наливом слабопроницаемых отложений.

На результаты опытных наливов существенно влияют следующие факторы, при стандартных экспериментах не учитываемые вовсе или принимаемые во внимание лишь частично:

- 1) боковое растекание наливаемой воды;
- 2) неполное водонасыщение порового пространства горных пород в процессе налива;
- 3) капиллярные эффекты, или, наоборот, подпор вблизи фронта прорасщивания воды;
- 4) диффузионные эффекты.

Отметим, что все эти факторы проявляются в наибольшей степени при проведении экспериментов на слабопроницаемых или неоднородных (слоистого строения) горных породах. Рассмотрим их влияние более подробно.

I. Боковое растекание обусловлено гидродинамическими силами и капиллярными эффектами. В однородных грунтах оно может, в принципе, быть учтено в рамках априорных теоретических построений: соответствующая расчетная схема и методики интерпретации наливов предложены, например, Н.К. Гиринским [3]. Трудность ее реализации связана с необходимостью независимой оценки капиллярных эффектов на фронте растекания.

Дополнительные искажения в оценку бокового растекания вносят диффузионные эффекты. Более важно, однако, что эффекты бокового растекания могут быть многократно усилены слоистостью и фильтрационной неоднородностью испытуемых отложений. В такой ситуации влияние бокового растекания может быть устранено лишь на основе прямых наблюдений. Можно также попытаться

снизить это влияние многократным увеличением размеров площади налива, хотя и этот подход может привести к успеху лишь при не слишком ярко выраженной фильтрационной неоднородности.

2. Неполное водонасыщение в пределах зоны увлажнения может быть обусловлено фильтрационной неоднородностью, в частности связанной с образованием по ходу опыта слабопроницаемой зоны в дне шурфа; трудностью вытеснения воздуха из-под шурфа; недостаточной длительностью опыта, особенно в условиях неоднородных пород, когда водой успевают заполниться только наиболее крупные водопроводящие поры, а насыщение более мелких пор продолжается в течение всего эксперимента.

В однородных породах неполное насыщение может быть ориентировочно учтено на основе контрольных определений влажности пород в зоне увлажнения. В слоистых породах при производстве достаточно длительных опытов наиболее слабопроницаемые слои оказываются обычно в водонасыщенном состоянии. Поэтому при наличии точечных пьезометров в зоне увлажнения, позволяющих определить истинное значение градиента, и с помощью количественного учета величины бокового растекания может быть найдена проницаемость этих слоев. Влияние временного фактора может быть устранено или ограничено лишь увеличением продолжительности эксперимента.

3. Неполный учет капиллярных эффектов вблизи фронта просачивания приводит, обычно, к занижению расчетного градиента. Аналогичные эффекты имеют место и на боковых границах зоны увлажнения. При наливе в сухие породы эти эффекты можно учесть, используя расчетную высоту капиллярного замачивания. В общем случае для интерпретации налива необходима опытная кривая зависимости всасывающего давления от влажности или результаты прямых замеров всасывающего давления на фронте увлажнения. Значение капиллярных эффектов убывает с ростом зоны увлажнения (продолжительности эксперимента).

4. Диффузионные эффекты приводят к «размыванию» фронта увлажнения как на нижней, так и на боковых границах. Роль их в целом растет с падением проницаемости, но для гетерогенных пород они могут иметь определяющее значение и при высоких коэффициентах фильтрации. Увеличение продолжительности и площади эксперимента способствует снижению роли диффузионных эффектов.

Перечисленные факторы требуют довольно внимательного подхода к результатам экспериментов. В частности, из стандартных методов интерпретации результатов наливов достаточно хорошо зарекомендовала себя только методика Н.К.Гиринского, да и то лишь для однородных, достаточно хорошо проницаемых (песчано-гравелистых или в крайнем случае супесчаных) пород, на что указывал и сам автор. В иных условиях рассчитывать на достаточную надежность экспериментов можно лишь при соблюдении следующих требований:

1) прямое прослеживание фронта увлажнения или достижение при опыте стационарного режима;

2) прямое определение зависимости всасывающего давления от влажности или достижение условий, когда роль капиллярных эффектов на фронте увлажнения пренебрежимо мала; прямое определение давления в отдельных точках, расположенных по высоте зоны увлажнения;

3) контроль за изменением влажности пород в процессе опыта или обеспечение такой продолжительности опыта, при которой заведомо достигается стационарное распределение влажности в пределах зоны увлажнения (в этом случае можно ограничиться контрольными определениями влажности после опыта);

4) достижение в эксперименте режима, исключавшего существенное влияние диффузионных эффектов, что в слабопроницаемых породах реально может быть обеспечено только выходом на стационарный режим эксперимента;

5) установка контрольно-измерительной аппаратуры не должна вносить серьезных искажений в ход эксперимента.

В связи с невыполнением большинства перечисленных требований при стандартных наливах последние за редким исключением могут рассматриваться лишь как метод качественного сравнения проницаемости на отдельных участках опробуемой площади, — да и то при условии проведения однотипных опытов. Удовлетворение упомянутых требований к опытным наливам связано с резким увеличением масштабов, продолжительности и трудоемкости эксперимента, что в конечном счете ведет к его существенному удорожанию.

Проиллюстрируем значение некоторых из рассмотренных осложняющих факторов на конкретном примере. В районе расположения хвостохранилища Лебединского горно-обогатительного комбината (Курская магнитная аномалия) нами был проведен ряд наливов в лессовидные суглинки четвертичного возраста с параллельной оценкой скорости и конфигурации потока влаги под шурфом различными методами. Первоначально налив проводился в лессовидные суглинки нарушенного сложения, используемые обычно для экранирования наиболее проницаемых участков ложа хвостохранилища. Целью эксперимента было, с одной стороны, определение проницаемости такого экрана, а с другой — нахождение погрешностей, свойственных стандартным методам оценки проницаемости подобных грунтов.

Прямоугольный в плане шурф площадью  $26 \text{ м}^2$  и глубиной  $0,3 \text{ м}$  был пройден в специально отсыпанном и утрамбованном слое суглинков мощностью  $0,8\text{--}1,2 \text{ м}$  (рис. I). Для облегчения последующего учета бокового растекания воды суглинков отсыпался на слой среднезернистого песка толщиной  $0,1\text{--}0,2 \text{ м}$ ,

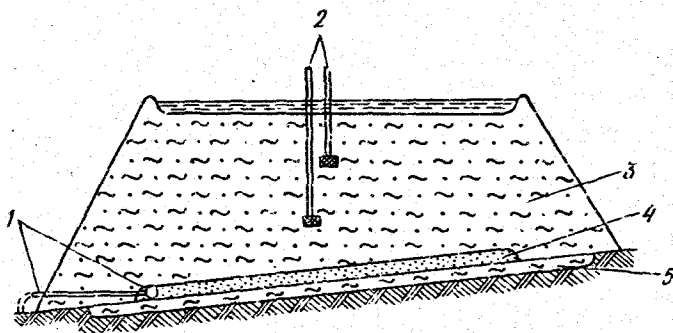


Рис. I. Схема проведения крупномасштабного налива в суглинках искусственного сложения  
1 — дренаж; 2 — точечные пьезометры; 3 — суглинки;  
4 — песчаная „подушка“; 5 — слой перемытой глины

который, в свою очередь, был отделен от естественного основания слоем водонепроницаемой перемытой глины. В наиболее низкой части слоя песка был уложен трубчатый дренаж, по производительности которого можно было судить о вертикальной составляющей инфильтрационного расхода. Для определения градиента инфильтрации на различных глубинах были установлены точечные пьезометры.

Первоначально был произведен налив в большой шурф, а затем, по истечении 5 дней после окончания опыта, в четырех углах этого шурфа и в его центре было выполнено пять стандартных наливов (по методу Н.К.Гиринского). Наливы велись до стабилизации инфильтрационного расхода и уровней в пьезометрах. Продолжительность крупномасштабного налива составила 4 суток, а стандартных -- по 2 суток. Коэффициенты фильтрации суглинка определялись тремя способами: практически точным балансовым методом с учетом именно вертикальной составляющей скорости инфильтрации; по скорости понижения уровня воды в шурфе (в обоих случаях учитывалось испарение и градиент фильтрации, но в последнем -- не учитывалось боковое растекание) и стандартными наливками в кольца диаметром 40 см по методу Н.К.Гиринского. В последнем случае величина коэффициента  $\alpha$ , учитывающего боковое растекание, значение высоты капиллярного поднятия в суглинках согласно рекомендациям [1] принималось равным 0,6 м.

Крупномасштабный налив велся в условиях полного насыщения, а стандартные -- при неполном. Однако поскольку разница водонасыщенности суглинков в обоих случаях составила всего 3 %, это обстоятельство мало сказалось на результатах эксперимента:

Метод определения	Коэффициент фильтрации без учета (с учетом) бокового растекания, м/сутки
Балансовый	0,13 (0,11)
Стандартный в опытах	
1-м	0,053 (0,006)
2-м	0,22 (0,025)
3-м	0,097 (0,011)
4-м	0,055 (0,0033)
5-м	0,057 (0,0065)

Анализ результатов определения коэффициента фильтрации различными методами показал, что разброс значений даже в пределах небольшого по размерам участка и в условиях достаточно однородного испытуемого грунта достаточно велик. Кроме того, среднее значение коэффициента фильтрации, полученное стандартными методами, примерно на порядок меньше истинного.

Одной из главных причин значительного разброса, и, вместе с тем, недопустимого занижения проницаемости, полученной по данным стандартных наливов, является недостаточно надежный учет бокового растекания, рекомендуемый соответствующими методиками. В частности, известная формула Н.К.Гиринского для расчета поправки на боковое растекание получена для условий сухой однородной среды, влажность которой не должна превышать нескольких процентов; на практике, особенно когда мы имеем дело со слабопроницаемыми породами, это условие часто не выполняется. По-видимому, и в нашем примере высокая влажность пород (30-32 %) послужила причиной переоценки влияния бокового растекания на результаты опыта. Кстати говоря, значение коэффициента фильтрации, рассчитанное по данным тех же наливов, но без учета бокового растекания, составило 0,095 м/сутки, т.е. оно довольно близко к истинному; последнее обстоятельство объясняется благоприятными условиями, имевшими место в рассматриваемом эксперименте.

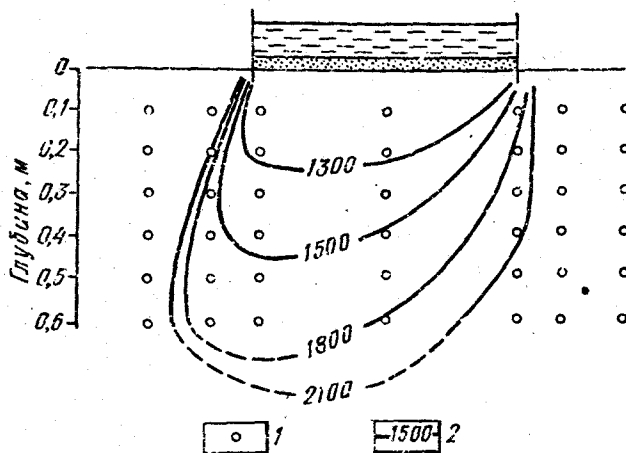


Рис. 2. Результаты наблюдений за растеканием индикатора-электролита

1 - точки наблюдения за электрическим сопротивлением породы; 2 - изолинии равных электрических сопротивлений

была примерно на порядок выше, чем у воды. Опыт продолжался до тех пор, пока, согласно оценочным расчетам, раствор индикатора не достиг глубины 1 м; затем налив прекращался, в грунт задавливался специальный зонд с двумя электродами на конце и на различных глубинах определялось электрическое сопротивление суглинков между двумя электродами.

Так как электрическое сопротивление влагосодержащей породы при постоянной влажности определяется минерализацией внутрипоровой влаги, то с помощью проведенного зондирования оказалось возможным оконтурить зону распространения индикатора. Отметим, что результаты наблюдений (рис. 2) свидетельствуют о крайне незначительном боковом растекании в пределах исследованной глубины (0,6 м). Некоторое отклонение "соленого" тела в сторону понижения рельефа вызвано, очевидно, слоистостью суглинка.

Ясно, что в связи с возможным слоистым строением опробуемой толщи, наряду с размерами зоны бокового растекания необходимо также знать и скорости переноса индикатора в вертикальном направлении. В то же время (рис. 2) однократное зондирование не позволяет уверенно определить даже среднюю действительную скорость влагопереноса из-за значительного размывания границы "соленого" тела, вызванного диффузионными эффектами. Многократное зондирование в ходе налива недопустимо, так как связано с нарушением естественного сложения породы.

Обычно для оценки вертикальной скорости влагопереноса и для оконтуривания границы бокового растекания предлагается использовать нейтронный индикатор влажности (НИВ) [4], позволяющий вести наблюдения за динамикой перераспределения влажности, не нарушая естественного сложения грунта. При этом оценка скоростей влагопереноса в различных сечениях производится на основании сопоставления эпюр распределения влажности на различные моменты времени. Положительный эффект от применения НИВов отечественной

Для прямого наблюдения за величиной бокового растекания в тех же суглинках естественного сложения при наливе был использован индикатор - раствор поваренной соли концентрацией 10 г/л. При этом первоначально опыт велся с обычной водой по стандартной методике, а после достижения постоянного расхода налива пресная вода в кольцо заменялась соленой, причем электропроводность индикаторного раствора

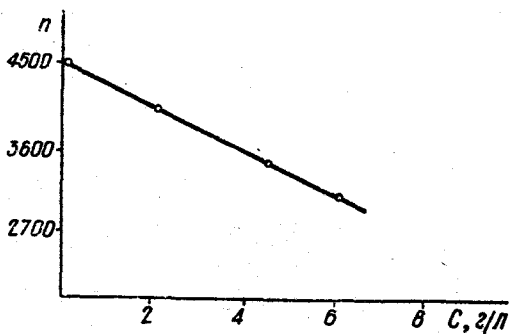


Рис.3. График зависимости скорости счета прибора НИВ от весовой концентрации бора в растворе  $C$ , окружающем датчик  
 $n$  - количество импульсов в минуту

абсолютная погрешность определения влажности будет соизмерима с величиной изменения влажности грунтов в ходе опыта.

В связи с этим нами был опробован иной метод, основанный на наличии у молекул ряда элементов, в том числе бора, повышенной способности поглощать тепловые нейтроны [5]. В результате, при попадании меченой жидкости в зону действия датчика НИВа, количество регистрируемых прибором импульсов заметно снижается, несмотря на то, что влажность среды остается неизменной (рис.3). В качестве индикатора нами использовался 3-5-процентный раствор борной кислоты.

Этот метод оказался наиболее удобным для определения при наливе действительной скорости фильтрации в вертикальном направлении. В соответствии с известными положениями теории миграции в качестве действительной скорости фильтрации можно принимать скорость продвижения изолинии, отвечающей относительной концентрации 50 % (отношение текущей концентрации индикатора к максимальной) при непрерывном запуске индикатора и скорость продвижения максимальной концентрации индикатора при его пакетном запуске. Дополнительное преимущество НИВа связано с тем, что с помощью НИВа определяется осредненное содержание трассера в объеме породы сферической формы диаметром 20-30 см.

Практическое применение "борной метки" в качестве индикатора при наливе в суглинки естественного сложения, дало вполне удовлетворительные результаты. Как видно из графиков (рис.4), продвижение борной метки довольно четко прослеживается до глубины 80 см, дальнейшего продвижения ее вниз не наблюдалось. При последующем наливе обычной воды концентрация индикатора в верхней зоне стала падать до тех пор, пока показания НИВа не достигли фоновых. Последнее, по-видимому, связано с оттоком раствора индикатора в боковом направлении, что свидетельствует о наличии на глубине 0,9-1 м прослоя, обладающего значительно меньшей проницаемостью по сравнению с вышележащей толщей. Кроме того, отсутствие четко выраженного переднего фронта продвижения индикатора также свидетельствует о значительной роли диффузионных эффектов при процессах массопереноса в породах данного типа.

конструкции достигается обычно в тех случаях, когда исходная объемная влажность испытуемых пород не превышает 15-20 %.

Принимая во внимание, что влажность слабопроницаемых пород зоны аэрации зачастую уже на глубине несколько десятков сантиметров оказывается довольно высокой (более 20 %), возможности применения указанной методики испытаний в этом случае ограничены, поскольку абсо-

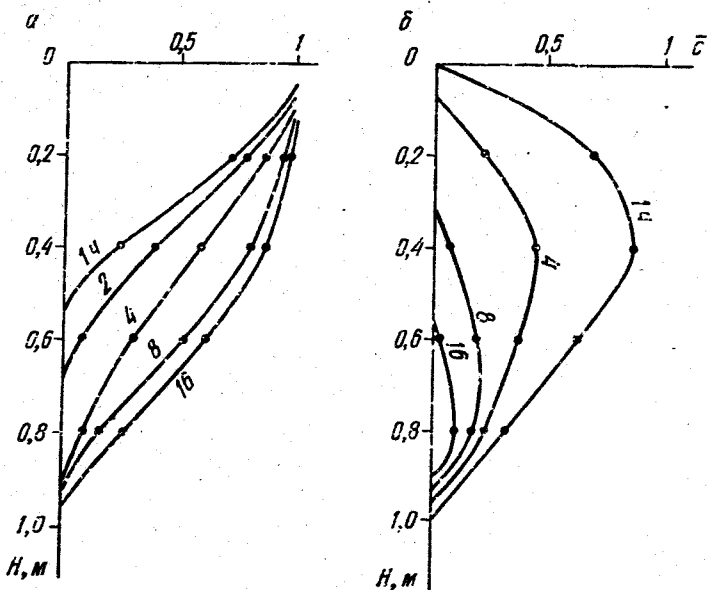


Рис.4. График продвижения борной метки в породе в процессе налива:  
 а - налив раствора борной кислоты; б - вытеснение раствора борной кислоты водой  
 $\bar{c}$  - относительная концентрация

В заключе-  
 ние еще раз под-  
 черкнем, что наливы как метод  
 опробования сла-  
 бопроницаемых  
 отложений обла-  
 дают в принятой  
 в настоящее вре-  
 мя стандартной  
 модификации ря-  
 дом существенных  
 недостатков,  
 связанных с влия-  
 нием трудно учи-  
 тываемых ослож-  
 няющих факторов.  
 Основными из них  
 обычно является  
 боковое растека-  
 ние, вызванное  
 слоистым строе-

нием грунтов, и диффузионные эффекты, обусловленные гетерогенной про-  
 ницаемостью и емкостью. Для достаточного обоснования интерпретации налива  
 необходимо, чтобы все эти факторы нашли соответствующее отражение в прини-  
 маемой расчетной схеме.

Существенное улучшение ситуации достигается при проведении крупномас-  
 штабных и достаточно длительных наливов. Недостающие исходные данные для  
 построения адекватной расчетной модели можно получить, применяя индика-  
 торные методы, которые позволяют выявить конфигурацию потока влаги и опре-  
 делить его скорости на различных глубинах. Сопутствующие этому осложнения  
 в методике подготовки и проведения наливов безусловно снижают круг их при-  
 менения как массового и недорогого вида полевых определений фильтрационных  
 параметров пород зоны аэрации, но в то же время резко повышают достовер-  
 ность полученных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ансберг Е.А., В.П.Боровицкий, Ш.Ф.Бути, В.С.Самарина. Практикум по об-  
 щей гидрогеологии. Л., Изд-во ЛГУ, 1965. 252 с.
2. Барон В.А. Методические рекомендации по прогнозу режима, уровня и минерализа-  
 ции грунтовых вод в условиях орошения. М., изд. ВСЕГИНГЕО, 1973. 103 с.
3. Гирицкий Н.Е. Определение коэффициента фильтрации песков и супесей по данным  
 налива в шурфы. - В кн.: Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. М., Гостеолтехиздат,  
 1953, с. 28-31.

4. Гиршкoн С.А. Исследование динамики фильтрационного потока с помощью нейтронного индикатора влажности. - Гидротехника и мелиорация, 1964, № 9, с. 26-34.

5. Смородинов М.И., Волков А.Е. Некоторые вопросы применения нейтронного индикатора влажности для определения параметров фильтрации грунтовых вод. - В кн.: Радиоизотопные методы исследований в гидрогеологии. Киев, Наукова думка, 1975, с. 144-147.

6. Биндеман Н.Н. Определение проницаемости горных пород методом инфильтрации при неустановившемся движении. - Разведка и охрана недр, 1957, № 10, с. 41-46.