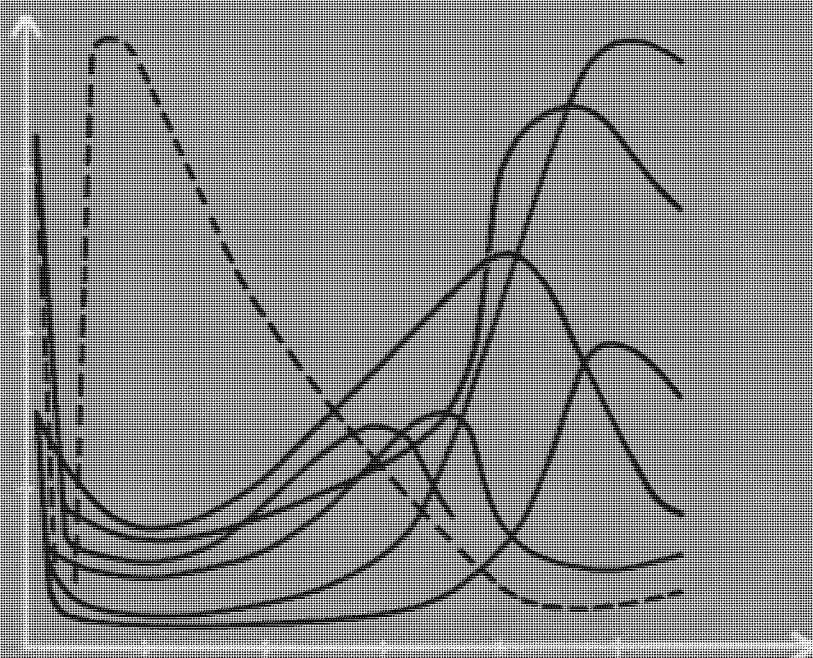


Н.Е. ДЗЕКУНОВ И.Е. ЖЕРНОВ Б.А. ФАЙБИШЕНКО

ТЕРМО- ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА ЗОНЫ АЭРАЦИИ



Н.Е. ДЗЕКУНОВ И.Е. ЖЕРНОВ Б.А. ФАЙБИШЕНКО

**ТЕРМО-
ДИНАМИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ
ИЗУЧЕНИЯ
ВОДНОГО РЕЖИМА
ЗОНЫ АЭРАЦИИ**



МОСКВА «НЕДРА» 1987

Дзекунов Н.Е., Жернов И.Е., Файбишенко Б.А. Термодинамические методы изучения водного режима зоны аэрации. — М.: Недра, 1987. — 176 с., ил.

Освещены вопросы влагопереноса в породах зоны аэрации. Приведены оригинальные методы полевых наблюдений и определения гидрофизических параметров пород зоны аэрации в полевых и лабораторных условиях. Рассмотрены способы определения потоков влаги и инфильтрационного питания грунтовых вод по данным полевых режимных наблюдений. Даны рекомендации по проведению исследований водного режима зоны аэрации в различных условиях на объектах мелиорации, гидротехнического строительства, искусственного пополнения подземных вод и на застроенных территориях.

Для специалистов, занимающихся проблемами баланса и режима подземных вод.

Табл. 7, ил. 69, список лит. — 34 назв.

Рецензент: *И.С. Пашковский*, д-р геол.-минер. наук (Центральная инженерно-геологическая и гидрогеологическая экспедиция ПГО "Центргеология" Министерства геологии РСФСР).

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Николай Ефимович Дзекунов
Игорь Евгеньевич Жернов
Борис Александрович Файбишенко

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА ЗОНЫ АЭРАЦИИ

Редактор издательства *О.Л. Виноградова*
Обложка художника *В.П. Христинина*
Художественный редактор *В.В. Шутько*
Технический редактор *Н.С. Анашкина*
Корректоры *М.Е. Лукина, Т.М. Столярова*
Оператор *Е.Р. Левочкина*
ИБ № 5914

Подписано в печать 27.02.87.	Т — 01670.	Формат 60 x 84 1/16.
Бумага офсетная № 1.	Набор выполнен на наборно-пишущей машине.	
Гарнитура "Универс",	Печать офсетная.	Усл. печ. л. 10,23.
Усл. кр.-отт. 10,58.	Уч.-изд. л. 11,97.	Тираж 1840 экз.
Заказ 2133/603 — 4	Цена 70 коп.	

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра",
125047, Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Московская типография № 9 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
109033, Москва Ж-33, Волочаевская, 40.

ВВЕДЕНИЕ

Разработанная XXVII съездом КПСС стратегия ускорения социально-экономического развития страны к числу важнейших задач относит дальнейшее развитие агропромышленного комплекса, в частности повышение эффективности использования орошаемых земель. Проблема оценки и рационального использования водных ресурсов, взаимосвязи подземных, поверхностных и атмосферных вод приобретает особую остроту при обеспечении водой гидромелиоративных объектов.

Среди гидрогеологических аспектов этой проблемы в связи со все возрастающим техногенным воздействием на подземные воды огромное значение приобретает изучение водно-солевого режима и баланса грунтовых вод, особенно режима и баланса влаги и солей в зоне аэрации, через которую осуществляется связь поверхностных вод с грунтовыми. Между тем изучение процессов, протекающих в зоне аэрации, долгое время сводилось в гидрогеологии к оценке величин площадного питания грунтовых вод, а выяснению условий и закономерностей переноса влаги и вещества уделялось недостаточное внимание.

Широко применяемые на практике гидродинамический и экспериментальный лизиметрический методы дают лишь ограниченную информацию о инфильтрации осадков на поверхность грунтовых вод, расходе воды с поверхности грунтовых вод на эвапотранспирацию и о их разности, которая представляет собой величину площадного (инфильтрационного) питания за определенный период времени. Оба метода требуют значительных материальных затрат на оборудование специальных устройств (наблюдательная сеть скважин, лизиметры), но не дают информации о процессах переноса влаги в зоне аэрации, а лишь фиксируют окончательный их результат.

Метод водного баланса, основанный на установлении приходных и расходных статей баланса, недостаточно точен и информативен. В частности, изучение водного режима осуществляется путем периодического определения влажности грунтов, расчета влагосодержания отдельных слоев грунта и оценки на основании балансовых расчетов тенденций перемещения влаги. Для выяснения влажности грунтов применяют весьма трудоемкий термостатно-весовой метод или различные косвенные методы. В связи с этим появилась необходимость в усовершенствовании режимно-балансовых наблюдений на основе применения тензиометрического метода определения влажности грунтов с помощью тензиометров — простых, недорогих и удобных в работе приборов, которыми измеряют давление влаги в почве. Оценка давления влаги как энергетического показателя позволяет устанавливать количество, состояние и условия передвижения влаги в почве. Применение тензиометров [8, 14, 23, 28] на практике и в научных исследованиях при изучении условий

передвижения влаги в почвах, определении влажности почвы и диагностировании полива растений получило широкое распространение на практике.

Процессы передвижения влаги в ненасыщенных средах имели достаточно строгое физическое и математическое обоснование. Большой вклад в развитие этого направления внесли советские специалисты, которые углубили и расширили математическую теорию влагопереноса в ненасыщенных грунтах.

Таким образом, существовали предпосылки, необходимые для развития нового направления в исследованиях водного режима, имелись обоснованная теория и принципы создания аппаратуры для проведения опытов, правда в лабораторных условиях и только в почвенном слое. Требовалось разработать метод изучения водного режима грунтов зоны аэрации, который позволил бы производить измерения в полевых условиях и на глубинах до десятков метров (в соответствии с мощностью зоны аэрации), т. е. обеспечивал получение информации, нужной не только для изучения водного баланса и закономерностей передвижения влаги, но и для управления водным режимом и его прогнозирования.

В настоящее время можно считать, что основы этого метода, получившего название гидрофизического, уже разработаны и целесообразность его применения в комплексе с существующими методами изучения водно-солевого режима и баланса грунтовых вод сомнений не вызывает. Гидрофизический метод — комплексный. В его использовании намечается несколько направлений.

1. Проведение полевых режимных наблюдений для получения информации о водно-солевом режиме и балансе зоны аэрации в целом. Эти наблюдения, основанные на использовании тензиометров, которые фиксируют всасывающее давление влаги, начиная с 1972 г., проводили на участках с различными климатическими и гидрогеологическими условиями при разных способах увлажнения грунтов зоны аэрации. Вначале применяли серийные тензиометры [8], которые в процессе проведения наблюдений совершенствовались. В результате была создана серия приборов и устройств, применение которых обеспечило получение необходимой информации в условиях орошаемых и осушаемых земель (см. гл. 2).

2. Определение параметров влагопереноса, которые являются коэффициентами уравнений влагопереноса в ненасыщенных грунтах. При проведении наблюдений было установлено, что образование пузырьков заземленного воздуха в грунтах при подъеме поверхности грунтовых вод (квазинасыщенное состояние грунтов) существенно изменяет их водопроницаемость. Поэтому потребовалась разработка эффективного метода определения коэффициента фильтрации в квазинасыщенных грунтах зоны аэрации с учетом заземленного воздуха (см. гл. 3).

Значительные трудности представляет определение параметров влагопереноса, поскольку они связаны с всасывающим давлением

сложными нелинейными зависимостями. Эти зависимости также не являются однозначными, обладают гистерезисом, т. е. приобретают различный вид при уменьшении (иссушении) и увеличении (увлажнении) влажности грунта. Был разработан комплексный экспрессный метод определения параметров влагопереноса, который уже несколько лет успешно применяется на практике (см. гл. 4).

3. Обработка получаемых при наблюдениях данных, при использовании параметров влагопереноса и фильтрации (см. гл. 2), на основе математического описания процессов (см. гл. 5). В результате такой обработки получают информацию (для любого момента периода, на протяжении которого проводили наблюдения) о направлении движения влаги в любом сечении зоны аэрации и в фильтрационном потоке, о влажности грунтов в любом сечении зоны аэрации, о запасах влаги в конкретном интервале разреза этой зоны, о положении уровня грунтовых вод и верховодки, о вертикальном или горизонтальном расходах потока влаги в любом сечении, о величине поступления воды на уровень грунтовых вод из зоны аэрации или расхода с уровня грунтовых вод на насыщение грунтов этой зоны и испарение.

В частности, анализ обширных данных, полученных в результате использования гидрофизического метода, позволил установить некоторые важные закономерности формирования водного режима на орошаемых землях (см. гл. 2). Есть все основания рекомендовать внедрение этого метода во всех случаях, когда необходимо изучение связей поверхностных и грунтовых вод (см. гл. 7).

В заключение необходимо отметить, что почвы и грунты — это открытая термодинамическая система. Ключевым понятием термодинамики является энтропия, оценка которой позволяет всесторонне охарактеризовать сингенетические закономерности влагопереноса в грунтах [30]. Следует иметь также в виду, что цель проведения любых физических измерений — это получение информации об изучаемом объекте и протекающих в нем процессах; информация имеет вполне определенный термодинамический смысл. Таким образом, с полным основанием применяемые для изучения водного режима грунтов зоны аэрации методы можно назвать термодинамическими. В настоящей работе используемые методы по традиции мы будем называть гидрофизическими.

ГЛАВА 1

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДНОГО РЕЖИМА В НЕНАСЫЩЕННО-НАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ

В последние годы большое внимание уделяется изучению движения влаги в зоне аэрации, под которой понимается пространство от поверхности земли до грунтовых вод, где преобладают грунты, находящиеся в ненасыщенном состоянии. Грунт считается насыщенным, когда его влажность соответствует полной влагоемкости. В этом случае он представляет собой двухфазную систему (частички грунта — вода), а в порах его содержится вода, которая перемещается под действием гравитационных сил (свободная вода), и в среде передается гидростатическое давление.

Влияние внутренних сил, характеристика которых приведена ниже, проявляется в том, что некоторое количество воды связывается этими силами (связанная, капиллярная и другие виды воды) и практически не участвует в движении. При неизменной структуре грунта проницаемость его (коэффициенты фильтрации или проницаемости) остается постоянной.

Следует также выделить квазинасыщенное состояние, при котором внешние признаки насыщенных грунтов сохраняются, но в их поровом пространстве содержится окклюдированный (защемленный) воздух. Влажность квазинасыщенных грунтов меньше полной влагоемкости, и грунты представляют собой трехфазную систему.

Перемещение воды в квазинасыщенных грунтах осуществляется через уменьшенную за счет присутствия пузырьков воздуха часть порового пространства в соответствии с законом Дарси, но их проницаемость (коэффициент фильтрации) зависит от количества защемленного воздуха.

Ненасыщенным называют такое состояние грунтов, при котором в поровом пространстве грунтов вода и воздух образуют непрерывные фазы, т.е. атмосферой сообщаются как заполненные воздухом, так и заполненные водой проходные поры. В отдельных замкнутых порах могут находиться пузырьки защемленного воздуха.

Влажность ненасыщенных грунтов всегда меньше полной влагоемкости, поэтому они также представляют собой трехфазную систему. Давление p в воде вблизи поверхности раздела частиц породы, воды и воздуха вследствие действия внутренних сил меньше, чем атмосферное. Оно выражается как приведенное к атмосферному, принятому за 0. Следовательно, приведенное давление $p < 0$, т. е. отрицательно, и это — главный признак ненасыщенных грунтов.

Вода в ненасыщенных грунтах не является свободной, не передает гидростатического давления и перемещается под действием градиентов, обусловленных совместным влиянием гравитационного поля и внут-

ренных сил. При этом величина внутренних сил и проницаемость ненасыщенных грунтов являются функцией влагосодержания.

Рассмотрим математические модели, характеризующие условия перемещения воды в грунтах. Следует подчеркнуть, что теория геофильтрации, в которой рассматривается движение воды в насыщенных грунтах (двухфазная система) на основе линейного закона фильтрации (закона Дарси), уже много десятков лет успешно используется для решения практических задач. Разработка математических моделей, описывающих перемещение воды в трехфазных системах, в частности в квазинасыщенных и ненасыщенных грунтах, находится в стадии становления и заслуживает специального рассмотрения.

Начало количественному описанию процесса движения влаги в ненасыщенных грунтах (влагопереноса) положил в 1907 г. Е. Букингом, который сформулировал представление о некотором капиллярном потенциале влаги как о едином показателе, позволяющем судить о состоянии влаги в ненасыщенном грунте, связях влаги с грунтом и закономерностях ее перемещения. Трудami зарубежных и отечественных ученых эта идея была развита и получила признание в виде представления о термодинамическом потенциале влаги. Представив совокупность твердой фазы, грунтового раствора и грунтового воздуха как термодинамическую систему, можно в качестве показателя свободной энергии системы принять парциальную свободную энергию. Рассмотрение воды в качестве химического компонента грунта позволило оценить действие на молекулы воды сил различной природы в единицах работы, которые получили название термодинамического потенциала влаги. Именно с таких позиций эти вопросы рассмотрены в монографии А.М. Глобуса [8], причем получили оценку различные механизмы передвижения влаги в ненасыщенных грунтах, а также действие градиентов концентрации, теплового, электрического, магнитного и гравитационного полей. Было показано, что полный термодинамический потенциал G , измеряемый в единицах работы, отнесенной к единице массы, в недеформируемом грунте и при изометрических условиях может быть представлен в виде выражения

$$G = (p_T/\rho) + g z, \quad (1)$$

где p_T — тензиометрическое всасывающее давление влаги в ненасыщенных грунтах; ρ — плотность влаги (порового раствора); g — ускорение свободного падения; z — вертикальная координата.

А.Б. Ситников [20] в качестве основного энергетического показателя принял давление грунтовой влаги, которое представляет собой работу сил разной природы, отнесенную к объему. А.Б. Ситников дал термодинамическое описание состояния воды в подземном растворе и оценил участие составляющих суммарного давления — давлений, эквивалентных следующим силам: 1) сорбционным на границе твердый скелет — раствор; 2) капиллярно-менисковым, действующим на поверхностях разде-

ла твердый скелет — раствор — воздух; 3) поверхностного натяжения, действующим на поверхности раздела раствор — воздух; 4) биологического происхождения; 5) возникающим при изменении структуры грунта в процессе набухания, усадки и других деформаций; 6) обусловленным изменением скорости движения воды; 7) обусловленным изменением температуры; 8) связанным с электромагнитными явлениями, радиационным облучением; 9) гравитационным; 10) осмотического избыточного давления; 11) давлению со стороны заземленного воздуха; 12) атмосферному давлению.

Из них восемь составляющих объединены показателем "всасывающее давление", которое определяется с помощью тензиометров, характеризует действие внутренних сил и является отрицательным по отношению к атмосферному давлению, принятому за 0.

Для практических целей вместо термодинамического потенциала представляется целесообразным использовать другую характеристику. Для этого необходимо выражение (1) разделить на g :

$$[\rho_T / (\rho g)] + z = G / g = H. \quad (2)$$

Полученная характеристика H есть не что иное, как гидродинамический напор. Тогда выражение (2) можно записать в следующем виде:

$$H = (\rho_T / \gamma) + z \quad (3)$$

(где γ — удельный вес грунта); оно аналогично уравнению Бернулли для насыщенных грунтов.

Учитывая сказанное, уравнение (3) можно представить для насыщенных грунтов в виде

$$H_H = h_d + z, \quad (4)$$

где H_H — гидродинамический напор (в соответствии с уравнением Бернулли); $h_d = p_d / \gamma$ — положительная высота гидростатического давления, или просто высота давления; p_d — гидростатическое давление; z — высота положения точки.

Для ненасыщенных грунтов

$$H_{HH} = -h_B + z, \quad (5)$$

где H_{HH} — гидродинамический напор; $h_B = p_B / \gamma$ — отрицательная высота давления в ненасыщенных грунтах, которая может быть названа высотой всасывания; p_B — всасывающее давление.

В уравнении (5) всасывающее давление p_B измеряется в паскалях, но при удельном весе пресной воды $\gamma = 1 \text{ Н/м}^3$ величина всасывающего давления численно равна высоте всасывания h_B .

Обратимся далее к вопросу о выборе математической модели движения влаги в ненасыщенно-насыщенных грунтах. Рассматривая процессы движения влаги в ненасыщенных грунтах и развивая идеи Е. Бу-

кингема, Л. Ричардс в 1931 г. получил нелинейное уравнение влагопереноса параболического типа. В дальнейшем теория влагопереноса разрабатывалась многими иностранными учеными, наиболее интересные результаты исследований были опубликованы в сборнике [10]. В нашей стране, начиная с 1960-х годов этим вопросам уделяют постоянное внимание А.А. Роде, А.М. Глобус, И.И. Судницын и др. При этом уравнение влагопереноса записывалось в терминах влажности, всасывающего давления, потенциала влаги (термодинамического потенциала) и гидродинамического напора.

Поскольку в настоящей работе рассматривается перенос влаги в ненасыщенно-насыщенных грунтах, представляется наиболее правильным пользоваться уравнением, в котором в качестве искомой функции принят гидродинамический напор по зависимости (3).

Многими учеными [5, 15, 22] на основании теоретических и экспериментальных данных доказано, что в ненасыщенно-насыщенных грунтах действителен обобщенный закон Дарси в записи

$$v = -K_{\text{тр}}(H) \operatorname{grad} H, \quad (6)$$

где v — скорость переноса воды; $K_{\text{тр}}$ — коэффициент пропорциональности, характеризующий проницаемость среды и зависящий от изменения напора.

Уравнение влагопереноса легко может быть получено путем подстановки в уравнение баланса массы зависимости (6):

$$\mu(H) \frac{\partial H}{\partial t} = \operatorname{div} (k \operatorname{grad} H), \quad (7)$$

где t — время; k — коэффициент проводимости.

Рассматривая условия связи безнапорного водоносного горизонта с атмосферой при отсутствии дренажа, влагоперенос можно представить одномерным вертикальным. В этом случае вместо уравнения (7) получается уравнение нестационарного влагопереноса в ненасыщенно-насыщенных грунтах

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k(H) \frac{\partial H}{\partial z} \right] + \epsilon(z, t) = \mu(H) \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (8)$$

$$\mu(H) = \frac{\partial \theta}{\partial H}, \quad (9)$$

где z и t — пространственная и временная координаты; $k(H)$ — коэффициент проводимости грунта; $\epsilon(z, t)$ — функция, суммарно характеризующая отбор влаги корневой системой растений и физическое испарение; $\mu(H)$ — коэффициент емкости грунта; H — гидродинамический напор, вычисляемый по формуле (3); θ — объемная влажность грунта. Подчеркнем, что в уравнениях (7) и (8) не учитывается перенос влаги в парообразном состоянии.

Поскольку уравнения (8) и (9) описывают нестационарные процессы фильтрации в насыщенных грунтах и влагопереноса в ненасыщенных грунтах, требуется детальная расшифровка обозначений.

Прежде всего отметим, что коэффициенты уравнений $k(H)$ и $\mu(H)$, которые являются параметрами физических процессов фильтрации и влагопереноса, зависят от гидродинамического напора.

Для условий фильтрации в насыщенных грунтах исходя из предпосылки о постоянстве их структуры и влагосодержания (упругие свойства среды и воды во внимание не принимаются) фильтрационные параметры обычно считаются постоянными при любых изменениях напора.

Для насыщенных грунтов коэффициентом проводимости следует считать постоянный коэффициент фильтрации $k(H) = k_{\phi} = \text{const}$, а коэффициент емкости $\mu = 0$, так как изменениями влажности, которые могут происходить только за счет сжимаемости воды и скелета грунта, можно пренебречь при исследовании грунтов с неизменной структурой.

Для условий влагопереноса в ненасыщенных грунтах в связи с изменением их влажности параметры влагопереноса будут переменными. В соответствии с выражением (5) для конкретного сечения потока с координатой z величина напора H может изменяться при изменении всасывающего давления, обусловленного колебаниями влажности грунта.

Поскольку для пресной воды с удельным весом $\gamma = 1 \text{ Н/м}^3$ всасывающее давление численно равно высоте всасывания, измеряемой в метрах, все параметры влагопереноса в дальнейшем рассматриваются как функционально зависящие от высоты всасывания $h_{\text{в}}$.

Коэффициент проводимости для ненасыщенного грунта $k_{(H)} = k_{\text{в}}(h_{\text{в}})$, который может быть назван коэффициентом влагопереноса $k_{\text{в}}$, зависит от высоты всасывания, в свою очередь связанной с влажностью грунта.

Коэффициент емкости для ненасыщенного грунта в соответствии с выражением (9) является коэффициентом влажностной емкости $\mu(H) = \mu_{\text{в}}(h_{\text{в}})$, зависящим от высоты всасывания ($\mu_{\text{в}}$ — влажностная емкость). В ненасыщенных грунтах он определяется как первая производная зависимости влажности от всасывающего давления (высоты всасывания); для этого необходимо знать связь влажности и всасывающего давления. Возникает необходимость использования характеристики $\theta = f(p_{\text{в}}) = f(h_{\text{в}})$, которая часто называется основной гидрофизической характеристикой (ОГХ), поскольку она позволяет оценивать энергетическое состояние влаги в грунте и увязывать с влажностью величину всасывающего давления (высоты всасывания) и параметров влагопереноса.

Итак, в ненасыщенной зоне

$$h_{\text{в}} < 0; \mu_{\text{в}} = \frac{\partial \theta}{\partial h_{\text{в}}} \neq 0; k = k_{\text{в}}(h_{\text{в}}). \quad (10)$$

В насыщенной зоне

$$h_d > 0; \mu = \frac{\partial \theta}{\partial h_B} \approx 0; k = k_\phi. \quad (11)$$

На границе насыщенной и ненасыщенной зон давление равно атмосферному, т. е.

$$|p_B| = p_d = 0; |h_B| = h_d = 0, \quad (12)$$

что позволяет определить положение поверхности грунтовых вод.

Рассмотрим вопрос о интерпретации данных измерения давления в полевых условиях. Тензиометр дает возможность измерять отрицательное всасывающее давление в ненасыщенных грунтах и положительное гидростатическое давление в насыщенных грунтах. Величина давления для пресной воды соответствует высоте всасывания в ненасыщенных грунтах и высоте давления в насыщенных и квазинасыщенных грунтах. При известной вертикальной координате z по зависимостям (4) и (5) соответственно вычисляется величина гидродинамического напора; при этом за плоскость сравнения удобно принять поверхность земли, тогда координата z будет отрицательной.

В условиях вертикального одномерного влагопереноса распределение напора по разрезу зоны аэрации в момент времени, когда производили отсчеты по тензиометрам, можно представить графически в виде мгновенной эпюры напоров (рис. 1). По наклону такой эпюры можно судить о направлении движения влаги в зоне аэрации. Если границей эпюры служит вертикальная линия (напор постоянен), то это указывает на равновесное состояние влаги в грунте, т. е. отсутствие движения (линия / на рис. 1). Отклонение границы эпюры влево от вертикальной линии (угол наклона больше 90°) указывает на восходящее движение влаги, а отклонение вправо (угол наклона меньше 90°) — на нисходящее. Проведенная на эпюре под углом 45° линия IV позволяет в любом сечении по глубине зоны аэрации разделить величину напора на две составляющие — высоту всасывания h_B и высоту положения z .

Мгновенная эпюра напоров может быть построена и для более сложных случаев, когда в зоне аэрации формируется область квазинасыщенного состояния грунтов.

На рис. 2, А представлена эпюра изменения полного гидродинамического напора в пределах двухслойной зоны аэрации, в которой образовалась область квазинасыщенного состояния грунтов. По наклону границы эпюры 3 или соотношению величин полного гидродинамического напора в смежных сечениях на графике однозначно определяется направление движения влаги — восходящее в нижней части и нисходящее в верхней части разреза. Наклоненная под углом 45° линия 4 представляет изменение величины z . Если напор H меньше величины z (что соответствует значению $|H| > |z|$), то грунт находится в ненасыщенном сос-

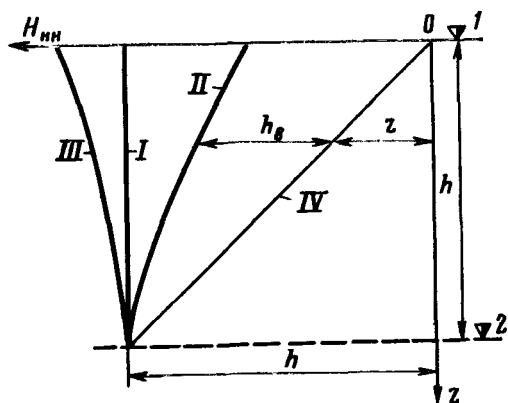


Рис. 1. Эпюры напоров для определения направления движения влаги в зоне аэрации:

1 — поверхность земли ($z = 0$); 2 — поверхность грунтовых вод ($h_B = 0$). I — равновесное состояние (движение отсутствует); II — нисходящее движение влаги; III — восходящее движение влаги; IV — линия, показывающая изменение гравитационной составляющей H

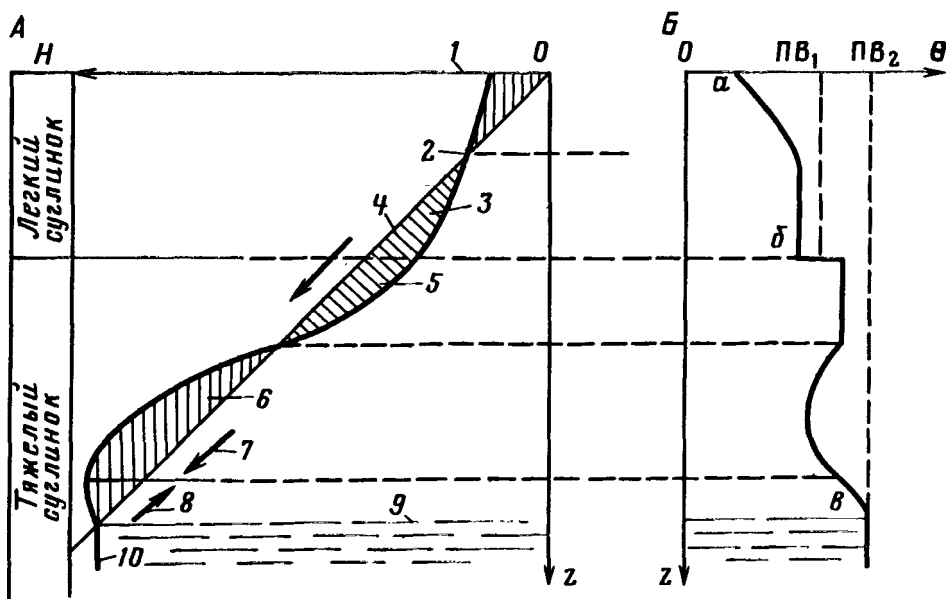


Рис. 2. Эпюры напоров для определения направления движения влаги и состояния грунтов зоны аэрации:

А — эпюра гидродинамического напора; Б — эпюра влажности. 1 — поверхность земли; 2 — граничные значения, в которых $h_B = h_d = 0$; 3 — изменение напора по глубине зоны аэрации; 4 — изменение гравитационной составляющей напора; 5 — зона положительных значений высоты давления h_d ; 6 — зона отрицательных значений высоты всасывания h_B ; 7 — нисходящее движение влаги; 8 — восходящее движение влаги; 9 — уровень грунтовых вод; 10 — движение влаги отсутствует. PB_1 и PB_2 — полная влагоемкость легкого и тяжелого суглинка

тоянии, область развития которого на графике обозначена цифрой 6. Если $H > z$ (что соответствует значению $|H| < |z|$), то грунт находится в квазинасыщенном или насыщенном состоянии, которое на графике обозначено цифрой 5. Для однозначного определения состояния грунта в этой области необходимо иметь информацию о влажности в зоне аэрации в виде эпюры влажности (см. рис. 2, Б). Так, на участке $a-b$ влажность меньше полной влагоемкости для легкого суглинка ($ПВ_1$), а на участке $b-e$ она меньше полной влагоемкости для тяжелого суглинка ($ПВ_2$). Между тем по графику в этих местах прослеживается положительное давление, следовательно, грунты здесь находятся в квазинасыщенном состоянии. Разность между полной влагоемкостью и влагосодержанием грунта дает объем заземленного воздуха.

Однако область квазинасыщенного состояния грунта, в которой имеет место нисходящее движение влаги, соответствует области так называемой верховодки. Границы ее определяются сечениями, в которых эпюра напоров пересекает линию z , т. е. $h_b = 0$. Эпюра также показывает, что ниже уровня грунтовых вод вертикальное движение влаги отсутствует, потому что напор постоянный.

Первичная обработка данных измерения всасывающего давления предусматривает также составление хронологических графиков изменения напора (пример см. на рис. 19–21), по которым можно проследить изменение напора во времени. Каждая кривая такого графика построена по данным, полученным по конкретным тензиометрам, установленным на опытной площадке в сечении с координатой z . По такому графику можно определять изменения высоты всасывания во времени в каждом сечении, направление движения влаги (по соотношению напоров в смежных сечениях) и динамику влагопереноса в целом.

Таким образом, первичная обработка результатов тензиометрических измерений дает существенную информацию о влагопереносе в зоне аэрации. Дальнейшая специальная обработка (см. гл. 5) позволяет получить данные о водном режиме и балансе влаги.

ГЛАВА 2

МЕТОДЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

СОСТАВ И ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ

Полевые исследования — режимно-балансовые наблюдения в естественных и техногенных условиях — проводятся на специально оборудованных опытных ключевых участках. Состав наблюдений определяется направленностью исследований, но во всех случаях необходимы инфор-

мация о метеорологических, биологических и агротехнических условиях объекта, а также данные о хозяйственном использовании территории. Рассматриваемые ниже гидрофизические методы используются для получения гидрогеологической информации об уровнях грунтовых вод и верховодки, химическом составе и минерализации вод, а также о водном и солевом режимах зоны аэрации в естественных и техногенных нарушенных условиях. Особое внимание при этом уделяется применению гидрофизических методов для изучения ненасыщенных грунтов зоны аэрации, поскольку они позволяют получить обширную и достаточно надежную информацию о режиме влаго- и солепереноса и количественную характеристику основных составляющих водно-солевого баланса этой зоны и грунтовых вод, что невозможно при использовании традиционных методов.

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

Тензиометр предназначен для измерения всасывающего давления влаги в ненасыщенных грунтах зоны аэрации. Принцип его работы основан на достижении равновесия давления влаги в грунте и давления воды в зонде тензиометра.

Тензиометр состоит из пористого керамического зонда, соединительных (водоводных, воздуховодных) трубок, воздухоуловителя и измерителя давления. Основные характеристики зондов — водопроницаемость и давление барботирования (прорыва воздуха через поры зонда). Давление барботирования определяет диапазон измерения всасывающего давления, а водопроницаемость, при прочих равных условиях, — скорость установления равновесия между давлением в тензиометре и всасывающим давлением влаги в грунте.

Известны различные конструкции тензиометров [7, 13]. В СССР серийно выпускается только один тип тензиометра АМ-20-11, с помощью которого можно замерять всасывающее давление лишь до глубины 1 м. Для измерений на больших глубинах используют различные модификации серийного тензиометра.

В большинстве известных типов тензиометров атмосферный воздух, поступающий внутрь системы в результате диффузии через пористую мембрану тензиометра (зонд) и соединительные трубки, не удаляется из системы и его количество не контролируется. Это приводит к существенным ошибкам при длительных измерениях. Кроме того, контроль за содержанием воды в устройстве может быть только визуальным, поэтому воздухоуловитель делают стеклянным и выносят на поверхность земли; устройство не может использоваться для круглогодичных режимных полевых наблюдений, так как в зимний период возможно замерзание воды в соединительных трубках вблизи поверх-

ности земли и выше нее; предельная глубина измерения всасывающего давления составляет 5 м от поверхности земли.

Указанные обстоятельства и практика проведения наблюдений в полевых условиях послужили основанием для разработки конструкции сборных тензиометров. В зависимости от конкретных условий наблюдений тензиометры собирают по различным схемам и в собранном виде устанавливают в скважины или шурфы. Существуют два основных типа сборных тензиометров — почвенные и глубинные.

Основная часть сборного тензиометра — пористый зонд. Интервал давлений, в котором может работать тензиометр, определяется пористостью зонда. Зонд изготавливается из керамического материала, с максимальным размером пор не более 1 мкм. Сортамент зондов, изготавливаемых на заводе керамических изделий в г. Хусте (УССР), представлен на рис. 3.

Соединительные трубки служат для соединения пористого зонда с измерителем давления. В зависимости от типа сборного тензиометра

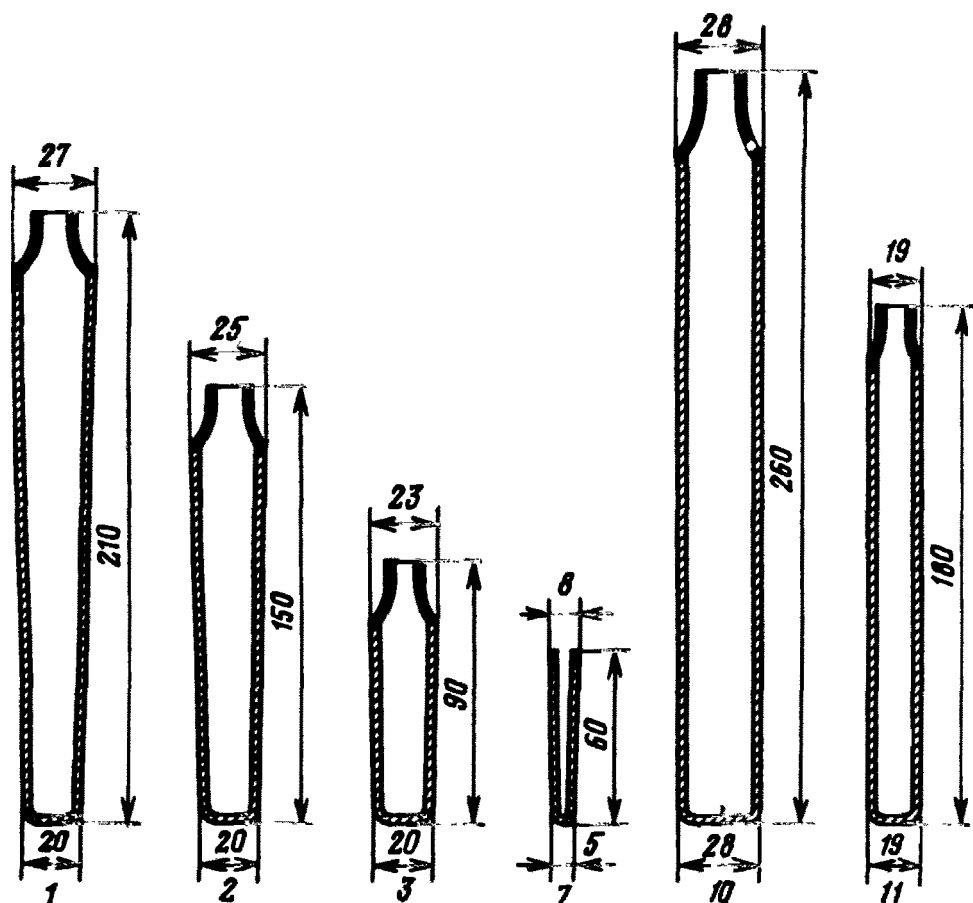


Рис. 3. Пористые зонды:

1, 2, 3, 7, 10, 11 — марки тензиометров. Размеры даны в миллиметрах

они заполняются водой (водоходные трубки) или остаются незаполненными (воздухоходные трубки) и снабжаются коллекторами и воздухоуловителями.

В качестве измерителей давления используют механические манометры-вакуумметры, но можно применять и жидкостные манометры — водяные или ртутные.

Важная характеристика тензиометра — инерционность при замерах всасывающего давления, т. е. несоответствие (запаздывание) показаний датчика в момент замера истинной величине всасывающего давления. Основная причина инерционности — присутствие в тензиометре воздуха, который диффундирует через поры зонда.

Инерционность тензиометра зависит также от наличия в его системе нежестких элементов, деформирующихся и изменяющих свой объем. Поэтому все детали тензиометра должны быть жесткими и прочными. Незначительными изменениями объема воздуха должен обладать и измеритель давления. На инерционность приборов влияют размеры используемых зондов (точнее, площадь контакта зонда с грунтом) и их проницаемость.

Следует отметить, что при использовании зондов больших размеров (см. рис. 3; типы 1, 2), особенно при их установке и зарядке в значительно иссушенных грунтах, из тензиометра может вытекать большое количество воды, а использование зондов малых размеров (см. рис. 3; типы 3 и 7) при наблюдении в увлажненных грунтах обуславливает инерционность тензиометра. В связи с этим подбор зондов определяется условиями, в которых будут производиться наблюдения.

Практикой установлено, что для наблюдений за динамикой влаги в иссушенных грунтах целесообразно применять зонды меньших размеров (см. рис. 3; типы 3 и 7) с давлением барботирования от — 85 до — 90 кПа, с тем чтобы уменьшить потери воды. Возможные погрешности за счет инерционности тензиометра в этом случае будут компенсированы большим сроком его работы без удаления воздуха и доливания воды. В увлажненных грунтах рекомендуется применять большие зонды (см. рис. 3; типы 1 и 2), обладающие при прочих равных условиях большей проницаемостью, а следовательно, меньшей инерционностью.

Измерение всасывающего давления влаги сборными почвенными и глубинными тензиометрами

Для измерения всасывающего давления влаги на небольшой глубине используются почвенные тензиометры. Если тензиометр устанавливается в скважину в значительно иссушенных грунтах, то надежные измерения всасывающего давления можно получить до глубины 3 м, а в увлажненных грунтах — до 5 м. Эти ограничения связаны с тем, что трубка, соеди-

няющая зонд с измерителем давления, заполнена водой. Столб воды в трубке создает дополнительное отрицательное давление, которое суммируется с всасывающим давлением. Например, при величине всасывающего давления от -60 до -70 кПа достоверные данные могут быть получены при длине соединительной трубки не более 2 м. При заложении зондов на глубину $3-4$ м, т. е. при достижении суммарного давления менее -100 кПа, произойдет разрыв сплошности воды и практически замер произвести нельзя.

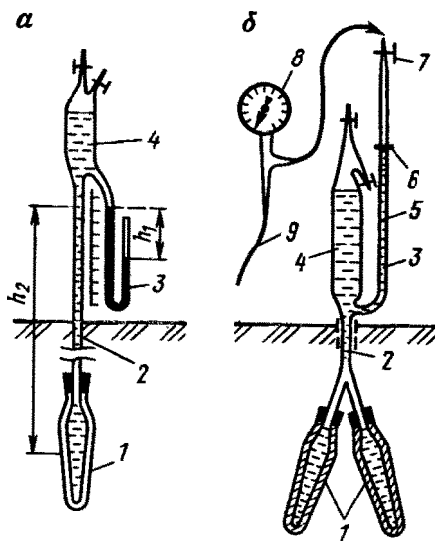
Почвенные тензиометры собирают на поверхности и затем устанавливают в скважину. Они состоят из пористого зонда, водоводных соединительных трубок, воздухоуловителя и стационарного или переносного измерительного устройства (рис. 4).

Для уточнения результатов наблюдений на одной глубине можно устанавливать два-три пористых зонда. Тогда каждый зонд должен оборудоваться отдельно. В качестве водоводов целесообразно применять металлические трубки диаметром $7-8$ мм. При использовании отдельных отрезков металлических трубок они стыкуются резиновыми соединениями, общая длина трубок зависит от глубины заложения зонда.

Воздухоуловитель изготавливается из прозрачного материала, чтобы можно было контролировать наличие воды в системе тензиометра. Объем воздухоуловителя $50-70$ см³. Для удаления воздуха, заполнения воздухоуловителя водой и подключения манометра в воздухоуловителе должно быть три отвода. Коллектор для подключения к одному воздухоуловителю нескольких зондов может быть сделан из металла, стекла или пластмассы. Для зарядки тензиометра его заполняют водой. При этом в нем создается разрежение от -30 до -40 кПа, которое поддерживается через верхний отвод воздухоуловителя; в нижний отвод подается дегазированная вода. После этого в течение $4-5$ ч давление в тензиометре приводится к давлению поровой влаги увеличением или уменьшением разрежения на $3-5$ кПа в зависимости от изменения давления в большую или меньшую сторону (по показаниям манометра) от заданного.

Рис. 4. Схема устройства почвенных тензиометров с ртутным манометром (а) и закрытым от атмосферы воздушно-водяным манометром или вакуумметром (б):

1 — пористый зонд; 2 — соединительная трубка; 3 — ртутный манометр; 4 — воздухоуловитель; 5 — воздушно-водяной манометр; 6 — резиновое кольцо; 7 — зажим; 8 — переносной вакуумметр; 9 — отвод к насосу



Величина всасывающего давления влаги в грунте определяется по отсчетам механического манометра-вакуумметра. Можно использовать и воздушно-водные манометры, изолированные от влияния атмосферы (см. рис. 4). В этом случае на воздушно-водном манометре 3 берется нуль-отметка — на уровне мениска воды устанавливается резиновое кольцо 6. Затем с отвода снимается зажим 7 и в измерителе с помощью насоса создается такое разрежение, при котором уровень удерживался бы на нуль-отметке. Всасывающее давление в этом случае будет равно разнице между давлением, фиксируемым манометром, и давлением столба воды в тензиометре от уровня ее в воздушно-водном манометре до середины пористого зонда.

В качестве измерителя может быть использован U-образный ртутный манометр-вакуумметр, соединенный с воздухоуловителем (см. рис. 4, а). В этом случае всасывающее давление определяется по формуле

$$p = \rho_1 h_1 - \rho_2 h_2,$$

где ρ_1 — плотность ртути; h_1 — высота столба ртути; ρ_2 — плотность воды; h_2 — высота столба воды в тензиометре.

Глубинные тензиометры предназначены для изучения всасывающего давления влаги в грунтах зоны аэрации на глубинах до 30 м. Тензиометр устанавливают в шурфы или в скважину, после чего обсадные трубы извлекают, а ствол скважины тампонируют.

Конструкции глубинных тензиометров отличаются тем, что в них отсутствуют водоводные трубки, а воздухоуловитель 4 непосредственно соединен с пористым зондом 1 (см. рис. 5).

Воздухоуловитель 4 разделен кольцевой перегородкой 8 с патрубком 9 на нижнюю 10 и верхнюю 7 камеры. Нижние концы воздуховодных трубок 5 подсоединены к нижней и верхней камерам, а верхние концы выводятся на поверхность. Для заправки тензиометра водой на трубках предусмотрены отводы 6 и 7.

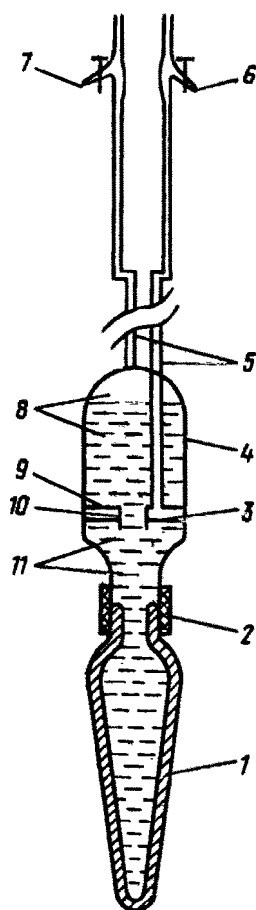


Рис. 5. Схема глубинного тензиометра:

1 — пористый керамический зонд; 2 — резиновая трубка; 3 — уровень воды в воздухоуловителе; 4 — воздухоуловитель; 5 — воздуховоды; 6, 7 — отводы для заполнения тензиометров водой; 8 — верхняя камера; 9 — перегородка; 10 — патрубок; 11 — нижняя камера

Верхняя камера выполняет роль страховочного сосуда, из которого вода перетекает в нижнюю камеру, если уровень воды в ней опустится ниже патрубка 9. Воздухоуловитель представляет собой металлическую трубку диаметром 30–35 мм. Вместимость нижней камеры составляет примерно 30 см³, верхней — 80–100 см³. Для изготовления воздухопроводных трубок используют металлические трубки с внутренним диаметром 1,5–2 мм.

После установки тензиометров в скважину их заправляют водой. Сначала в системе тензиометра через отвод 6 задается отрицательное давление –30 . . . –40 кПа. Затем, поддерживая это давление, через отвод 6 в тензиометр подают воду. Отрицательное давление в системе тензиометра задается для того, чтобы предотвратить поступление воды из зонда тензиометра в грунт в период заполнения его водой.

Как только в отводе 7 появится вода, подача ее в тензиометр прекращается и вместо воды через отвод 6 впускается воздух. Отсос воздуха и воды следует продолжать до тех пор, пока через воздухопроводные трубки не начнет свободно проходить воздух. При проведении этой операции в системе тензиометра поддерживают ранее заданное отрицательное давление.

В дальнейшем в зависимости от того, повышается или понижается давление в тензиометре, для уравнивания давлений в тензиометре и в грунте, следует соответственно увеличивать или уменьшать давление на 3–5 кПа.

Всасывающее давление в нижней камере измеряется переносным механическим вакуумметром, присоединенным к воздухопроводной трубке 5.

Величина всасывающего давления влаги p рассчитывается по формуле

$$p = p_m + p_v,$$

где p_m — давление воздуха в нижней камере; p_v — давление, создаваемое столбом воды от уровня воды в нижней камере до середины зонда.

В процессе работы тензиометра уровень воды в нижней камере (см. рис. 5) может опускаться ниже патрубка 10. В этом случае в нижнюю камеру будет перетекать вода из верхней камеры 8, где уровень будет постепенно понижаться. Величина сработки запасов воды в верхней камере определяется по разности давлений в манометрах, соединяемых с воздухопроводными трубками 5. Рекомендуется производить дозаправку тензиометра водой, когда в верхней камере остается треть первоначального объема воды.

Контроль всасывающего давления в почвенном слое

В пределах почвы всасывающее давление измеряют для контроля водного режима в корнеобитаемом слое. При этом следует использовать почвенные тензиометры или специально монтируемые поплавковые

тензиометры, всплывающий поплавок которых сигнализирует о недопустимом снижении влажности почвы и, следовательно, о необходимости проведения полива.

Почвенные тензиометры позволяют измерять всасывающее давление от 0 до 80 кПа и при достижении определенной величины всасывающего давления, минимально допустимой для конкретной сельскохозяйственной культуры, устанавливать сроки поливов. Тензиометр должен быть предварительно настроен, чтобы обеспечить всплывание поплавка, которое служит сигналом к проведению очередного полива.

Поплавковый тензиометр состоит из тех же элементов, что и почвенный (см. выше), но его соединительная трубка совмещается с воздухоуловителем, в котором находится поплавок (рис. 6). Поплавок 6 представляет собой камеру из недеформируемого материала (стекло, металл), в нижней части оснащенную полупроницаемой мембраной 4. При диаметре соединительной трубки 10 мм диаметр поплавка должен быть порядка 6–7 мм.

Принцип действия тензиометра заключается в том, что под действием изменяющегося давления в системе тензиометра уменьшается или увеличивается объем воздуха, предварительно оставленного в поплавке, вследствие чего поплавок тонет (при повышении давления) или поднимается (при понижении давления).

Поплавковый тензиометр подготавливается к работе следующим образом. В собранном тензиометре (зонд предварительно увлажнен), не заполненном водой, задается отрицательное давление, равное по величине всасывающему давлению влаги, при котором должен производиться полив, а следовательно, должен всплыть поплавок.

При этом в поплавке устанавливается такое же давление, как и в тензиометре, поскольку воздух из него выйдет через сухую полупроницаемую мембрану. В дальнейшем, поддерживая заданное разрежение, в тензиометр через зонд, погруженный под уровень воды, подается дегазированная вода. При подъеме уровня воды в соединительной трубке мембрана поплавка увлажняется и объем оставшегося в поплавке воздуха становится закрытым. Поплавок при этом остается на плаву. Тензиометр полностью заполняется водой, а следовательно, давление в нем становится равным атмосферному. С увеличением давления до атмосферного вода через мембрану будет поступать в поплавок. Объем воздуха в поплавке уменьшится — и он опустится (потонет) в нижнюю часть соединительной трубки.

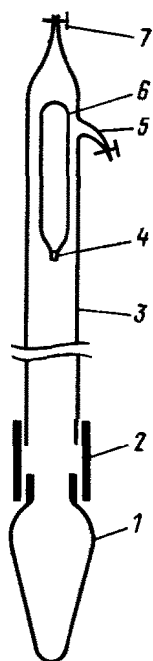


Рис. 6. Схема поплавкового тензиометра:

1 — пористый зонд; 2 — соединительная муфта; 3 — трубка; 4 — полупроницаемая мембрана; 5 — отвод; 6 — поплавок; 7 — отвод

После установки тензиометра в грунт из него, в случае иссушения грунта, будет выходить вода, а следовательно, будет понижаться давление, что вызовет отток воды из поплавка через полупроницаемую мембрану. При достижении величины разрежения, равной ранее задаваемой при подготовке тензиометра к работе, объем воздуха в поплавке увеличивается и он всплывает, что и будет сигналом к началу полива.

После увлажнения грунта поливом вода вновь начнет поступать в тензиометр, а в связи с увеличением давления — и в поплавок, объем воздуха в нем уменьшится и поплавок потонет.

Поплавковый тензиометр может работать в любом режиме давлений. В случае необходимости использования тензиометра в другом режиме давлений, поплавок необходимо просушить и при заправке тензиометра задавать такое давление, при котором поплавок должен всплывать.

Измерение уровня грунтовых вод пневматическим уровнемером

Для определения положения уровня грунтовых вод в не обсаженной трубами, затампонированной грунтом скважине применяется пневматический уровнемер.

Основная деталь уровнемера — полиэтиленовая или металлическая трубка диаметром 30—40 мм, нижний конец которой соединен с пористым зондом (рис. 7) или перекрыт пористой пластиной. Верхний конец трубки закрыт резиновой пробкой, через которую вводят две полиэтиленовые или металлические воздухопроводные трубки диаметром 2—3 мм. Нижний конец трубки 4 должен находиться вблизи основания прибора, а отверстие трубки 5 — в верхней его части. Длина прибора (трубки) должна соответствовать ожидаемой амплитуде колебаний уровня грунтовых вод. Верхние концы воздухопроводных трубок 4 и 5 выводят на поверхность земли.

При открытых (в атмосферу) воздухопроводных трубках вода через пористый зонд поступает внутрь прибора, и уровень ее в трубке (см. рис. 7) устанавливается на глубине, соответствующей уровню грунтовых вод (УГВ). Определение положения уровня грунтовых вод при известной глубине нахождения нижнего конца прибора сводится к замеру высоты в нем столба воды. Для этого через воздухопроводную трубку 5 отсасывается воздух, в результате чего в приборе создается разрежение, превышающее по величине давление столба воды от уровня грунтовых вод до нижнего конца воздухопроводной трубки 4, находящейся в основании прибора. Вследствие созданной таким образом разности давлений через воздухопроводную трубку 4 в прибор будет поступать атмосферный воздух до тех пор, пока давление воздуха над водой не будет уравновешено давлением столба воды, находящейся в нем.

Установившееся в приборе давление измеряется параллельно подключенным к воздухопроводной трубке 5 манометром 6. Величина разре-

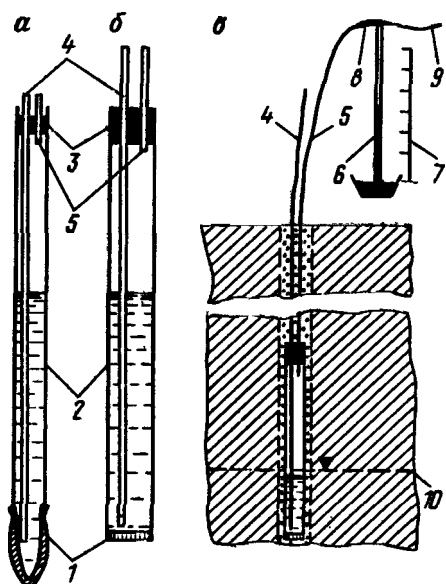


Рис. 7. Схема устройства пневматического уровнемера:

а — прибор с зондом; *б* — прибор с пластиной; *в* — монтажная схема. 1 — пористый зонд или пластина; 2 — корпус прибора; 3 — пробка; 4, 5 — воздухопроводные трубки; 6 — манометр; 7 — мерная линейка; 8 — тройник; 9 — отвод к вакуумному насосу; 10 — уровень грунтовых вод (УГВ)

жения, фиксируемая манометром, будет численно равна высоте столба воды в приборе. Разница значений глубины нахождения нижнего конца воздухопроводной трубки (основания прибора) и измеренного давления дает глубину залегания уровня грунтовых вод.

Расчетная формула для определения глубины уровня воды имеет вид

$$h = h_k - p_m,$$

где h — глубина уровня грунтовых вод; h_k — глубина нижнего торца воздухопроводной трубки (основания прибора); p_m — давление, зафиксированное манометром.

Учитывая, что длительность замера составляет 15–20 с, изменением уровня вследствие поступления в прибор воды через пористый зонд можно пренебречь.

Отбор проб порового раствора глубинным пробоотборником

Пробы раствора из ненасыщенных грунтов зоны аэрации отбирают с помощью метода вакуумных вытяжек при давлении влаги в грунтах выше –80 кПа. Для этого используют глубинный пробоотборник.

Пробоотборник представляет собой пористый зонд (рис. 8), верхний конец которого соединен с патрубком 3, перекрытым резиновой пробкой 4. Через нее вводят две полиэтиленовые или металлические трубки 5 и 6 диаметром 2–3 мм. Нижний конец воздухопроводной трубки 6 должен находиться в верхней части патрубка, а нижний конец водоподъемной трубки 5 — в самом низу зонда. Свободные концы трубок выводят на поверхность земли.

К водоподъемной трубке последовательно подсоединяют сосуд для отбора пробы воды 11 и балластный сосуд 7. В качестве последнего можно использовать бутылку вместимостью 0,5 л. Для отбора проб воды используют специальные сосуды вместимостью 0,1–0,15 л с двумя

Рис. 8. Схема глубинного пробоотборника:

а — прибор; *б* — монтажная схема. 1 — зонд; 2 — резиновая трубка; 3 — патрубок; 4 — пробка; 5 — водоподъемная трубка; 6 — воздухопроводная трубка; 7 — балластный сосуд; 8—10 — зажимы; 11 — сосуд для отбора пробы

отводами. Один из отводов сосуда 11 подключается к водоподъемной трубке 5, а другой — к балластному сосуду 7. При закрытой трубке 6 через балластный сосуд и водоподъемную трубку 5 в зонде 1 задается разрежение от -90 до -95 кПа.

При глубине заложения зондов менее 8 м для подъема воды на поверхность земли перекрывается зажим 10 и открывается зажим 9; при этом воздухопроводная трубка 6 сообщается с атмосферой, и под действием разрежения отобранный поровый раствор по трубке 5 поднимается в сосуд 11. Если зонд расположен на глубине более 8 м, то для отбора порового раствора при закрытом зажиме 10 через отвод 9 по воздухопроводной трубке 6 нагнетается воздух под давлением.

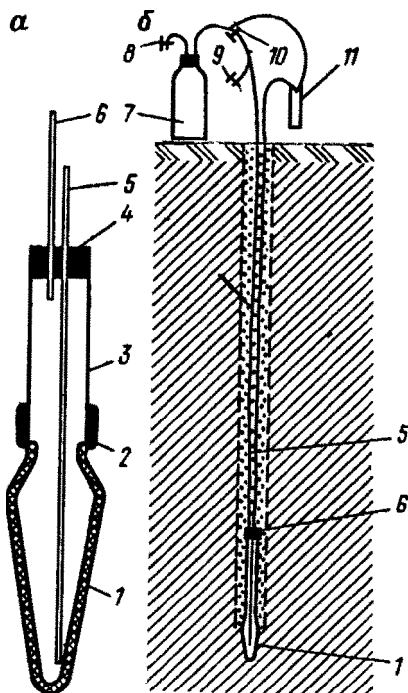
Для отбора проб грунтовых вод можно применять пневматический уровнемер, если на поверхности земли установить сосуд для отбора проб воды и балластный сосуд и смонтировать их в соответствии со схемой, приведенной на рис. 8, б.

МОНТАЖ И УСТАНОВКА ПРИБОРОВ

Почвенные тензиометры

Для установки зондов почвенных тензиометров специальным бескарновым буром (рис. 9, а) из предварительно выкопанного приямка глубиной 0,3 м бурится скважина. Бур имеет коническую форму и ввинчивается в грунт, уплотняя его. На забое в интервале, где будет размещен зонд, гладким наконечником (см. рис. 9, б) делается гнездо. Конусность у зондов (см. рис. 3; типы 1, 2 и 3), бура и гладкого наконечника одинакова, поэтому гнездо подходит для любого из конических зондов.

После сборки почвенного тензиометра его зонд погружается в воду и проверяется на герметичность путем создания вакуума. При установке в скважину для улучшения контакта с грунтом зонд покрывается грунтовой пастой. При установке нескольких зондов на одной глубине устья отдельных скважин должны располагаться близко друг от друга с таким



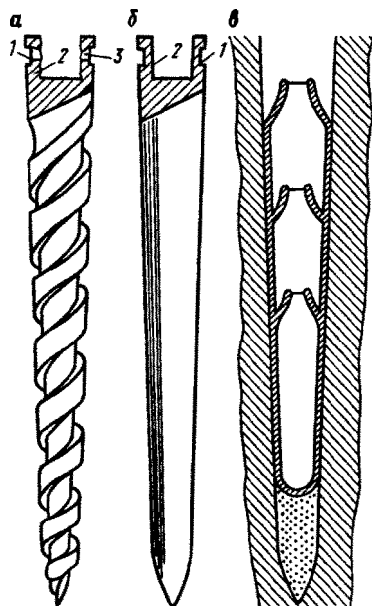


Рис. 9. Буровые наконечники, используемые при бурении скважин для установки зондов:

а — конический бур; б — гладкий наконечник; в — схема положения зондов в гнезде. 1 — пререзь для ключа; 2 — резьба; 3 — отверстие для шпонки

расчетом, чтобы можно было соединить водоводные трубки коллектором, подключенным к воздухоуловителю. После установки зондов в ствол скважины тампонируется грунт. Если для бурения скважины используют легкие буровые станки и скважина закрепляется обсадными трубами, то забой скважины должен находиться перед интервалом установки зонда. Этот интервал проходит вручную буром и гладким

наконечником, после чего вдавливаются и устанавливаются зонды. Тампонаж скважины производится одновременно с подъемом обсадных труб.

Для измерения всасывающего давления на глубинах более 4 м почвенные тензиометры следует устанавливать в специально оборудованных шурфах, стенки которых покрывают гидроизоляцией. В шурфах диаметром 0,8—1,2 м зонды тензиометров размещают в одном вертикальном сечении на разных глубинах. Скважины бурят наклонно (под углом 60° к вертикали), с тем чтобы диффундирующий в систему тензиометра воздух по водоводной трубке выходил в воздухоуловитель. Зонды располагают на расстоянии 0,5 м от стенки шурфа. Для получения надежных данных по одному горизонтальному сечению, так же как и при установке с поверхности, закладывают два-три зонда для одного тензиометра.

Глубинные тензиометры

Для установки одного тензиометра бурится скважина диаметром 75 мм. На забое скважины гладким наконечником (см. рис. 9, б) делается гнездо по форме пористого зонда. Затем в скважину опускается в собранном виде тензиометр, проверенный на герметичность. Зонд предварительно увлажняется и покрывается грунтовой пастой. Зонд задавливается в грунт с помощью металлической трубки. В нижней части металлической трубки делается разрез, в который на время установки зонда выводят воздуховодную и водоподъемную трубки. Концы трубок помещают в приямок или на поверхности земли. Скважина заполняется грунтом с поинтервальной трамбовкой.

Описанный способ установки глубинных тензиометров требует

большого объема бурения. Для сокращения расходов можно устанавливать несколько глубинных тензиометров в одну скважину.

При установке нескольких тензиометров на разных глубинах бурится скважина диаметром не менее 127 мм. Затем, как указано выше, устанавливается собранный нижний тензиометр, а скважина засыпается извлеченным при бурении грунтом до отметки, на 0,2 м меньшей отметки нижней части зонда следующего тензиометра. По мере засыпки грунт утрамбовывается, и через каждые 0,4—0,6 м делается водонепроницаемая парафино-битумная пробка. После тщательной трамбовки грунта на забое скважины устанавливается глиняный тампон, и скважина заполняется грунтом до отметки, соответствующей следующему зонду тензиометра; грунт уплотняется.

На образовавшемся забое скважины гладким коническим наконечником делается гнездо по форме зонда, затем опускается следующий собранный тензиометр. Так поступают на всех интервалах глубин, где размещаются тензиометры. В результате в скважине оказываются установленными поэтажно все тензиометры, изолированные водонепроницаемыми пробками.

Свободные концы воздухопроводных трубок размещают на поверхности земли в деревянном коробе или металлической трубе с дверцей. В коробе находятся и стационарные измерители давления или устройства для подключения переносного измерителя (вакуумметра).

На рис. 10 представлена схема оснащения наблюдательной точки — размещение почвенных и глубинных тензиометров, установленных в отдельных скважинах и в одной скважине, пробоотборников и уровнемера (см. ниже). Показан также металлический короб, в котором находятся свободные концы воздухопроводных и водоводных трубок, измеритель давления, термометр и осадкомер.

Существует и другой способ установки тензиометров в одну скважину. В скважину опускается собранная из отдельных элементов труба диаметром 60—70 мм. В эту трубу помещают предварительно связанные в гирлянду воздухопроводные трубки вместе со всеми тензиометрами, с таким расчетом, чтобы в скважине все зонды оказались на нужных глубинах. Труба, в которой находятся тензиометры, постепенно поднимается. В скважину засыпается небольшими порциями и трамбуется разрыхленный грунт, устанавливают изолирующие пробки. Такой способ уменьшает возможность повреждения зондов и воздухопроводных трубок при установке.

После подключения воздухопроводных трубок к манометрам проверяется герметичность собранных приборов. Для этого с помощью вакуумного насоса создается разрежение от —80 до —90 кПа. Постоянство показаний манометров в течение 20—30 мин указывает на пригодность приборов к работе.

Следует подчеркнуть, что установка нескольких тензиометров в одну скважину может выполняться только очень квалифицированным пер-

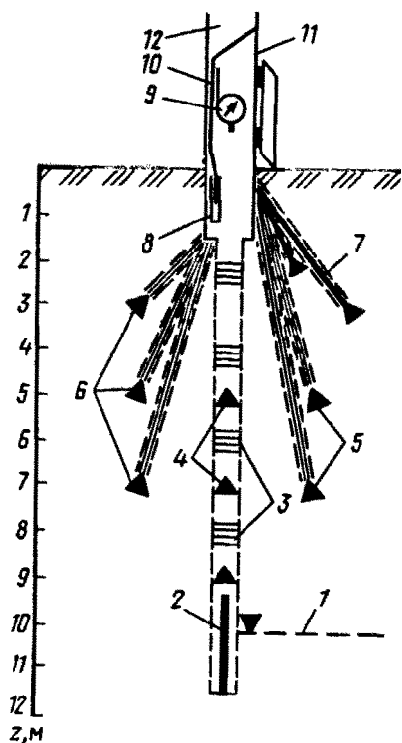


Рис. 10. Схема оснащения наблюдательной точки на опытной площадке:

1 — уровень грунтовых вод; 2 — уровнемер; 3 — изоляционный тампон; 4 — зонд глубинного тензиометра в общей скважине; 5 — зонд глубинного тензиометра в отдельной скважине; 6 — зонд пробоотборника; 7 — зонд почвенного тензиометра; 8 — марный цилиндр; 9 — манометр-вакуумметр; 10 — термометр; 11 — осадкомер; 12 — короб

соналом и даже при этом не гарантирована их надежная работа.

Гораздо проще и надежнее закладка глубинных тензиометров в шурфы, в частности в шурфы, которые проходят для отбора монолитов. Сначала в шурфе в тех интервалах глубин, где будут устанавливаться тензиометры, отбирают монолиты грунта для определения гидрофизических и гидрохимических параметров. Отбор ведется с таким расчетом, чтобы в стенке шурфа остался целиком ненарушенный грунт, в

котором можно сделать по всей глубине нишу шириной 0,2 м и глубиной 0,1 м. В этой нише будут расположены воздухоуловители и воздухопроводные трубки тензиометров (рис. 11). Монтаж тензиометров следует производить снизу вверх.

Наклонные скважины для установки зондов бурят ручным способом, так, чтобы их устье выходило в проем, где будут установлены воздухоуловители. Диаметр скважин должен обеспечивать возможность установки зондов с последующей засыпкой и утрамбовкой грунта. На забое скважины специальным буром и гладким наконечником делается гнездо, в которое вводится зонд. Зонды до установки в грунт находятся во влажном состоянии, а непосредственно перед установкой покрываются грунтовой пастой. Устанавливаются они наклонно, с тем чтобы диффундирующий в систему тензиометра воздух по водоводной трубке выходил в воздухоуловитель.

Глубина установки зондов не менее 0,5 м от стенки шурфа, поскольку на таком расстоянии, как установлено наблюдениями, на зонд не влияют нарушение структуры грунта при бурении шурфа и другие факторы.

В гнездо зонд задавливается с помощью водоводной трубки, которая нижним концом упирается в головку зонда. На забой скважины зонды устанавливаются металлической трубкой, которая упирается в плечики зонда. Воздухоуловитель, воздухопроводная и водоводная трубки во время установки зонда находятся внутри этой трубки.

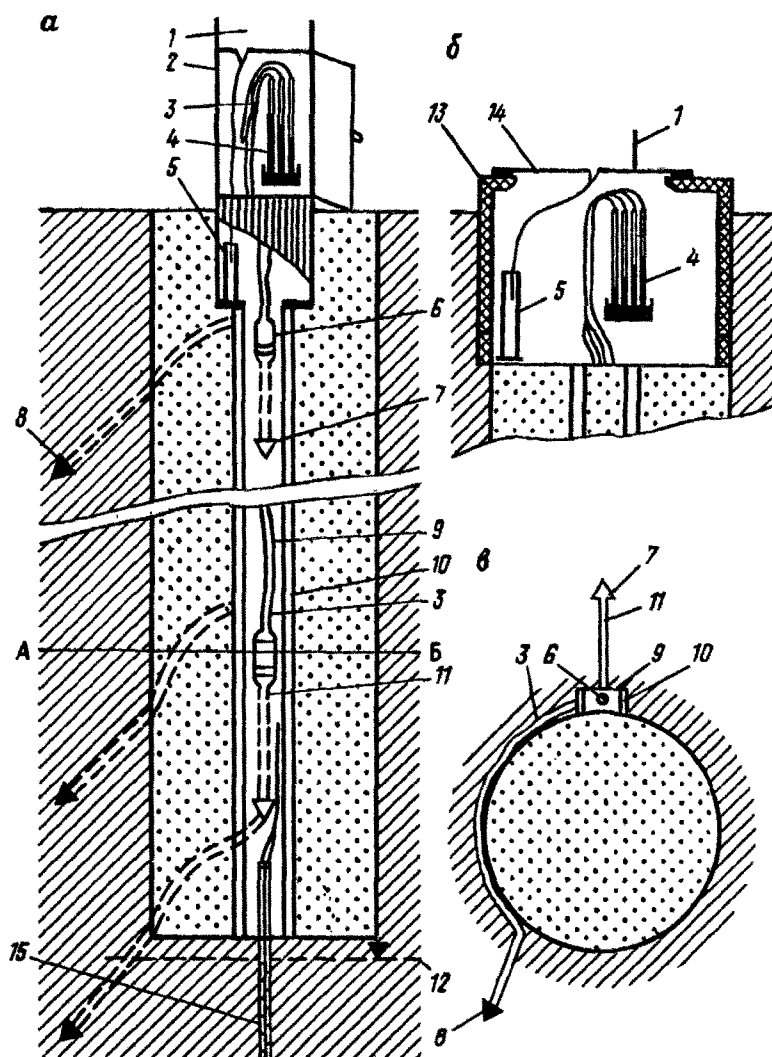


Рис. 11. Схема оборудования глубинных тензиометров в шурфе:

а — продольный разрез шурфа; **б** — оголовок из бетонного кольца; **в** — поперечный разрез по линии А—Б. 1 — осадкомар; 2 — короб металлический; 3 — воздухопроводные трубки; 4 — ртутный манометр; 5 — мерный сосуд; 6 — воздухоуловитель глубинного тензиометра; 7 — зонд глубинного тензиометра; 8 — зонд пробоотборника; 9 — проем; 10 — крепление из досок; 11 — водоводная трубка; 12 — уровень грунтовых вод; 13 — бетонное кольцо; 14 — крышка; 15 — уровень

В дальнейшем концы трубок выводят на поверхность земли. Для проверки всех приборов на герметичность в тензиометрах с помощью вакуумного насоса создается разрежение от -80 до -90 кПа. Постоянство показаний манометров в течение $0,5$ – 1 ч свидетельствует о при-

годности приборов к работе. Выявленные неисправности устраняют по отдельным звеньям системы. После устранения неисправностей, настройки тензиометров и размещения приборов на поверхности в коробе, ниша, в которой находятся балластные сосуды и воздухопроводные трубки, закрывается по всей глубине шурфа досками и шурф засыпается грунтом; грунт трамбуется. Такая последовательность работ гарантирует надежность действия тензиометров и точность измерений.

Уровнемеры и пробоотборники

Для установки пневматического уровнемера с поверхности земли или с забоя шурфа бурится скважина, которая заглубляется ниже уровня грунтовых вод и обсаживается трубами. Диаметр скважины должен на 25–50 мм превышать диаметр прибора.

Прибор размещается в скважине с таким расчетом, чтобы уровень грунтовых вод находился примерно в его средней части. Если ожидается подъем уровня, то нижний конец прибора следует устанавливать под воду на 0,15–0,2 м, и, наоборот, если ожидается понижение уровня, то такая часть прибора оставляется над уровнем воды в скважине.

Глубинные пробоотборники устанавливают в отдельные скважины соответствующей глубины, причем на забое скважины с помощью гладкого конического наконечника выдавливается гнездо, в которое помещается пористый зонд, расположенный в нижней части пробоотборника. Концы воздухопроводных трубок выводят на поверхность земли и размещают в металлической трубе. Скважина после установки прибора тампонируется грунтом, а обсадные трубы извлекаются.

При отборе проб порового раствора (вакуумной вытяжки) монтируются сосуд для сбора воды и балластный сосуд (см. рис. 8).

Чтобы исключить влияние отбора порового раствора (в результате уменьшения влажности грунта) на показания тензиометра, пробоотборник следует располагать на расстоянии не менее 2 м от зонда ближайшего тензиометра.

В шурфе пробоотборники и тензиометры устанавливают на противоположных стенках.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ И ИНФОРМАТИВНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ

Достоверность измерения всасывающего давления влаги почвенными и глубинными тензиометрами

Тензиометрический метод измерения влажности почвы применяется на протяжении нескольких десятилетий, и его эффективность и надежность в условиях орошения доказана [7, 11, 27, 28]. В течение последнего

десятилетия за границей тензиометры успешно используются в качестве индикаторов полива растений. Поставив перед собой задачу разработки простых и надежных методов изучения водного режима зоны аэрации в полевых условиях, естественно было обратиться к тензиометрическому методу.

Вначале необходимо было выяснить, обладает ли этот метод достаточной точностью и надежностью при использовании почвенных тензиометров для изучения всасывающего давления в зоне аэрации мощностью до 20 м. Для решения поставленной задачи были разработаны и испытаны способ установки почвенного тензиометра в шурфах на указанных глубинах и конструкция сборного почвенного тензиометра.

Первые испытания проводились в покровных лёссовых суглинках и глинах на Украине и в Сыртовом Заволжье. При этом исследовались различные конструкции опытных шурфов, изменялись расстояния от стенки шурфов, на которых устанавливали зонды тензиометров, и интервалы установки зондов, изучалась изменчивость значений всасывающего давления.

Особенно много было проведено систематических наблюдений, которые позволяли сопоставить данные измерений всасывающего давления по тензиометрам, установленным на одинаковых глубинах. При этом установлено, что всасывающее давление, измеренное в рядом расположенных зондах тензиометров, практически совпадало или отличалось незначительно.

На опытных площадках, орошавшихся поливальными машинами "Фрегат" на Керченском п-ове, были проведены массовые измерения величины всасывающего давления тензиометрами, установленными на глубинах 0,3 и 0,5 м от поверхности земли. Результаты наблюдений представлены на рис. 12. Наблюдения были проведены в сложных условиях неоднородного строения покровных отложений и неравномерного водопоступления на поверхность, однако анализ полученных графиков свидетельствует о четкой реакции всасывающего давления на поливы и выпадение осадков по всей площади. Значительная часть тензиометров дает близкие значения высоты всасывания. Однако по отдельным тензиометрам, установленным на глубинах 0,3 и 0,5 м, отклонения значений этого показателя иногда составляют 1, 2 и даже 3 м. Несомненно, такие отклонения обусловлены наличием особых причин для создания очагов повышенного увлажнения грунтов.

После разработки конструкции глубинного тензиометра необходимо было выяснить достоверность результатов измерений всасывающего давления влаги новым прибором. Для оценки достоверности и сопоставимости измерений всасывающего давления почвенными и глубинными тензиометрами были проведены опыты в лабораторных и полевых условиях.

В лабораторных условиях исследовался образец грунта ненарушенной структуры цилиндрической формы высотой 25 см и диаметром

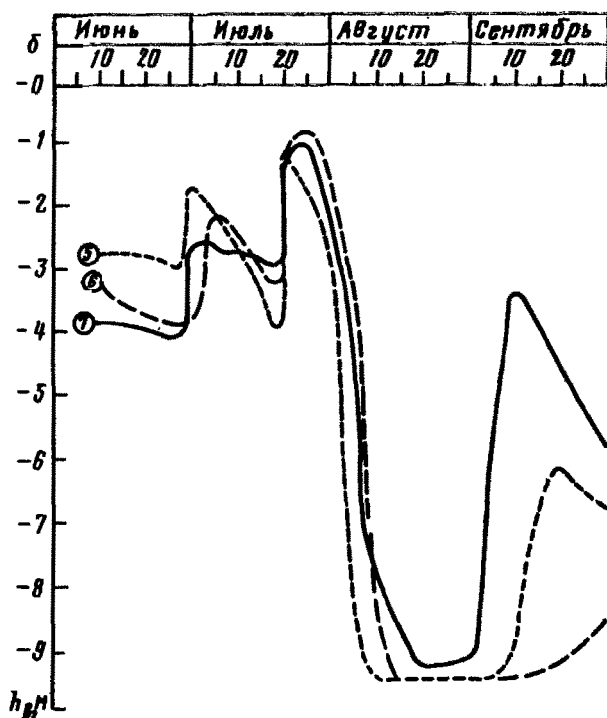
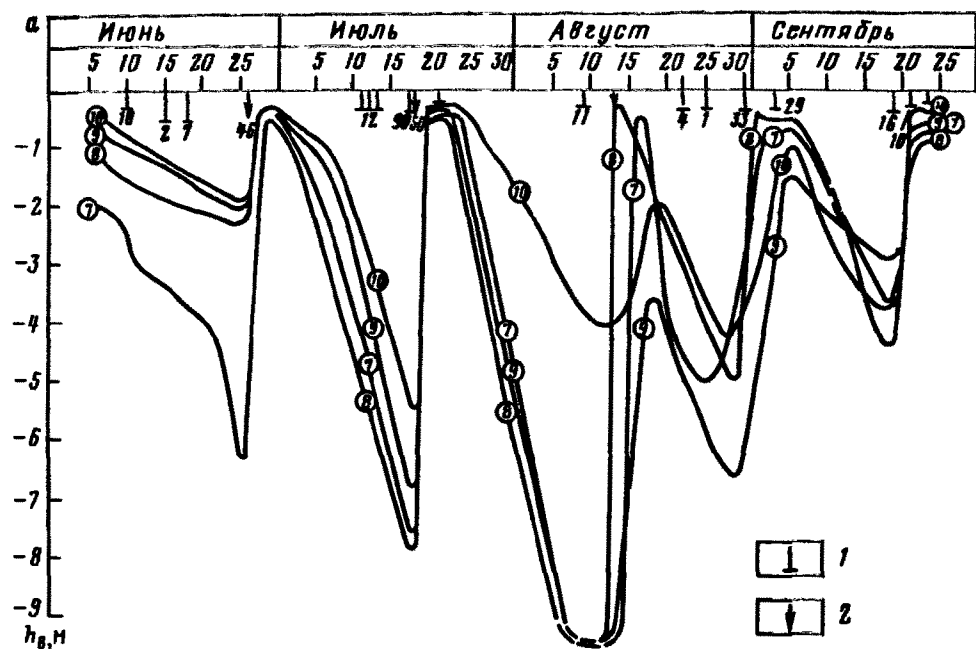


Рис. 12. Графики изменения высоты всасывания $h_{в}$ по данным тензиометров, установленных на глубинах 0,3 (а) и 0,5 м (б):

1 — даты выпадения и количество (в мм) осадков; 2 — даты и величина (в мм) поливов. Цифры в кружках — номера тензиометров

18 см. В его центре (по высоте) был установлен керамический зонд, с помощью которого путем задания разрежения производилось обезвоживание и увлажнение грунта. С противоположных сторон на боковую поверхность образца установлены почвенный и глубинный тензиометры (рис. 13). Разрежение в рабочем зонде задавалось ступенями с таким расчетом, чтобы абсолютные значения и скорость изменения всасывающего давления влаги в образце грунта соответствовали величинам, характерным для природных условий.

Для проверки инерционности тензиометра в испытываемой схеме в воздухоуловителе было оставлено примерно 50 см^3 воздуха, что соответствует глубине заложения зонда 20–30 м.

Результаты опыта, приведенные на рис. 13, а, показывают, что значения высоты всасывания влаги, фиксируемые глубинным тензиометром, при иссушении образцов оказались выше, чем значения, полученные на почвенном тензиометре. При увлажнении образца высота всасывания по глубинному тензиометру оказалась меньше на 0,1–0,15 м. Относительная погрешность измерения давления в таких условиях не превышает 10 %, а разный знак погрешности объясняется воздействием инерционности.

Объективные данные о точности измерений глубинными тензиометрами в полевых условиях получены в результате их сопоставления с измерениями, выполненными почвенными тензиометрами, надежность и точность которых установлены в результате продолжительного применения их на практике.

При проведении режимных исследований институтом Укргипроводхоз на опытно-производственном участке в колхозе "Прогресс" Приазовского района для измерения всасывающего давления использовались почвенные тензиометры, установленные в шурфах. Для сопоставления данных наблюдений на исследуемом участке были оборудованы глубинные тензиометры в скважинах, расположенных в 5 м от шурфа. На рис. 14 представлен хронологический график изменения напоров, составленный по результатам наблюдений.

Прежде всего отметим, что результаты измерения всасывающего давления, полученные почвенными и глубинными тензиометрами, установленными в скважинах на одной глубине, весьма близки между собой. Так, на наблюдательной площадке I, где на глубине 3 м был установлен один почвенный тензиометр и два глубинных (в рыхлый грунт центральной скважины и в целик специально пробуренной скважины), на протяжении времени их устойчивой работы (с 20 августа по 13 сентября) высота всасывания по почвенному тензиометру на 0,4–0,6 м выше, чем значения, полученные глубинными тензиометрами. При этом расхождение показаний двух глубинных тензиометров составляет не более 0,2 м.

Особый интерес представляет сопоставление данных, полученных институтом Укргипроводхоз, с результатами наблюдений, проведенных

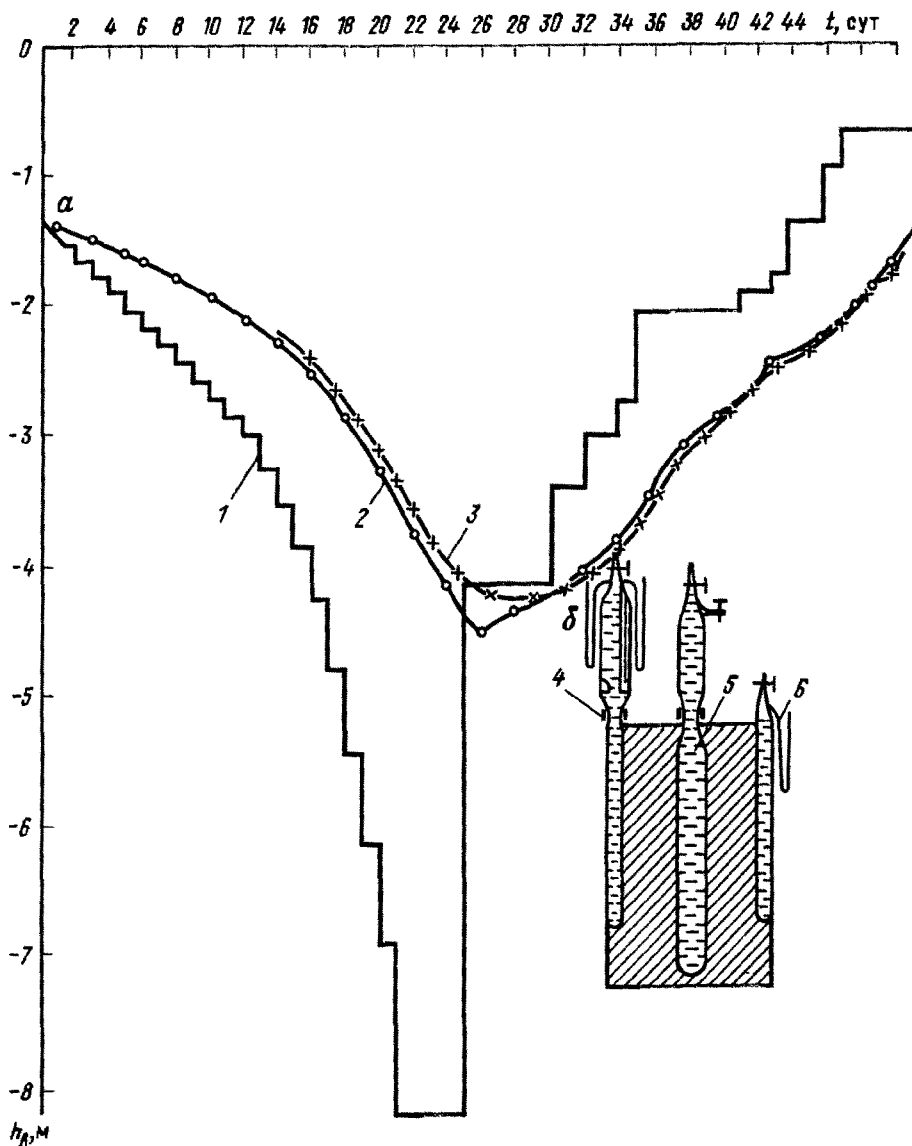


Рис. 13. Сопоставление величин высоты всасывания при измерениях почвенным и глубинным тензиометрами:

а — график изменения высоты всасывания; *б* — схема установки. 1 — задаваемая величина высоты давления; 2, 3 — изменения высоты всасывания, установленное почвенным (2) и глубинным (3) тензиометрами; 4 — глубинный тензиометр; 5 — дренажный зонд; 6 — почвенный тензиометр

экспедицией Киевского государственного университета (КГУ) с помощью глубинных тензиометров. По данным, приведенным на рис. 14 для глубины 3 м, расхождение высот всасывания, фиксируемых в шур-

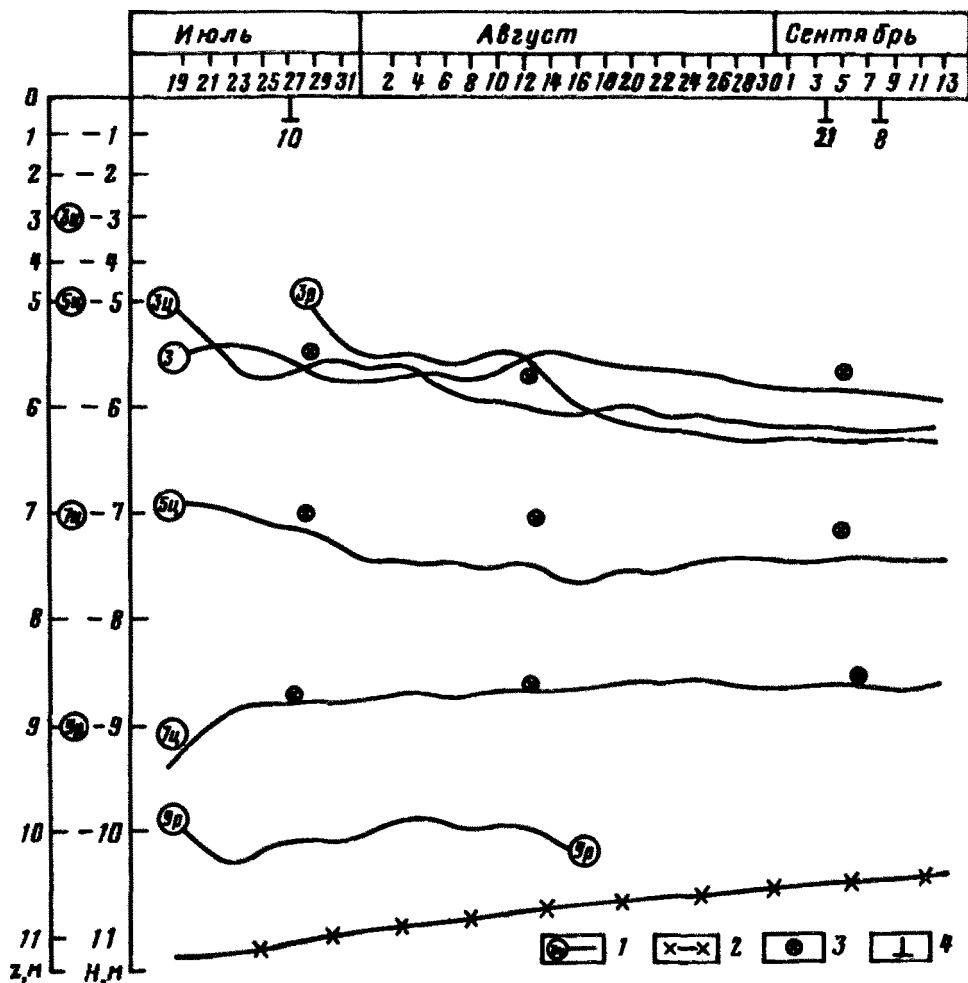


Рис. 14. Хронологический график изменения напоров (Приазовье):

1 — графики изменения напора и места установки тензиометра (цифры — номера тензиометров; буквы: ц — глубинный тензиометр, установленный в целик грунта; р — то же, установленный в рыхлый грунт); 2 — уровень грунтовых вод; 3 — значения напора по данным Укргипроводхоза; 4 — даты выпадения осадков (цифра — величина осадков, мм)

фах Укргипроводхоза почвенными тензиометрами, с данными КГУ по глубинным тензиометрам в период с 19 июля по 14 августа достигает $-0,2$ м, а в дальнейшем, включительно по 10 сентября, не превышает $-0,5$ м.

На глубине 5 м в начальный период наблюдений значения высоты всасывания, зафиксированные разными тензиометрами, практически совпадают. Начиная с 30 июля показания почвенного тензиометра изменяются незначительно в течение всего периода наблюдений, а показания глубинного тензиометра с 30 июля по 2 августа уменьшаются

Таблица 1. Пределы колебания высоты всасывания по периметру расчетных сечений в опытном шурфе (Сыртовое Заволжье)

Номер расчетного сечения (тензиометра)	Глубина от поверхности земли, м	Всасывающее давление влаги, МПа	
		Предельные значения	Среднее
1	0,7	1,6—0,5	1,06
2	1,0	1,4—0,8	1,1
3	1,5	0,2—0,2	0,2
4*	2,0	0,4—0,2	0,3
7	4,0	1,1—0,3	0,7
8*	5,0	0,5—0,1	0,3
9*	6,0	1,0—0,2	0,6
11	8,0	1,0—0,3	0,6
12	9,0	0,8—0,2	0,5

* В отдельные моменты отмечено совпадения значений всасывающего давления влаги

на $-0,4 \dots -0,5$ м, и в дальнейшем линии напоров с разницей в $-0,4 \dots -0,5$ м идут параллельно до конца наблюдений. Линии, характеризующие изменение напоров на глубине 7 м, различаются не более чем на 0,2 м.

По данным наблюдений в Сыртовом Заволжье, при замерах высоты всасывания в одно и то же время несколькими тензиометрами (по два прибора в каждом расчетном сечении), установленными по периметру шурфа, расхождения в основном составляют доли метра (табл. 1). Такого же порядка расхождение высоты всасывания отмечается и в разных шурфах на одинаковой глубине.

Значительный интерес представляет сравнение данных о влажности грунтов, полученных при использовании почвенных и глубинных тензиометров. Для этого, воспользовавшись основной гидрофизической характеристикой $\theta(p)$ соответствующих грунтов, произвели пересчет всасывающего давления в величину объемной влажности грунтов (см. табл. 1).

Из табл. 2 видно, что значения объемной влажности по разным определениям колеблются в пределах 0,1—0,9 % (максимум 1—1,2 %), что также свидетельствует о высокой точности тензиометрического метода наблюдений.

Приведенные данные дают основание для следующих выводов.

1. Почвенные и глубинные тензиометры обладают одинаковой точностью. При измерении всасывающего давления в одном постоянном сечении погрешность измерений составляет не более $\pm 10\%$.

Таблица 2. Величины высоты всасывания и влажности грунта, полученные почвенными тензиометрами в шурфах (данные Укргипроводхоза) и глубинными тензиометрами в скважинах (данные КГУ)

Глубина заложения зонда	Дата	Высота всасывания, м			Пересчет на объемную влажность, %		
		по данным КГУ	по данным Укргипроводхоза	Разность	по данным КГУ	по данным Укргипроводхоза	Разность
Площадка I (орошаемый участок)							
3 м	25/VII	-2,75	-2,45	-0,30	27,0	27,5	0,5
	5/VIII	-2,70	-2,50	-0,20	27,0	27,4	0,4
	1/IX	-3,40	-2,70	-0,70	26,0	27,0	1,0
5 м	20/VII	-1,90	-2,05	-0,15	30,2	29,9	0,3
	16/VIII	-2,65	-2,05	-0,60	28,6	29,9	1,3
	10/IX	-2,50	-2,10	-0,40	28,9	29,8	0,9
7 м	20/VII	-2,00	-1,65	-0,35	31,6	32,5	0,9
	16/VIII	-1,70	-1,75	-0,05	32,3	32,2	0,1
	10/IX	-1,75	-1,75	0	32,2	32,2	0
Площадка II (неполивной участок)							
1 м	30/VIII	-5,30	-5,00	-0,30	26,4	26,6	0,2
	6/IX	-2,30	-3,10	-0,80	28,6	26,8	1,8
	10/IX	-4,10	-2,80	-1,30	27,0	28,0	1,0
	13/IX	-3,80	-3,00	-0,80	27,8	27,8	0,0
3 м	30/VIII	-3,55	-3,50	-0,05	25,8	25,7	0,1
	6/IX	-3,60	-3,30	-0,30	25,7	26,1	0,4
	10/IX	-4,10	-3,20	-0,90	25,0	26,2	1,2
	13/IX	-4,20	-3,50	-0,70	24,9	25,8	0,9
5 м	30/VIII	-4,25	-4,00	-0,35	25,9	26,2	0,3
	6/IX	-4,70	-4,00	-0,70	25,5	26,2	0,7
	10/IX	-4,80	-4,00	-0,80	25,4	26,2	0,8
	13/IX	-4,80	-4,00	-0,80	25,4	26,2	0,8
9 м	30/VIII	-2,0	-2,5	-0,5	31,6	30,4	0,7
	6/IX	-2,5	-2,5	0	30,9	30,9	0,0
	10/IX	-2,8	-2,5	-0,3	30,6	30,9	0,3
	13/IX	-2,9	-2,5	-0,4	30,5	30,9	0,4

2. Пространственная изменчивость свойств суглинистых грунтов, слагающих зону аэрации, обуславливает заметные колебания высоты всасывания. По данным исследований, амплитуда изменения высоты всасывания в слоях однородного строения может быть оценена величинами порядка 1 м, на глубинах до 1 м и в особых случаях (при воздействии каких-либо временных причин) амплитуда колебаний этого показателя может возрастать до 3 м. На больших глубинах простран-

ственные изменения гранулометрического состава грунтов обуславливают изменения высоты всасывания в пределах 0,5 м.

Апробация разработанных методов показала их удовлетворительную точность, что и дало основание для применения их на практике. Эти методы были использованы при изучении мелиоративно-гидрогеологической обстановки Каховской, Приазовской и Явкинской оросительных систем, Кодненской осушительной системы, а также оросительной системы на базе Саратовского канала. Материалы исследований дали настолько обширную информацию, что оказалось возможным на основе ее обобщения выявить ряд закономерностей формирования водного режима орошаемых территорий [26, 28].

В качестве примера эффективности гидрофизического метода наблюдений ниже приведены основные результаты исследования водного режима на одном из самых сложных объектов.

Особенности формирования водного режима грунтов зоны аэрации в условиях орошения (Керченский п-ов)

Водный режим на опытном участке изучался путем проведения тензиометрических измерений в трех шурфах, два из которых находились в пределах площади, которая должна была орошаться, а один — на бугре. В поливной период продолжались наблюдения в шурфах, а также на 12 наблюдательных площадках, расположенных на орошаемом поле. Такое значительное число объектов наблюдений обусловлено тем, что водный режим орошаемых земель формировался в нетипичных сложных условиях. Прежде всего необходимо отметить недостаточную регулировку поливной установки "Фрегат", в результате чего интенсивность полива на орошаемом поле изменялась в 2—3 раза. По этой причине, а также в результате несовершенной планировки поверхности поливной карты, вода перераспределялась на поверхности и скапливалась в микропонижениях рельефа, образуя лужи. В таких условиях увлажнение грунтов по площади было неравномерным: перенос влаги под отрицательными формами рельефа был более интенсивным и усложнялись условия формирования водного режима. Режимными наблюдениями был зафиксирован крайне неравномерный по площади подъем поверхности грунтовых вод: за трехлетний период наблюдений в пределах поливной карты образовались купола и депрессии поверхности грунтовых вод с амплитудой в несколько метров (рис. 15).

Все указанные особенности формирования водного режима были обнаружены при проведении гидрофизических наблюдений. Необходимо подчеркнуть, что значительное различие характеристик водного режима зоны аэрации по площади было зафиксировано в доливной период, т. е. в естественных условиях. То же подтверждают данные о распределении напоров, наблюдаемых в шурфах 1, 2 и 3 в доливной период (рис. 16). Шурфы расположены на опытном участке, два из них (1 и 2)

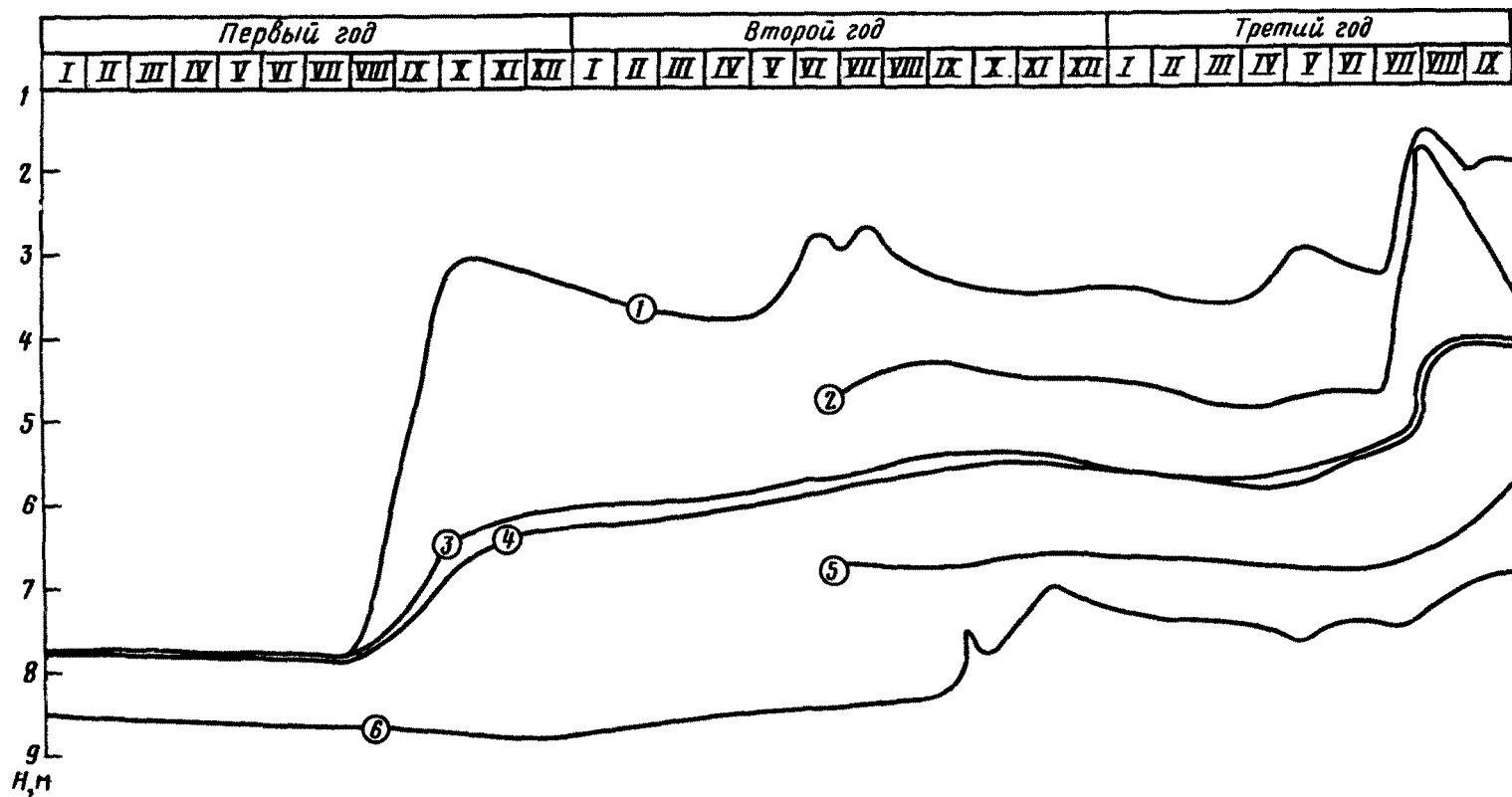


Рис. 15. Графики колебаний уровня грунтовых вод:

Цифры в кружках — номера наблюдательных скважин и шурфов

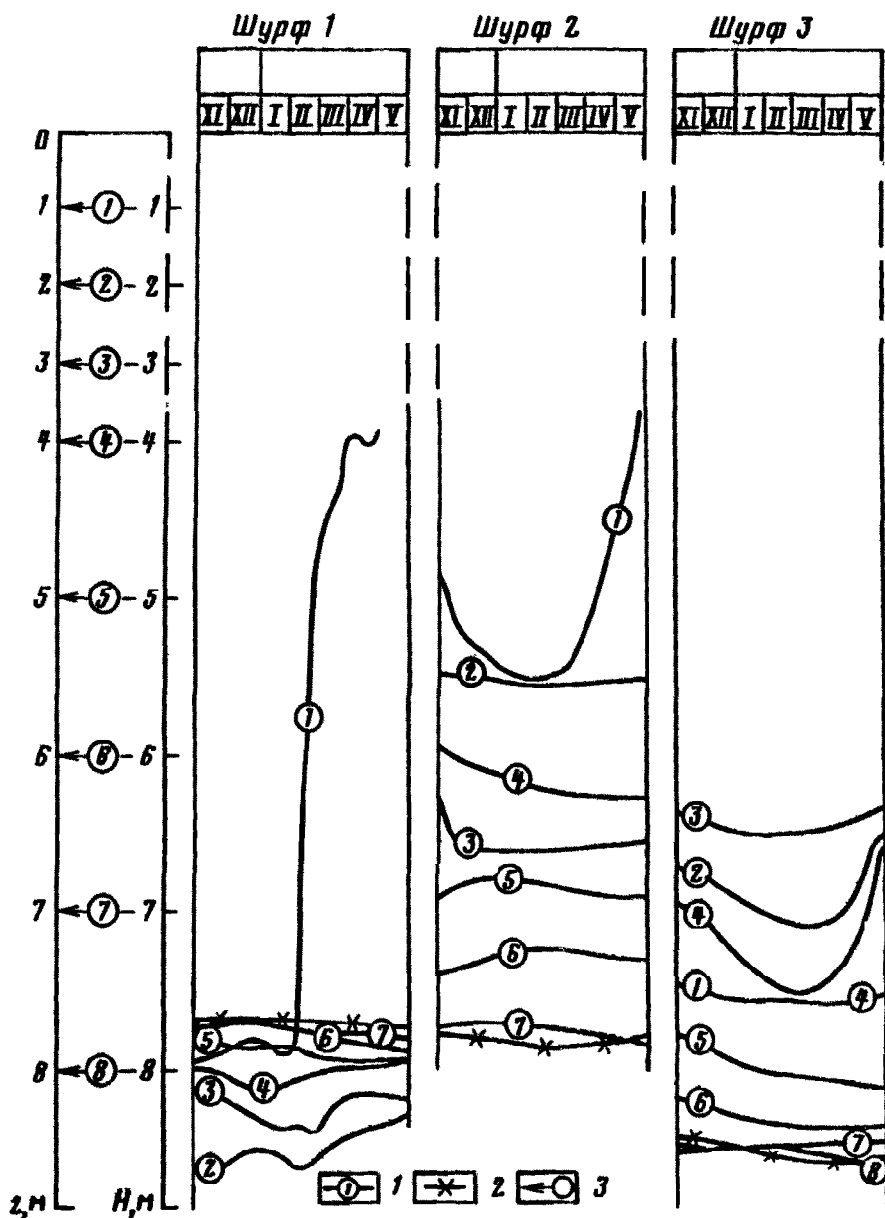


Рис. 16. Графики изменения напоров по глубине зоны аэрации:

1 — кривая изменения напора (цифры в кружках — номера тензиометров); 2 — уровень грунтовых вод; 3 — место заложения тензиометра

находятся в средней части орошаемого машиной "Фрегат" поля на расстоянии 20 м друг от друга, шурф 3 — на богаре в 0,4 км от них.

В шурфе 1 в течение рассматриваемого периода значения напоров указывают на восходящее движение влаги от уровня грунтовых вод

(7, 8 м) и нисходящее от поверхности земли до глубины 2 м. В шурфе 2 в это время влага с глубины 4 м до уровня грунтовых вод движется вниз, а с глубины 3 м — вверх. От поверхности земли до глубины 3 м влага перемещается вниз. В шурфе 3 нисходящее движение наблюдается в 5,5-метровой толще грунта — с глубины 3 м до уровня грунтовых вод (8,5 м). В интервале глубин от 3 до 1 м движение восходящее и в интервале от поверхности земли до глубины 1 м, по-видимому, нисходящее, так как интенсивность увеличения напора на глубине 1 м больше, чем на глубине 2 м, да и рост его начался раньше, что дает основание считать возможным поступление влаги сверху.

Заметим также, что в активной, верхней части зоны аэрации процесс влагопереноса более сложен, чем в нижней. Такая направленность движения влаги в верхней части зоны аэрации в данном случае может быть объяснена периодичностью выпадения осадков в вегетационный период, что вызвало волнообразное движение фронта увлажнения, а затем иссушения с глубиной.

Различное направление движения влаги по глубине в зоне аэрации указывает на то, что площадки находились в разных условиях. Естественно, что разным будет и распределение по глубине значений высоты всасывания, разными будут эпюры влажности грунтов.

Наиболее вероятная причина, вызывающая эти различия, особенно в верхней части зоны аэрации, — неравномерное распределение влаги по площади. Действительно, во время интенсивных поливов повсеместно по полю наблюдаются лужи различных размеров и форм.

Влиянием этого фактора могут быть объяснены значительные расхождения величин напоров, фиксируемые в пределах одной опытной площадки (шурф 1), где зонды тензиометров были заложены на глубине 1 м на расстояниях 1–2 м друг от друга. На рис. 17 видно, что тензиометр 1 при напоре в конце июня порядка –7 м среагировал на поливы лишь в конце августа после пятого полива. Тензиометром 2 поступление влаги на глубину 1 м зафиксировано 2 августа после третьего полива. Тензиометры 3 и 4, установленные соответственно 30 июля и 15 августа, интенсивные изменения напора отметили лишь после полива в начале октября (см. рис. 17).

Результаты этих наблюдений указывают на то, что грунт в отдельных местах, будучи однажды увлажненным, в дальнейшем обладает повышенной водопроницаемостью. Действительно, тензиометр 2 начиная со 2 августа, а тензиометр 1 с конца августа реагируют на каждый последующий полив. В данном случае, по-видимому, образуются отдельные зоны с хорошей водопроводимостью, по которым вода перемещается избирательно. Эти же данные указывают на то, что наличие столь значительной разницы в величинах напоров на одной глубине обуславливает возможность горизонтального перемещения влаги, а следовательно, возможность двухмерного движения влаги в зоне аэрации, в частности

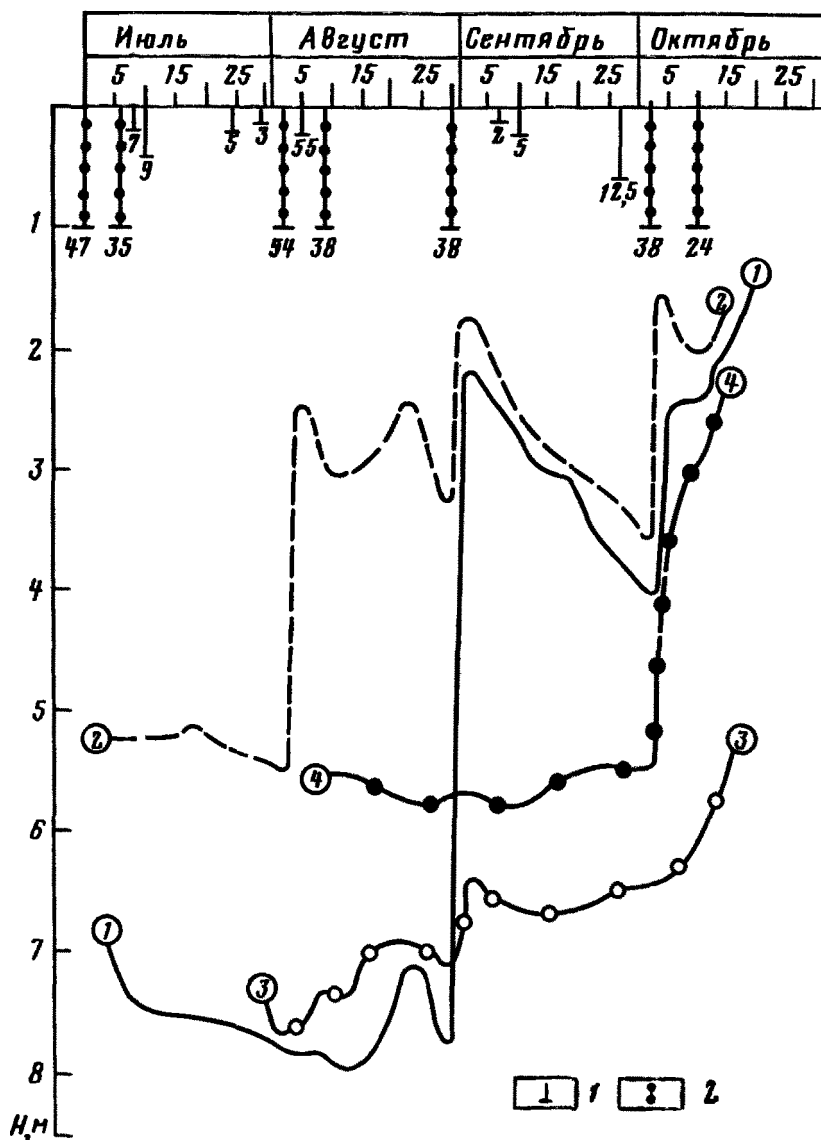


Рис. 17. Графики изменения напоров по показаниям четырех тензиометров, установленных на глубине 1 м:

1 — даты выпадения и количество (в мм) атмосферных осадков; 2 — даты и норма (в мм) поливов. Цифры в кружках — номера тензиометров

в верхней ее части. Существование такого движения подтверждается данными изменения напоров на площадке шурфа 3 (рис. 18). Здесь в конце сентября — начале октября после выпадения осадков (42 мм) и полива (6 мм), а также возможного поступления воды за счет поверхностного стока начинает сначала медленно, а затем интенсивно расти на-

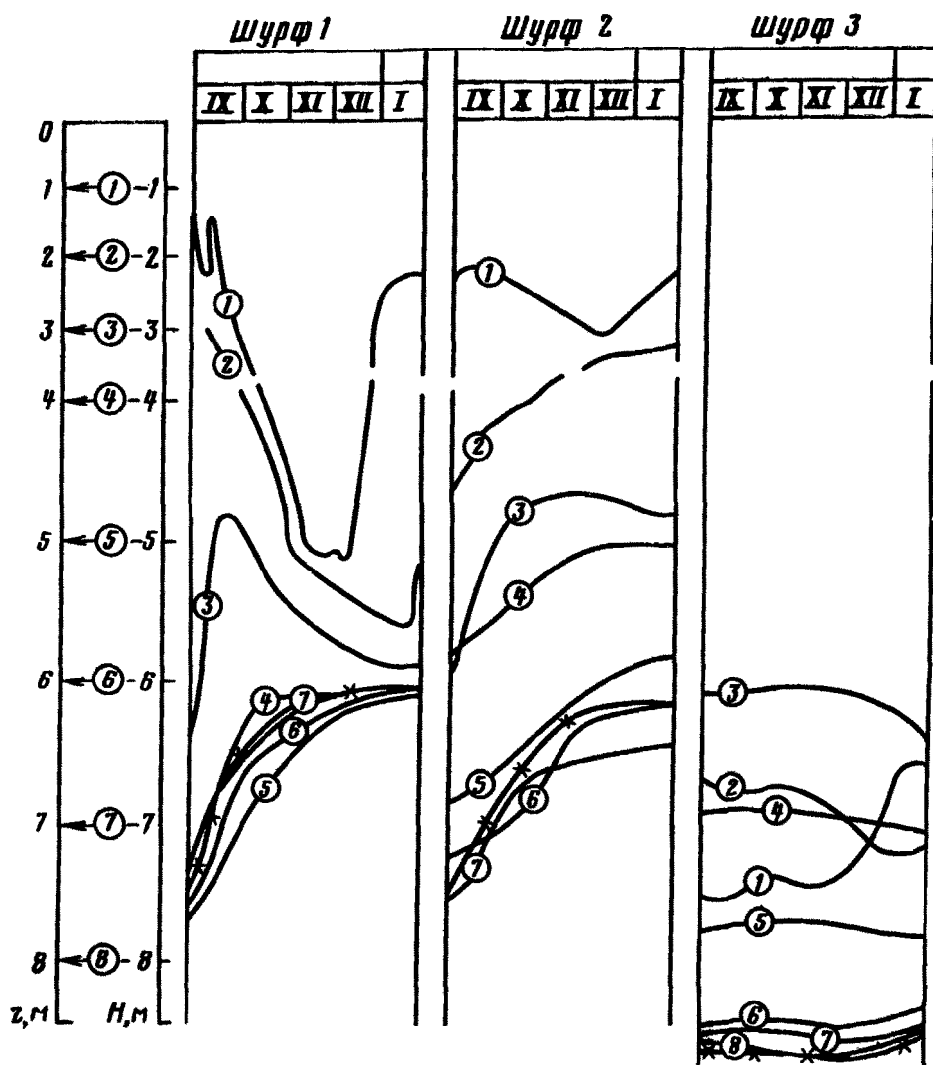


Рис. 18. Графики изменения напоров по глубине зоны аэрации:

Условные обозначения см. на рис. 16.

пор на глубине 3 м, а позже с отставанием на 2 сут — на глубине 2 м. Спустя примерно 4 сут, практически одновременно, начался интенсивный рост напоров во всей зоне аэрации. Причем с глубины 4 м (не исключено, что менее интенсивный рост напоров на той глубине вызван техническими причинами) и ниже наблюдается последовательный рост напоров, т. е. фиксируется нисходящий поток вплоть до уровня грунтовых вод. Тензиометр, установленный на глубине 1 м, отметил интенсивный рост напоров лишь спустя 4–5 сут, а максимальный напор зафиксирован примерно на 10 сут позже, чем на глубине 2 м. По-видимому, влага в интервале глубин 2–3 м поступала не сверху, а со стороны, т. е. ее

движение было горизонтальным. Не исключено, что увлажнение грунта выше 3 м в период с 1 по 4 октября связано с поступлением влаги снизу, так как выше был меньший напор, и, таким образом, существовало восходящее движение влаги.

Необходимо отметить, что описанный процесс роста напоров, фиксируемый по показаниям тензиометров, установленных на больших глубинах, неоднократно наблюдался и на других площадках.

Рассмотрим, как влияет степень увлажнения грунта на переток влаги в приповерхностной части зоны аэрации. При значительной влажности грунтов процессы влагопереноса заметно интенсифицируются.

По данным наблюдений в шурфе 1 в июне, когда на глубине 1 м высота всасывания влаги составляла —1 м, сразу же после полива среагировал тензиометр: напор быстро увеличивался на глубине 2 м, а затем 3 м (рис. 19). Поливы в июле — августе, когда высота всасывания на глубинах 1, 2 и 3 м составляла в среднем —0,5; —1,5 и —2 м соответственно, привели к инфильтрации ирригационных вод до уровня грунтовых вод, который поднимался и после значительного уменьшения напоров (и высоты всасывания) в сентябре и октябре, когда дождей не было. Уровень грунтовых вод поднялся с августа по ноябрь на 1,7 м.

Значительный переток влаги, по данным наблюдений за скважиной 4, отмечался в поливной период, когда после влагопорядковых поливов в апреле грунты зоны аэрации были практически переувлажнены. В период с мая по 15 июля сохранялись большие значения высоты всасывания. С середины мая начался заметный подъем уровня грунтовых вод, указывающий на переток ирригационных вод. При поливе интенсивностью 40 мм, произведенном 25 июня, происходит интенсивное увеличение высоты всасывания во всей зоне аэрации, начинается подъем уровня грунтовых вод. После полива 16 июля (61 мм) и дождя 17 июля (88 мм) уровень грунтовых вод поднялся на 2,6 м.

Плохим смачиванием грунта можно объяснить тот факт, что в ряде случаев влага после поливов удерживается, как бы зависает, непосредственно в приповерхностном слое и не проникает в нижележащие слои.

Так, по графику изменения напоров в пределах наблюдательной площадки скважины 4 (рис. 20) видно, что после регулярных и достаточно интенсивных поливов практически в течение всего поливного периода влага не проникает на значительную глубину. Например, после сосредоточенных поливов в конце июня — начале июля нормой 119 мм реакция на глубинах 0,5 и 1 м была незначительной, и продолжалось иссушение грунта. На поливы в конце июля — начале августа (в сумме 121 мм) среагировали лишь тензиометры на глубинах 0,5 м и 1 м, где значения высоты всасывания достигли соответственно —5,1 и —3,7 м. После поливов в конце августа — начале сентября и выпадения атмосферных осадков (в сумме 82 мм) начался временный рост напоров на глубине

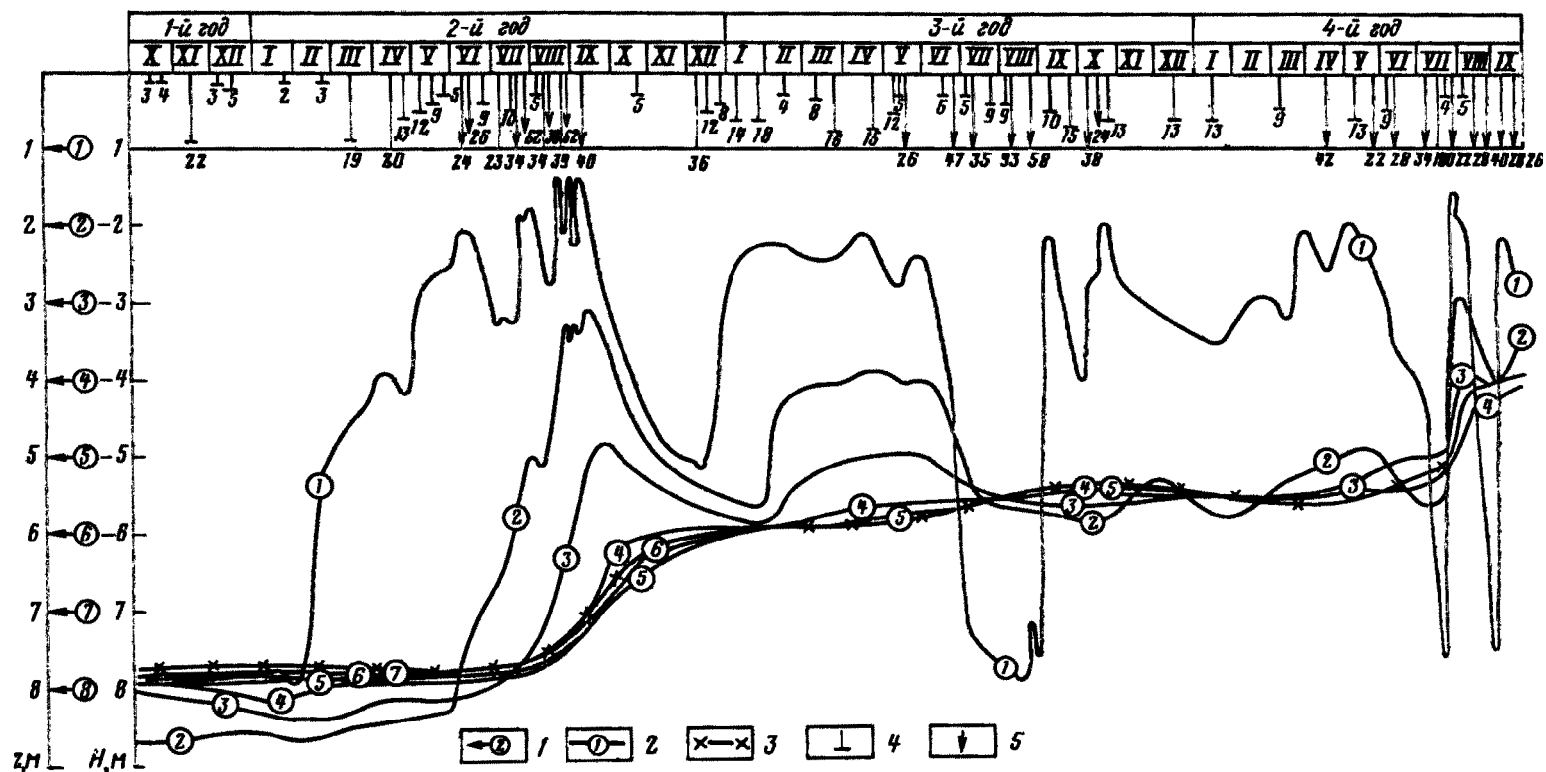


Рис. 19. Хронологический график изменения напора за четыре года:

1 — место заложения тензиометра; 2 — кривая изменения напора; 3 — уровень грунтовых вод; 4 — атмосферные осадки; 5 — поливы. Цифры в кружках — номера тензиометров, цифры без кружков — количество осадков и норма полива (в мм)

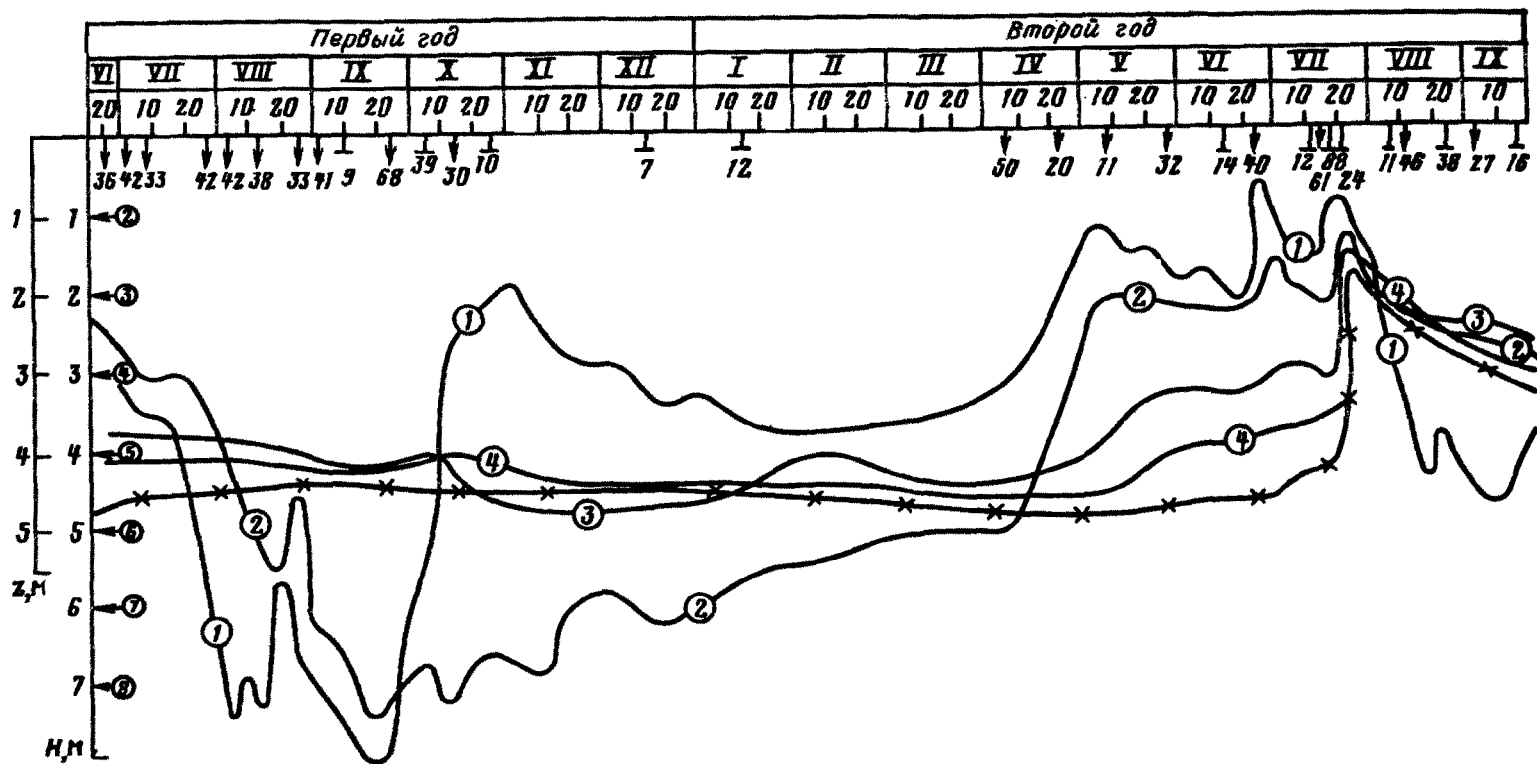


Рис. 20. Хронологический график изменения напора:

Условные обозначения см. на рис. 19

0,5 м; на глубине 1 м зафиксировано, со смещением во времени, небольшое увеличение напора. На поливы и атмосферные осадки (в сумме 145 мм) в конце сентября и в октябре заметно среагировал лишь тензиометр на глубине 0,5 м, где высота всасывания достигла —1,5 м. То, что влага практически не перетекала на уровень грунтовых вод в течение всего вегетационного периода, подтверждает его незначительный подъем примерно на 0,2 м, что в данном случае может быть объяснено поступлением вод со стороны. Эффект зависания влаги в приповерхностном слое наблюдался и на других площадках.

Процесс иссушения достаточно увлажненных грунтов под влиянием интенсивного испарения влаги с поверхности земли развивается интенсивно. С июля (см. рис. 19) четко прослеживается продвижение фронта иссушения от поверхности земли до глубины 5,5 м, т. е. до уровня грунтовых вод. По шурфу 1 были получены данные, указывающие на возможность подтягивания влаги на испарение со значительных глубин.

Отметим и такой факт — при периодических поливах в верхней части зоны аэрации в результате смены процессов увлажнения и иссушения возникает интервал, в который влага притекает или же, наоборот, вытекает из него. В обоих случаях он смещается вниз. При следующем за иссушением увлажнении возникает и перемещается вниз интервал, в который влага поступает и сверху и снизу; при смене процессов увлажнения иссушением формируется интервал, из которого влага уходит вверх и вниз. Примером могут служить данные наблюдений по шурфу 1 (см. рис. 19). Здесь в период с октября по май следующего года влага перемещалась на глубину 2 м и сверху и снизу. В июне эта зона оказалась на глубине 3 м, в июле — первой половине августа — на глубине 4 м, с сентября по ноябрь — на глубине 5 м. Здесь же в шурфе 1 через 2 года после начала наблюдений отмечалось продвижение зоны иссушения вниз. В период с 8 по 23 июня влага движется вверх и вниз с глубины 1 м, с 23 июня по 13 июля — с глубины 2 м, с 13 июля по 7 августа интервал сместился на глубину 3 м и вскоре достиг уровня грунтовых вод. С конца августа до середины октября восходящее движение влаги зафиксировано от уровня грунтовых вод до глубины 2 м, т. е. в преобладающей части зоны аэрации.

В тех случаях, когда граничные условия часто изменяются (процессы иссушения и увлажнения), происходит накладка разнонаправленных волн изменения влагопереноса, и движение влаги еще более усложняется.

При расположении поверхности грунтовых вод на глубине 1–2 м режим изменения напоров становится резко неустановившимся, и заметно преобладает восходящее движение влаги, соответствующее испарению (см. рис. 20).

Средняя скорость перемещения "волны" изменения высоты всасывания при увлажнении грунта, по данным для шурфов 1 и 2, состав-

ляет примерно 0,11 м/сут, при этом прослеживается увеличение ее с глубиной, что в данном случае объясняется повышением с глубиной влажности, а следовательно, и проницаемости грунта. Скорость перемещения волны при иссушении уменьшается с глубиной от 1 до 0,09 м/сут, что также связано с повышением влажности грунта.

Приведенные по шурфу 1 и скважине 4 данные детально рассмотрены по той причине, что в них наиболее полно отражены процессы влагопереноса за период наблюдений. Вместе с тем описанные процессы характерны для всех 12 наблюдательных площадок, которые были оборудованы на опытном участке совхоза "Семисотка". Анализ хронологических графиков изменения напоров по наблюдательным площадкам позволяет выяснить причины формирования сложного водного режима территории. Обычно на орошаемых территориях существует вертикальное однонаправленное движение влаги и поверхность грунтовых вод располагается примерно на одной глубине. На рассматриваемом объекте этого не наблюдалось. Представляет большой интерес выяснение причин наблюдаемых аномалий на основе интерпретаций данных гидрофизических наблюдений.

Обратимся снова к рассмотрению хронологического графика изменения напоров по наблюдениям в скважине 4 (см. рис. 20). В июне — августе происходило иссушение грунтов в верхней части зоны аэрации; в нижнем интервале существовало нисходящее движение при малых градиентах. Нет причин, объясняющих подъем уровня грунтовых вод в скважине 4 в июле — августе на 0,3 м, а затем его понижение с сентября по апрель следующего года, когда практически отсутствовали осадки и на глубине 3—4 м, по данным соотношения напоров, состояние влаги было близким к равновесному. Такая же картина наблюдалась и при близком залегании уровня грунтовых вод (1 и 2 м).

На площадке 1 в период с 13 по 16 августа соотношение напоров в большей части зоны аэрации указывало на восходящее движение влаги (рис. 21) и уровень грунтовых вод повышался. С 17 по 30 августа, когда напоры практически по всей зоне аэрации указывали на нисходящее движение влаги, уровень непрерывно падал.

В скважине 3 в октябре (рис. 22) уровень грунтовых вод понижался, в то время как напоры превышали отметки уровня грунтовых вод.

В шурфе 3 в период с января по апрель уровень грунтовых вод падал, в то время когда напоры указывали на нисходящее движение влаги во всей 7-метровой толще грунта зоны аэрации. Аналогичная картина в это же время наблюдалась в шурфе 2 и на других площадках.

В ряде случаев при практически одинаковых или близких значениях напора на одной и той же площадке изменение уровня грунтовых вод идет по-разному. Кроме того, часто встречаются случаи, когда количество влаги, поступившей на уровень, несоизмеримо с количеством влаги, ушедшей из зоны аэрации, и наоборот. Однако во всех этих случаях нет оснований считать сомнительными ни значения напоров в зоне

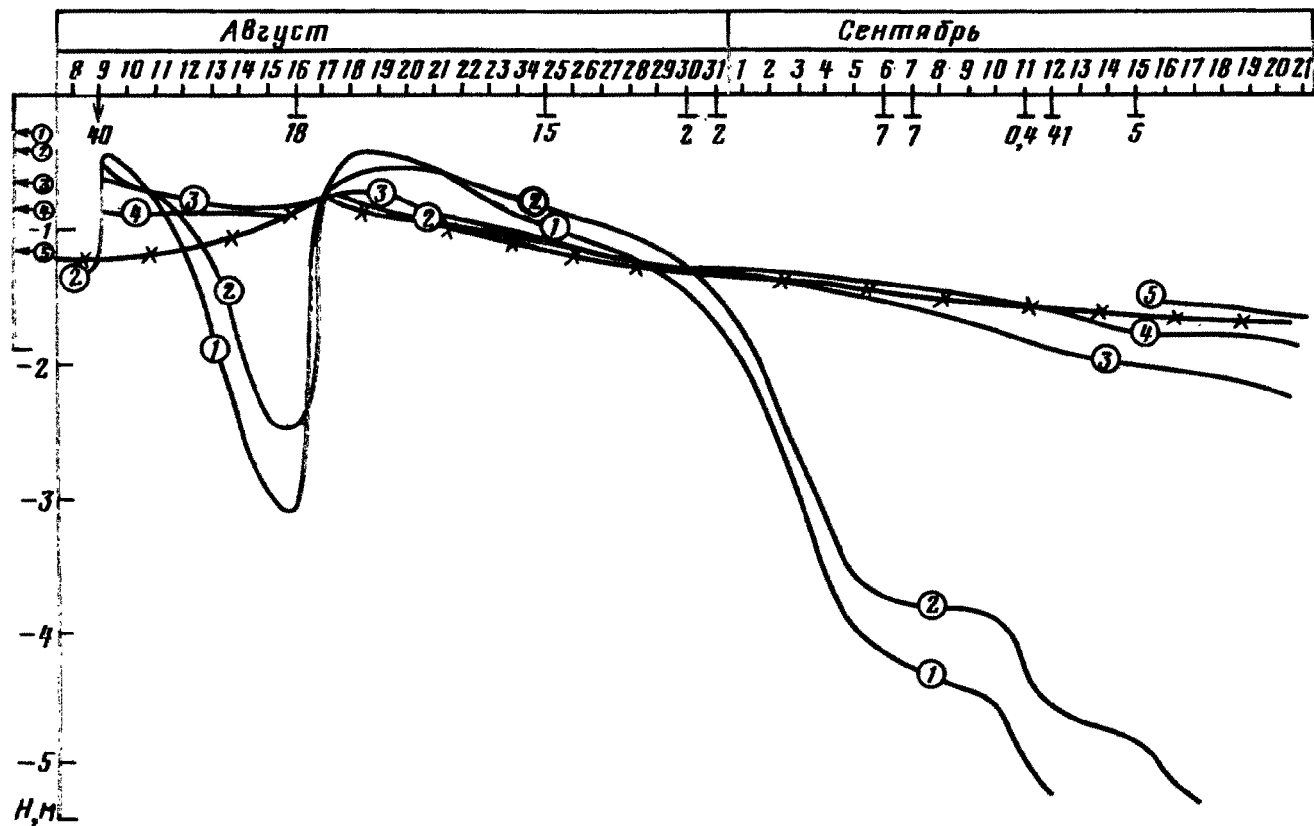


Рис. 21. Хронологический график изменения напора по данным наблюдений на площадке 1.

Условные обозначения см. на рис. 19

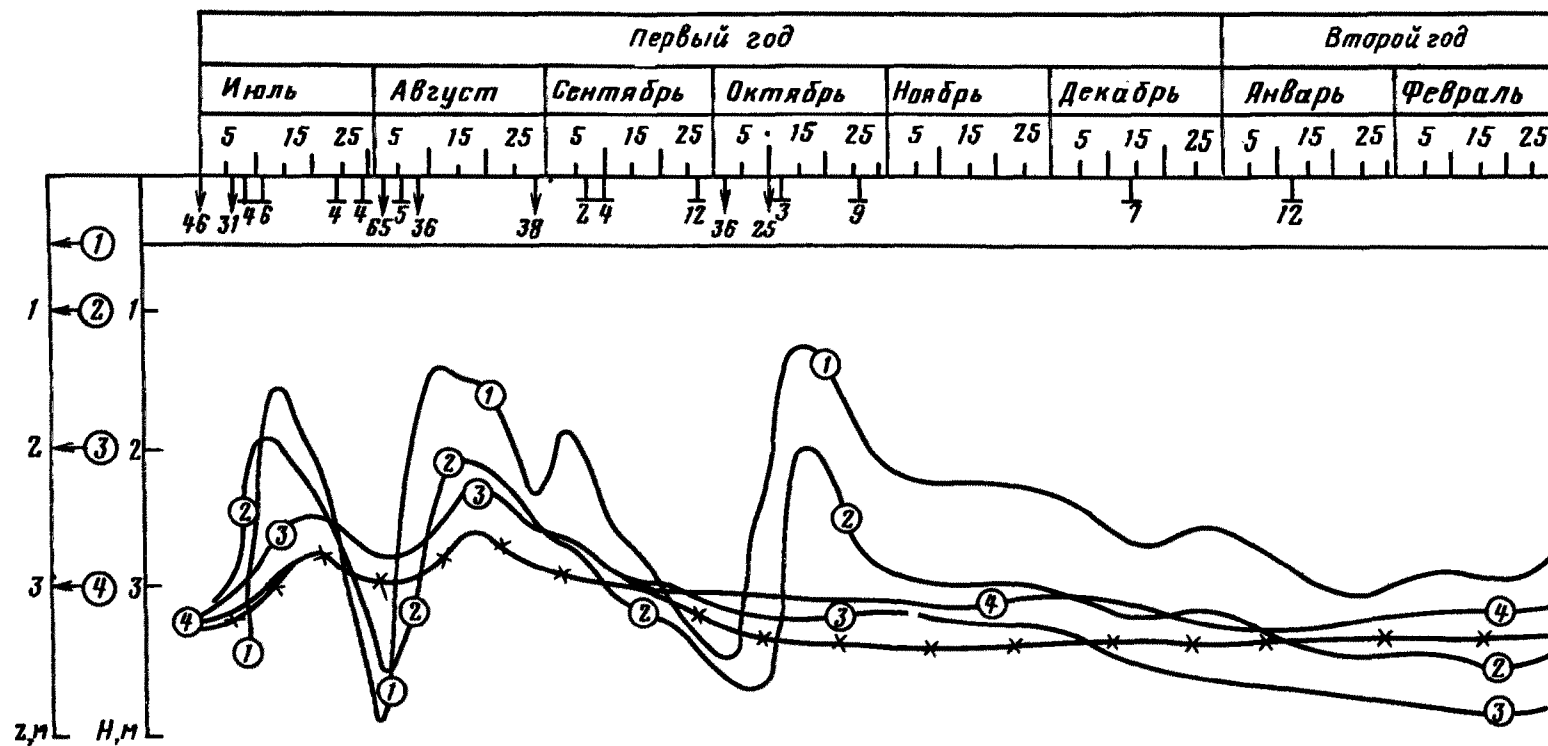


Рис. 22. Хронологический график изменения напора по данным наблюдений в скважине 3.

Условные обозначения см. на рис. 19

аэрации, ни данные о положении уровня грунтовых вод, если принять, что движение влаги в зоне аэрации, особенно нисходящее, осуществляется не сплошным фронтом, а избирательно, по отдельным "каналам" с повышенной водопроницаемостью. Размеры и расположение этих "каналов" по площади определяются, по-видимому, микрорельефом местности и структурными особенностями грунтов зоны аэрации. Нахождение таких зон под отрицательными формами рельефа наиболее вероятно. Повышенная проницаемость в них обусловлена более высокой влажностью грунта, так как на долю участков с отрицательными формами рельефа приходится большее количество атмосферных осадков и поливных вод, что, в частности, связано с перераспределением поверхностного стока.

По-видимому, через эти "каналы" перемещается вниз и попадает на уровень грунтовых вод большая часть воды. Продвижению воды к уровню грунтовых вод способствует также наличие в почвах корнеходов, ходов землероев, трещин усыхания и т. д.

Переток по "каналам" объясняет интенсивный подъем уровня воды, наблюдаемый на отдельных площадках, где образуются и срабатываются небольшие купола грунтовых вод. В связи с этим отметки уровня грунтовых вод по площади и во времени отличаются большим разнообразием.

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЖИМНО-БАЛАНСОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Организации режимно-балансовых наблюдений должно предшествовать изучение территории будущего объекта по литературным источникам, фондовым и изыскательским материалам, и обоснование выбора площадки, на которой будут разворачиваться режимно-балансовые наблюдения. Такая площадка должна быть достаточно представительной во всех отношениях — по типу водно-солевого режима (автоморфный или гидроморфный) в естественных условиях, по мощности (менее 5 м и более 5 м) и геологическому строению (сложность, наличие или отсутствие раздельных глинистых слоев, а также присутствие песчаных слоев в пределах верхней 5-метровой толщи, зоны аэрации). Площадка должна располагаться в зоне строительства сооружений, создание которых обусловит возникновение подлежащих изучению техногенных изменений водно-солевого режима и баланса.

На выбранной площадке следует пробурить разведочную скважину и после уточнения геологического разреза и гидрогеологических условий планировать режимно-балансовые наблюдения и оборудование площадки. Следует подчеркнуть, что решающим фактором при планировании работ и наблюдений является мощность зоны аэрации. В соответствии с различной мощностью зоны аэрации в табл. 3 приведен примерный

Таблица 3. Виды и объемы работ на работ на режимно-балансовой станции при различной мощности зоны аэрации более 5 м

Виды работ	Оборудование	Интервалы опробования, м	Число приборов	Интервалы опробования, м	Число приборов	Интервалы опробования, м	Число приборов	Интервалы опробования, м	Число приборов	Интервалы опробования, м	Число приборов	Интервалы опробования, м	Число приборов
Измерение всасывающего давления	Тензиометры	0,3—0,5— 1,0—1,5 2,0—3,0	6	0,3—0,5— 1,0—1,5— 2,0—3,0— 4,0—5,0 5,0	8	0,3— 0,5— 1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 4,0— 5,0— 6,0— 8,0— 10,0	11	0,3—0,5— 1,0— 1,5— 2,0—3,0— 4,0— 5,0—7,0— 10,0— 15,0—20,0	12	0,3—0,5— 1,0—1,5— 2,0—3,0— 4,0—5,0— 7,0—10,0— 15,0—20,0— 25,0—30,0—	14	0,3—0,5— 1,0—1,5— 2,0—3,0— 4,0—5,0— 7,0—10,0— 15,0— 20,0—25,0— 30,0—35,0— 40,0	16
Отбор проб на химический анализ	Пробоотборник	0,3—0,5— 1,0— 1,5— 2,0— 3,0	6	0,3—0,5— 1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 4,0— 5,0	8	0,3—0,5— 1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 4,0— 5,0— 6,0— 8,0— 10,0	11	0,3—0,5— 1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 4,0— 5,0— 7,0— 10,0— 15,0— 20,0	12	0,3—0,5— 1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 4,0— 5,0— 7,0— 10,0— 15,0— 20,0— 25,0— 30,0	14	0,3—0,5— 1,0—1,5— 2,0— 3,0—4,0— 0,5—7,0— 10,0— 15,0— 20,0— 25,0— 30,0— 35,0—40,0	16

Изучение теплового режима грунтов зоны аэ- рации	Глубин- ные тер- момет- ры	0,5—1,0— 1,5— 2,0—3,0	5	0,5—1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 4,0— 5,0	7	0,5— 1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 5,0— 7,0— 10,0	8	0,5—1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 5,0— 10,0— 15,0— 20,0	9	0,5—1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 5,0— 7,0— 10,0— 15,0— 20,0— 25,0— 30,0	11	0,5—1,0— 1,5—2,0— 3,0—5,0— 10,0—15,0— 20,0— 25,0— 40,0	13
Опреде- ление поло- жения УГВ	Пневма- тический уро- внемар	На УГВ	1	На УГВ	1	На УГВ	1	На УГВ	1	На УГВ	1	На УГВ	1
Отбор мо- нолитов для опре- деления гидрофи- зических парамет- ров	Резу- щие коль- ца; грунто- носы	0,3—0,5— 1,0— 1,5— 2,0— 3,0	6	0,3—0,5— 1,0—1,5— 2,0— 3,0— 4,0— 5,0	8	0,3— 0,5— 1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 4,0— 5,0— 7,0— 10,0	11	0,3—0,5— 1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 7,0— 10,0— 15,0— 20,0	12	0,3—0,5— 1,0— 1,5— 2,0— 3,0— 5,0— 7,0— 10,0— 15,0— 20,0— 25,0— 30,0	13	То же	13

Продолжение табл. 3.

Виды работ	Оборудование	Интервалы опробования, м	Число приборов	Интервалы опробования, м	Число приборов	Интервалы опробования, м	Число приборов	Интервалы опробования, м	Число приборов	Интервалы опробования, м	Число приборов	Интервалы опробования, м	Число приборов
Отбор образцов для определения водно-физических и физико-механических свойств	Резущие кольца; грунтоносы	0,3—0,5— —1,0— —1,5— —2,0— —3,0	6	0,3—0,5— —1,0— —1,5— —2,0— —3,0— —4,0— —5,0	8	0,3— —0,5— —1,0— —1,5— —2,0— —3,0— —4,0— —5,0— —7,0— —10,0	11	0,3—0,5— —1,0— —1,5— —2,0— —3,0— —7,0— —10,0— —15,0— —20,0	12	0,3—0,5— —1,0— —1,5— —2,0— —3,0— —5,0— —7,0— —10,0— —15,0— —20,0— —25,0— —30,0	13	То же	13
Изучение метео-условий	Осадко-мер термо-метр	На УГВ То же	1 1	На УГВ То же	1 1	На по-верхно-сти земли То же	1 1	На поверх-ности земли То же	1 1	На поверх-ности зем-ли То же	1 1	На поверх-ности зем-ли То же	1 1

Примечание. В графах 1—6 приведены данные для различных значений мощности зоны аэрации — 1—3, 3—5, 5—10, 10—20, 20—30 и 30—40 м.

перечень видов работ на режимно-балансовых площадках и специального оборудования, монтаж которого необходим для проведения наблюдений. Указанные в табл. 3 интервалы установки тензиометров, пробоотборников и глубинных тензиометров уточняются в соответствии с конкретным геологическим разрезом объекта.

Зонды тензиометров размещаются вблизи кровли и основания каждого слоя грунта. При однородном строении и в слоях однородного литологического состава зонды располагаются в интервалах, указанных в табл. 3.

Отбор монолитов необходим для определения гидрофизических и гидрохимических параметров, их число определяется в соответствии с конкретным геологическим разрезом, причем из каждого слоя отбирается не менее двух монолитов. Для отбора монолитов проходится шурф, глубина которого соответствует мощности зоны аэрации. Размеры монолитов принимаются в соответствии с избранным способом определения параметров влагопереноса и фильтрации (см. гл. 3 и 4).

Режимно-балансовые исследования на стадии ТЭО. В период предпроектных проработок по имеющимся фондовым материалам или по данным предварительно выполненных изысканий, проводится районирование исследуемой территории с выделением: 1) областей — по типу водно-солевого режима в естественных условиях (автоморфный или гидроморфный); 2) подобластей — по мощности зоны аэрации (менее 5 м и более 5 м); 3) районов — по геологическому строению зоны аэрации (наличие или отсутствие раздельных глинистых слоев, а также песчаных слоев в пределах верхней 5-метровой толщи).

В пределах выделенных районов необходима организация режимно-балансовых наблюдений. На стадии ТЭО не представляется реальным оборудование на территории каждого района отдельной режимно-балансовой станции (РБС). Для получения необходимой информации прежде всего следует использовать материалы на региональной (опорной) сети режимно-балансовых станций. Если на существующих РБС не проводятся гидрофизические наблюдения, следует дополнительно оборудовать три наблюдательных куста для исследования водного и солевого режимов. Одновременно с организацией полевых наблюдений необходим отбор монолитов грунтов для лабораторного изучения гидрофизических параметров грунтов.

Если в пределах исследуемого объекта региональная сеть РБС отсутствует или недостаточна, т. е. не охватывает принципиально важных в мелиоративном отношении территорий (районов), выявленных в процессе районирования, необходимо начинать режимно-балансовые исследования на стадии предварительных изысканий. Однако данные об условиях формирования водного и солевого режимов, о существующем и возможном в условиях орошения инфильтрационном питании грунтовых вод и их минерализации, инфильтрационных потерях оросительной воды, а также о развитии процессов вторичного засоления в условиях

мелиорации, которые могут быть получены при использовании гидрофизических наблюдений, значительно повысят надежность ТЭО. Именно в таком направлении следует вести предварительные изыскания, поскольку сравнительно небольшие дополнительные расходы (порядка 30 тыс. руб. на типовой район) вполне себя оправдывают.

Оснащение РБС завершается установкой наземных приборов для режимных наблюдений за метеорологическими элементами — атмосферным давлением (барометр-анероид самописец), температурой (срочный, максимальный и минимальный термометры), атмосферными осадками (осадкомер), при необходимости измеряют скорость ветра и относительную влажность у поверхности земли (психрометр). Желательно проводить регистрацию испарения с помощью почвенных испарителей.

Периодичность замеров на РБС следующая. Измерения всасывающего давления, глубины уровня грунтовых вод и температуры, а также отбор проб поровой влаги на химический анализ в течение первых трех суток после оборудования станции производятся 2—3 раза в сутки с целью более точного определения условий, существовавших на исследуемой территории до начала исследований. Затем, на неорошаемых землях замеры следует проводить один раз в неделю в бездождевое время или на следующий день после выпадения осадков. Желательно в день выпадения осадков установить их количество.

На стадии ТЭО необходимо проводить кратковременные (до 10 мес.) полевые наблюдения на отдельных опорных участках и отбирать монолиты для определения гидрофизических и гидрохимических параметров. При этом целесообразно использовать упрощенные методы определения параметров по обобщенным зависимостям или с помощью простейших лабораторных опытов.

Приближенная оценка коэффициентов фильтрации и влагопереноса ненасыщенных грунтов, а также относительной влагоемкости, основанная на учете водно-физических и физико-механических свойств грунтов, при наличии общей характеристики гидрогеологического строения объекта достаточна для предварительного прогноза гидрогеологической обстановки. Такой прогноз составляется путем математического моделирования на ЭЦВМ с использованием в качестве начальных условий и коэффициентов уравнений данных, полученных при проведении указанных выше работ. Граничные условия задаются на конкретных вариантах по методу аналогий с существующими мелиоративными системами или по данным проектных проработок. Предварительный прогноз дает возможность ориентировочно оценить последствия мелиорации и наметить для следующей стадии исследований виды, объемы и оптимальные сроки проведения работ, в том числе и оборудования РБС.

Режимно-балансовые исследования на стадии технического проекта. На втором этапе режимно-балансовых исследований для обоснования технического или техно-рабочего проекта ирригационной системы планируется продолжение и углубление начатых исследований.

Основные задачи водно-балансовых исследований — конкретизация закономерностей переноса солей и влаги, а также уточнение расчетных схем влаго- и солепереноса в условиях мелиорации. Для этого обязательно проведение режимно-балансовых наблюдений, как на богарах, так и на орошаемых участках.

На этом этапе необходимы организация РБС и проведение комплексных наблюдений на протяжении минимум двух лет. Необходимы также отбор монолитов всех разностей пород для определения фильтрационных, гидрофизических и гидрогеохимических параметров и проведение всех других видов работ, предусмотренных табл. 3. Число РБС, обоснованное на предыдущей стадии, обеспечивается дооборудованием существующих опорных участков (если это целесообразно) и строительством новых станций. При этом особенности размещения наблюдательных точек на территории и глубины заложения датчиков определяются геологическими, геоморфологическими и гидрогеологическими условиями, и прежде всего наличием разделительных слоев и фациальной изменчивостью отложений.

Гидрофизические приборы и устройства, установленные на опытных площадках, пригодны для проведения длительных многолетних режимных наблюдений. Измерения можно проводить в любой момент времени, однако практически их частота зависит от направленности исследований. Опыт проведения исследований на орошаемых землях позволяет сформулировать следующие рекомендации.

В начальный период (первые 1–3 сут) проводится настройка приборов, поэтому наблюдения следует осуществлять 2–3 раза в сутки. В дальнейшем, в условиях орошения с тензиометров, заложенный в активной зоне влагообмена до глубины 5 м, показания снимаются 2–3 раза в неделю. При этом обязательно измерение всасывающего давления влаги перед каждым поливом, после окончания полива и после выпадения осадков. С тензиометров, установленных глубже 5 м и на наблюдательных площадках, заложенных на богарных участках, замеры достаточно снимать один раз в неделю. В межвегетационный период измерения проводятся 2–3 раза в месяц и учащаются в периоды оттепелей и весеннего снеготаяния. Замеры уровня грунтовых вод производятся одновременно с измерениями всасывающего давления.

На массивах, где поливы производятся впервые, пробы поровых растворов и грунтовых вод для химических анализов рекомендуется отбирать в течение первого года — в начале, середине и конце, а в последующие годы — в начале и конце вегетационного периода.

Параллельно с режимными наблюдениями за процессами в зоне аэрации в лабораториях (или полевых условиях) проводятся опыты по определению зависимостей $\theta(\rho)$, $k_B(h_2)$ (или $k_B(\rho)$), $k_F(\omega_{в.в.})$, а также полной влагоемкости, объемной массы скелета грунта и других параметров, характеризующих состояние грунтов ($\omega_{з.в}$ — объемное содержание защемленного воздуха).

Одновременно в камеральных условиях осуществляется первичная обработка данных наблюдений: определение гидродинамического напора, расчет влагозапасов зоны аэрации, расчет инфильтрационных потерь оросительной воды и инфильтрационного питания грунтовых вод.

В результате обобщения всех данных полевых наблюдений и лабораторных опытов уточняется исходная схема влагопереноса и фильтрации в ненасыщенно-насыщенных грунтах, необходимая для прогноза водного режима объекта. При этом для конкретного объекта (район, оросительная система) осуществляется типизация геологического строения зоны аэрации с целью выделения типовых разрезов для составления с помощью ЭВМ прогноза гидрогеологической обстановки при орошении. Полученные данные прогноза предназначены для обоснования проектных решений в отношении времени ввода, типов и режима действия защитного дренажа и т. п.

Режимно-балансовые наблюдения при эксплуатации оросительных систем. Режимно-балансовые наблюдения при строительстве и эксплуатации оросительной системы проводятся на основе РБС внутрихозяйственной наблюдательной сети.

Не исключено, что оставленная после окончания исследований для обоснования технического проекта сеть РБС окажется недостаточной для решения новых задач, главные из которых — контроль изменения запасов влаги в почвах и грунтах зоны аэрации, оценка инфильтрационных потерь оросительной воды, инфильтрационного питания и положения уровня грунтовых вод и их минерализации, а также контроль действия защитного дренажа и управление режимом его работы. В таких случаях анализ результатов наблюдений в период строительства ирригационной системы на существующих РБС и на первых действующих фрагментах системы позволит внести необходимые дополнения.

Следует подчеркнуть, что на внутрихозяйственной сети главным объектом гидрофизических исследований должна быть верхняя часть зоны аэрации, что позволит обоснованно регулировать мелиоративно-гидрогеологические процессы, а также режимы поливов и дренажа для обеспечения высоких урожаев сельскохозяйственных культур на поливных землях, предотвращения подтопления и засоления земель, экономного расходования оросительной воды и охраны подземной гидросферы от загрязнения.

Одна из важнейших задач наблюдений на режимно-наблюдательных площадках при орошении — оперативный контроль за содержанием влаги в почвах в пределах корнеобитаемого слоя в связи с регулированием частоты и нормы поливов. Оборудование режимно-наблюдательной площадки заключается в установлении в пределах орошаемого поля некоторого числа тензиометров в корнеобитаемом слое.

Число тензиометров в пределах одного поля орошения определяется при помощи вероятностно-статистических методов. Предварительные исследования показали, что распределение значений всасывающего

давления влаги на одной глубине и в один момент времени можно считать нормальным. Для этого случая математическая статистика предлагает ряд формул для определения необходимого числа точек наблюдений (или объема выборки), одну из которых мы приводим. Этой формулой следует пользоваться, когда точность определения интересующего нас признака неизвестна и устанавливается путем предварительного эксперимента. В этом случае на режимно-наблюдательной площадке произвольным образом (на одну глубину) устанавливается пять-шесть тензиометров. По их показаниям определяются на один момент времени среднее значение всасывающего давления влаги, стандартное отклонение и коэффициент вариации выборки. Для расчетов используются известные расчетные формулы, приведенные в работе [2].

Формула для определения числа точек наблюдений n имеет следующий вид:

$$n = \frac{t^2 (CV)^2}{(\Delta/p)^2} \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2m}} \right), \quad (13)$$

где t — критерий Стьюдента для $m - 1$ -й степени свободы; CV — коэффициент вариации выборки из m значений; Δ/p — относительная погрешность определения среднего значения (обычно принимается 5–10 %); m — число точек наблюдений, оборудованных предварительно на режимно-наблюдательной площадке (в нашем случае $m \approx 5-6$); p — среднее значение всасывающего давления влаги.

Следует отметить, что раз и навсегда установить необходимое число точек наблюдения нельзя, так как внешние условия, оказывающие влияние на процессы в зоне аэрации, постоянно меняются, что влечет за собой изменение величины коэффициента вариации, который определяется по имеющейся совокупности точек наблюдений. Таким образом, формула (1) даст множество значений n в соответствии с множеством значений CV . Тем не менее на определенном этапе колебания значений h будут стабилизироваться около какой-то цифры, которую можно принять за основу при назначении окончательного числа точек наблюдений на режимно-наблюдательной площадке. Число точек наблюдений можно получить с помощью последовательного метода, суть которого заключается в корректировке стандартного отклонения. (или коэффициента вариации) после получения каждого дополнительного наблюдения (установки нового тензиометра). В результате получается следующее множество событий:

$$2 < \left(\frac{t_{\alpha/2,1}}{C} \right)^2 S_2^2 ;$$

$$3 < \left(\frac{t_{\alpha/2,2}}{C} \right)^2 S_3^2 ;$$

.....

$$i < \left(\frac{t\alpha/2, 1-1}{C} \right)^2 S_i^2 ,$$

где S можно принять равным коэффициенту вариации, а $C = \Delta/p$; α — уровень значимости.

В случае нарушения одного из неравенств число точек, при котором это нарушение произошло, — оптимальное. Существуют рекомендации, согласно которым число наблюдений считается достаточным, если изменения характеристик расстояния (коэффициента вариации) менее 5 % от их значений.

Глава 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ИСХОДНО НЕНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ НЕВОДОНОСНЫХ ГРУНТОВ

Методы определения водопроницаемости неводоносных грунтов зоны аэрации можно разделить на две группы — полевые и лабораторные. К первым относятся методы налива в шурфы, кольца и котлованы, на слой, в скважины, а также метод нагнетания воздуха в скважины. В состав второй группы входят методы, основанные на применении фильтрационных приборов разных типов и конструкций, заряжаемых образцами грунта ненарушенной структуры.

Налив воды в шурфы и кольца

Наливы в шурфы для определения водопроницаемости исходно ненасыщенных грунтов зоны аэрации были предложены А.К. Болдыревым в 1926 г. По этому методу налив производится на дно шурфа при постоянной высоте слоя воды 5—10 см и продолжается до стабилизации расхода воды. Фильтрация в таком случае считается установившейся, а коэффициент фильтрации находится по формуле

$$k = Q/(FI), \quad (14)$$

где Q — расход воды; F — площадь сечения шурфа; I — напорный градиент, при расчетах принимается $I = 1$.

Наблюдениями было установлено, что одномерный фильтрационный поток нарушался воздействием капиллярных сил, вызывавшим боковое его растекание. Установившийся режим фильтрации даже при значительной продолжительности опыта не наступал.

Для исключения влияния бокового растекания были внесены изменения в схему проведения опыта. Н.С. Нестеров предложил проводить налив в двухкольцевые инфильтрометры, представляющие собой два концентрически расположенных кольца, в которых поддерживаются одинаковые уровни. Он считал, что между внутренним и внешним кольцами расход воды будет обеспечивать растекание, т. е. будет образовываться буферная зона, а фильтрация из внутреннего кольца будет строго вертикальной.

Н.Н. Веригин предложил полностью устранить боковое растекание, производя налив в кольцо, насаженное на монолит грунта цилиндрической формы, вырезанный на дне шурфа. При этом основание монолита не отделяется от материнской породы.

Н.К. Гирицкий задачу фильтрации рассмотрел теоретически, принимая фильтрационный поток однородным и учитывая влияние капиллярных сил заданием отрицательного давления на свободной поверхности. Для расчета коэффициента фильтрации были предложены зависимости, полученные при решении уравнения неустановившейся вертикальной фильтрации. При этом в уравнение была введена некоторая условная величина капиллярного вакуума (высота капиллярного поднятия) грунта, которая принята постоянной и не зависящей от влажности грунта.

Н.Н. Биндеман предложил расчетную зависимость при наливе с постоянным уровнем воды в шурфе, а Н.Н. Веригин получил другие зависимости для случаев налива при постоянном расходе и свободном понижении уровня воды после налива. В.В. Бадов и В.М. Шестаков [3] разработали графоаналитические способы обработки результатов проведения опытов.

Из всех указанных методов наибольшее распространение на практике получил метод Болдырева при наливах в песчаных грунтах и метод Нестерова при наливах в связных грунтах.

Применение рассматриваемых методов обработки опытных данных позволяет проводить наливы при любой мощности однородного слоя, сокращает длительность опытов и необходимое для наливов количество воды. Однако опыт их применения показал недостаточную точность и надежность определения фильтрационных параметров. Необходимо было выявить физическую природу процесса инфильтрации воды при наливах в шурфы, выяснить справедливость расчетных схем и предположений, положенных в основу математического описания процесса.

Физическая картина развития процесса фильтрации была выявлена в результате применения при наливах в шурфы гидрофизического метода наблюдений, описанного в гл. 2. При проведении налива в шурф по методу Нестерова непосредственно под центральным кольцом и в других местах устанавливались зонды тензиометров.

На рис. 23 показаны последовательные положения эпюры увлажнения при наливе в шурф по методу Нестерова, построенные по данным измерения давления тензиометрами, произведенного Н.Е. Дзекунным

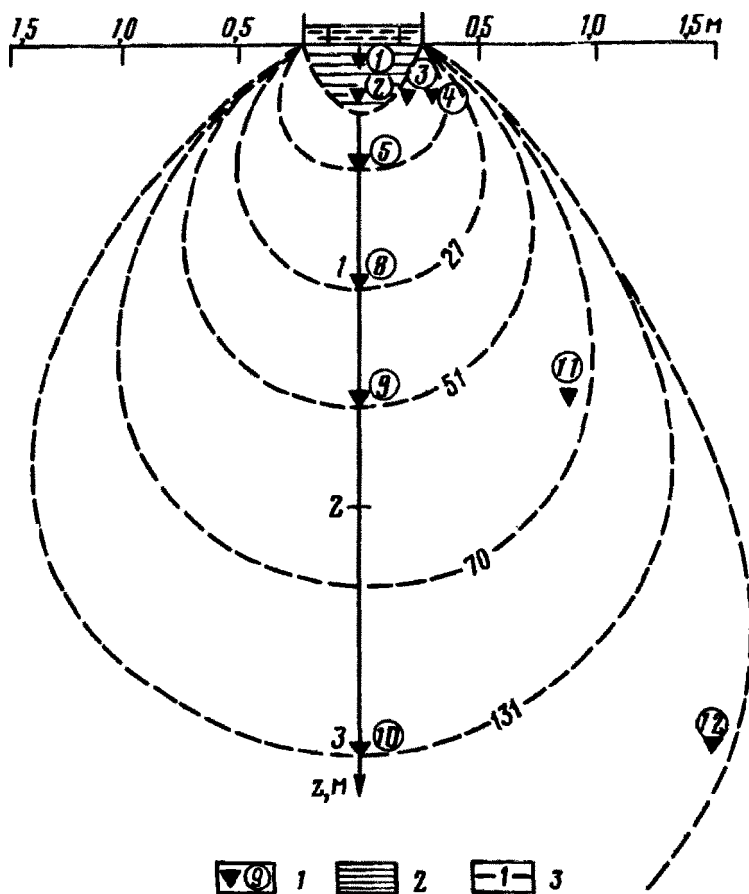


Рис. 23. Перемещение фронта увлажнения во времени по данным налива в шурф по методу Нестерова:

1 — место заложения и номер тензиометра в кружка; 2 — зона квазинасыщенного состояния грунта; 3 — фронт увлажнения (цифра — время от начала налива, ч)

на опытном Крымском стационаре Киевского государственного университета.

Приведенные данные показывают, что при наливах в кольца в пределах преобладающей части зоны увлажнения грунта происходит резко неустановившееся движение в условиях ненасыщенного грунта (вагоперенос, а не фильтрация) при переменных значениях поперечного сечения, расхода потока и скорости движения. Положительное давление имеет место лишь вблизи поверхности земли в зоне мощностью 10–15 см. Б.А. Файбишенко [29] опубликовал данные аналогичных наблюдений, проведенных в Заволжье (Саратовская обл.), где зонды тензиометров были заложены под внутренним кольцом и вне колец (рис. 24, а). Давление влаги, по данным тензиометров, под внутренним кольцом в основном было отрицательным. Положительное давление

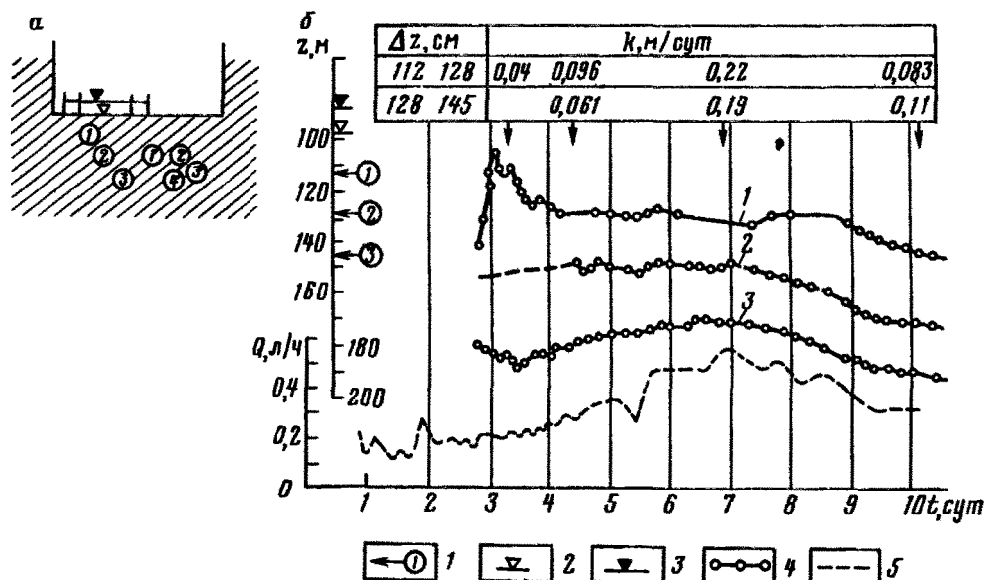


Рис. 24. Результаты наблюдений за наливом в шурф по методу Нестерова:

а — схема оборудования опытного шурфа на глубине 1 м; б — графики. 1 — место установки тензиометров (цифры в кружках — номера тензиометров); 2 — уровень установки колец для налива; 3 — уровень подошвы воды; 4 — кривые изменения гидродинамического напора, полученные по тензиометрам 1–3; 5 — график расхода воды, подаваемой во внутреннее кольцо

зафиксировано только в первом тензиометре через 2,5 сут после начала налива в слое глубиной 12 см, глубже в течение всего опыта сохранилось ненасыщенное состояние (см. рис. 24, б). Значения коэффициента фильтрации, рассчитанные по зависимости (14) с использованием данных измерения расхода воды Q во внутреннем кольце и давления влаги по вертикали под ним, оказались различными, поскольку характеризовали квазинасыщенное и ненасыщенное состояния грунта.

Очевидно, что принятая расчетная схема при обработке результатов налива по методу Нестерова не подтверждается. Для определения коэффициентов, правильно отражающих состояние грунта при таких наливах, необходимы другая расчетная схема и информация о характере насыщения грунта при проведении опыта, объеме защемленного воздуха, влажности ненасыщенного грунта и динамике потока воды под кольцами.

Аналогичные наблюдения были проведены при наливах по методу Веригина, т. е. в монолит с водонепроницаемой оболочкой, не отделенный снизу от материнской породы. Монолит был оборудован тензиометрами и пьезометрами в торцах и посередине. По данным Б.А. Файбишенко [29], при подаче воды сверху вниз в верхней части монолита фиксировалось квазинасыщенное состояние грунта, а в нижней половине монолита грунт был в ненасыщенном состоянии. И в этом случае налицо несоответствие физической картины принятой расчетной схеме.

В.В. Бадов [3] разработал новый метод интерпретации результатов налива в шурфы или кольца, в котором сделана попытка учесть установленное экспериментально перемещение потока в условиях неполного насыщения порового пространства. При этом он использовал уравнение неустановившейся фильтрации в графическом представлении и предложил определять некоторый условный показатель фильтрации, который может быть назван коэффициентом инфильтрации, а также величину капиллярного вакуума.

Расчетный коэффициент фильтрации по методу Бадова определяется по коэффициенту инфильтрации в результате использования двух поправочных коэффициентов: 1) повышающего, учитывающего боковое растекание под шурфом или кольцом; 2) понижающего, учитывающего неполное насыщение промоченной части грунта на глубине "предельного растекания", равного 1–1,5 диаметра шурфа (или наружного кольца).

По-видимому, вычисление повышающего поправочного коэффициента на основе использования условных величин (высота капиллярного вакуума и предельная величина недостатка насыщения) недостаточно обосновано. Поэтому нельзя относиться с доверием к расчетному коэффициенту фильтрации, полученному по методу Бадова.

Налив воды в котлован

Деформация инфильтрационного потока из шурфа при наливе в двух-кольцевой инфильтрометр и перенос влаги в ненасыщенном состоянии обусловлены тем, что внешнее кольцо, при его сравнительно малых размерах, не может обеспечить создания буферной зоны, устраняющей боковое растекание в зоне внутреннего кольца.

Естественно, следовало ожидать ослабления эффекта бокового растекания при больших размерах буферной зоны, которые могут быть достигнуты увеличением диаметра внешнего кольца. Так появился трудоемкий и дорогой метод налива воды на опытную площадку, огражденную на поверхности земли, или в неглубокий котлован площадью в десятки квадратных метров, с расположенным в центре внутренним кольцом.

При проведении налива по такой схеме под опытной площадкой действительно сохраняется положительное давление, в зоне расположения внутреннего кольца движение приближается к одномерному и двумерность проявляется только на периферии площади, но стабилизация потока не наступает.

В качестве примера приведем данные гидрофизических наблюдений, проведенных на опытной площадке, расположенной в пределах Комсомольской оросительной системы в Саратовской области [29].

Налив проводился в котлован размером 6 x 6 м, глубиной 0,45–0,55 м, в центре которого было установлено кольцо диаметром 62 см. В течение 20 сут в котловане поддерживался столб воды высотой 20 см

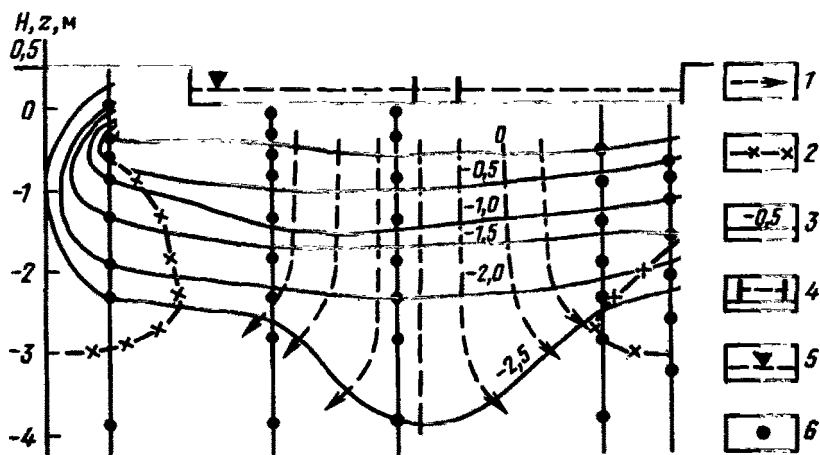


Рис. 25. Гидродинамическая сетка движения водного потока при наливе воды в котлован:

1 — линии тока; 2 — граница насыщенной и ненасыщенной зон; 3 — линии равных напоров и их значения (в метрах); 4 — внутреннее кольцо в котловане; 5 — уровень воды в котловане; 6 — места расположения тензиометров в кустах скважин

и при этом фиксировался расход воды из котлована и центрального кольца.

Для наблюдений за перетоком воды были оборудованы тензиометрами пять кустов скважин: четыре из них находились в пределах котлована, один — за его пределами (на расстоянии 1 м от его кромки). Каждый куст скважин включал 10 тензиометров, зонды которых были установлены на различных глубинах (рис. 25).

В течение первых суток налива квазинасыщенная зона распространилась до глубины 1,5 м, что было установлено по появлению положительного давления ($p < 0$) в тензиометрах. Одновременно отмечался рост уровня верховодки. В последующие дни скорость распространения квазинасыщенной зоны вниз уменьшилась. Смыкание квазинасыщенной зоны, распространяющейся сверху, с растущим уровнем верховодки произошло на вторые сутки после начала налива на глубине 2–2,5 м. В дальнейшем происходила фильтрация воды в квазинасыщенных грунтах. При этом отмечался небольшой рост гидродинамических напоров по всем наблюдательным точкам в пределах котлована.

За пределами котлована, в 1 м от его края, увлажнение грунтов началось через трое суток после начала налива в интервале глубин 0,35–0,55 м от дна котлована. Через 10 сут в этом интервале глубин образовалась квазинасыщенная зона. На третьи сутки начался подъем уровня верховодки, который продолжался до конца налива. Обусловлено это, очевидно, подпором от центра котлована и растеканием образовавшегося под дном котлована купола верховодки.

Таблица 4. Изменение поинтервальных значений k_f во времени при наливе воды в котлован

Время от начала налива, сут	k_f (м/сут) для различных интервалов глубин (м)					
	0,38—0,58	0,58—0,88	0,88—1,38	1,38—1,88	1,88—2,88	2,88—3,88
2	0,115 *	0,052 *	—	—	—	—
7	0,245	0,031	0,076 *	0,029 *	—	—
13	0,356	0,037	0,139	0,058	0,171 *	0,593 *
18	0,656	0,093	0,356	0,114	0,315	1,025

* Соответствуют началу фильтрации в данном интервале.

Наблюдениями было установлено неоднородное вертикальное движение воды под котлованом и растекание потока в стороны (см. рис. 25). При этом зоны ненасыщенного состояния грунтов сохранились на периферии котлована, а под центральным кольцом практически происходила однородная фильтрация. Это дало основание для определения поинтервальных значений коэффициента фильтрации по расходу в центральном кольце, причем оказалось, что во всех сечениях величины коэффициента фильтрации во времени непрерывно возрастали (табл. 4).

Влажность грунта на протяжении налива возрастала. В частности, на глубине 3 м до налива влажность была 19,6 %, через 7 сут налива она достигла 21 %, а через 12 сут — 23 %. Однако уже на вторые сутки налива на этой же глубине было зафиксировано положительное давление влаги, свидетельствующее о переходе из ненасыщенного состояния в квазинасыщенное. Рост коэффициента фильтрации в указанном интервале (см. табл. 4) связан с дальнейшим уменьшением объема защемленного воздуха в грунтах, выносимого водным потоком. Можно полагать, что на протяжении 20-суточного налива полного насыщения грунта не произошло. Поскольку определение количества защемленного воздуха в грунтах при проведении налива весьма затруднительно, остается открытым вопрос о том, какие из полученных при наливе в котлован коэффициенты фильтрации считать расчетными.

Налив (нагнетание) воды в скважины

Методы налива воды в скважины основаны на применении несовершенных скважин, оборудованных в пределах зоны аэрации. Не касаясь здесь технической стороны проведения налива в скважины, отметим, что существуют различные подходы к проведению опытов, схематизации процесса и интерпретации данных опробования.

Так, Н.Н. Веригин предлагает оборудовать короткие несовершенные скважины и проводить нагнетания воды так, чтобы напор в скважине в 10–12 раз превышал радиус зоны насыщения породы водой. Такая схема проведения опыта позволяет пренебрегать при определении параметров силами тяжести и капиллярными и получать расчетные зависимости для случаев нагнетания с постоянным напором, с постоянным расходом и для случая свободного падения уровня воды в скважине после мгновенного налива.

В других методах предусматривается свободный налив воды в несовершенную скважину через боковые стенки (В.М. Насберг), дно (Н.Н. Веригин), стенки и дно (И.Е. Жернов), причем обработка данных наблюдений производится с учетом нисходящей фильтрации и бокового растекания. Сведений о детальных исследованиях процесса фильтрации при наливах и нагнетаниях воды в скважины, подобных упомянутым выше исследованиям фильтрации при наливах в шурфы и котлованы, в литературе нет. Если руководствоваться результатами описанных выше исследований, можно полагать, что при наливах в скважины будет иметь место фильтрация в квазинасыщенных грунтах, т. е. при наличии защемленного воздуха, который в процессе фильтрации будет перераспределяться, а на периферии потока будет существовать зона неполного насыщения, взаимодействующая с основным потоком. Используемые расчетные схемы не учитывают этих обстоятельств.

Налив воды на слабопроницаемый слой

Для оценки фильтрационных параметров грунтов зоны аэрации слоистого строения применяются фильтровые скважины, забой которых находится на кровле слабопроницаемого слоя. Сущность метода заключается в анализе процессов образования слоя воды на слабопроницаемой кровле и опускания его поверхности после прекращения налива.

Проведение наливов на горизонтальную кровлю слабопроницаемого слоя зоны аэрации было предложено Г.И. Баренблаттом и В.М. Шестаковым. Ими были даны зависимости для определения по данным налива фильтрационных параметров перекрывающих сильнопроницаемых отложений. Затем В.М. Шестаков разработал способы интерпретации данных опыта с учетом проницаемости подстилающего слоя. На основе детального анализа расчетных зависимостей он пришел к выводу, что по данным налива может быть определена водопроницаемость верхнего, более проницаемого слоя. Для оценки нижнего, слабопроницаемого слоя используют данные снижения уровня после налива.

Следует, однако, отметить, что упомянутые методы обработки данных наливов предполагают следующие допущения: постоянство расхода наливаемой воды, горизонтальность поверхности слабопроницаемого слоя, отсутствие капиллярного увлажнения грунта над свободной поверхностью, полную насыщенность. В целях приближения

методов интерпретации опытных данных к действительным условиям, В.Я. Буряков предложил интегральные методы расчета параметров, учитывающие изменяющийся расход налива, усложненную форму насыщенной зоны и образование капиллярной каймы в верхнем слое. Очевидно, что в процессе проведения налива нарушается также предпосылка о постоянстве фильтрационных и емкостных свойств испытываемых слоев вследствие изменения количества заземленного воздуха, и это обстоятельство требует разработки принципиально новых подходов к интерпретации данных наливов на слой.

Нагнетание воздуха в скважины

Метод нагнетания воздуха в скважины используется за рубежом для оценки проницаемости трещиноватых и кавернозных пород в гидротехническом строительстве. В СССР этот метод внедряется О.Б. Устрицевым [29], под руководством которого разработаны специальное оборудование и методы интерпретации опытных данных. В.Я. Буряков [6] использовал метод нагнетания воздуха в скважины для изучения проницаемости песчано-глинистых отложений в зоне азрации.

Полевые и лабораторные исследования показали, что этот метод может иметь ограниченное применение, поскольку позволяет оценить физическую проницаемость песчано-глинистых отложений при их естественной влажности, которая в процессе проведения испытаний снижается в результате переноса воды при движении воздуха.

Полевые исследования показывают, что между результатами нагнетаний воздуха и воды может существовать удовлетворительная корреляция, поэтому нагнетания воздуха целесообразно сочетать с проведением испытаний водой.

При этом совместная оценка воздухо- и водопроницаемости каждого литолого-генетического типа пород позволяет установить корреляционные зависимости между расчетными значениями коэффициентов фильтрации, что дает возможность сократить число трудоемких опытных наливов за счет увеличения объема более простых в техническом отношении нагнетаний воздуха.

В целом метод нагнетания воздуха следует рассматривать в качестве перспективного направления опытно-фильтрационных исследований.

Геотермические методы

Геотермическими называют такие методы опробования, в которых для обработки результатов опытов используются данные термометрических измерений. По существу, они основаны на дополнительной информации, которая может быть получена при проведении испытаний любым из описанных выше методов налива. Для получения такой информации в зоне увлажнения должны быть расположены датчики температуры,

а налив следует производить водой с контрастной температурой по отношению к температуре среды, в которой производится налив. Кроме того, необходимы данные о теплофизических параметрах среды: удельной теплоемкости и плотности породы и воды, коэффициентах тепло- и температуропроводности.

Н.М. Фролов [33], в частности, детально описал условия применения геотермического метода при проведении налива в шурфы и кольца и обратил внимание на высокую точность определения водопроницаемости. Однако необходимо учитывать условность получаемых величин, поскольку интерпретация данных наблюдений производится на основе расчетных схем, лишь приближенно соответствующих действительной физической картине формирующегося при наливах фильтрационного потока, что уже неоднократно отмечалось ранее.

Лабораторные методы определения фильтрационных параметров

Лабораторные методы основаны на применении лабораторных приборов — инфильтрометров. Широко известны, например, простейшие приборы — трубка Каменского, приборы Тиме, Копецкого для определения коэффициентов фильтрации песчаных пород, а также трубка СПЕЦГЕО, приборы Каменского, Повилонского, АКМ-2 и др., пригодные для определения коэффициента фильтрации песчаных и связных пород. Методика проведения опытов в таких приборах заключается в заполнении образца водой сверху вниз или снизу вверх и фильтрации (преимущественно нисходящей) при постоянном напоре, т. е. в стационарных условиях. При этом обычно не контролируется степень насыщения образца породы водой и не фиксируется наличие в ней защемленного воздуха.

Известны также компрессионно-фильтрационные приборы Захарова, Маслова, Гуменского, Троицкой и др., в которых определяется водопроницаемость с учетом влияния нагрузки на породу. Такие приборы используются преимущественно для испытания глин и набухающих пород. Для определения водопроницаемости кернов скальных и полускальных пород используется установка УИПК-1 м.

В работе [7] описаны устройство универсального инфильтрометра и оригинальная методика проведения испытаний в нестационарном режиме фильтрации. Она предусматривает последовательно проводимую капиллярную пропитку образца, пропитку под напором, напорную фильтрацию, свободное стекание воды из грунта и определение водопроводимости, емкостных и капиллярных свойств образца породы.

Расчетные зависимости получены Н.Н. Веригиным при следующих допущениях: влажность при капиллярном насыщении образца считается постоянной, вакуум при этом считается не зависящим от влажности, не учитывается присутствие в образце защемленного воздуха. Эти предпо-

сылки приводят к тому, что в результате проведения опыта определяются постоянные величины водопоглощения, капиллярной влагоемкости, разрежения и коэффициента фильтрации. Это не соответствует современной теории влагопереноса в ненасыщенных грунтах, поэтому такие показатели следует считать условными.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ В ИСХОДНО НЕНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ

Методика экспериментальных исследований

В основу исследований процесса фильтрации в грунтах зоны аэрации, исходно не насыщенных водой, был положен метод физического моделирования, предусматривающий проведение экспериментов на монолитах ненарушенной структуры. Монолит представляет собой отчлененный от материнской породы цилиндрической формы образец грунта, покрытый эластичной водонепроницаемой оболочкой, полностью исключающей пристенную фильтрацию. Для опытов были использованы монолиты высотой 0,5—5,2 м (в основном 1 и 3 м) и диаметром 0,18—0,5 м.

Экспериментальная установка для изучения фильтрации содержала устройства, позволяющие насыщать монолит водой сверху или снизу, обеспечивать фильтрацию обычной, дегазированной или обогащенной воздухом водой различной минерализации и температуры при постоянном во времени или переменном напорном градиенте и разных направлениях движения воды в монолите (сверху вниз или наоборот). В некоторых сечениях по высоте монолита устанавливались пьезометры или зонды тензиометров (рис. 26), обеспечивавшие измерение величины напора при фильтрации. Специальные устройства позволяли заменить поровой воздух в монолитах перед их насыщением углекислым газом и вакуумировать монолиты.

При проведении опытов отбирались пробы фильтрата для выяснения минерализации, определялось количество защемленного воздуха прямыми замерами или по изменению массы монолита; измерялась температура подаваемой воды в монолите и на выходе из него; в целях контроля за изменением структуры грунта проводились наблюдения за выносом частиц грунта, периодически выполнялись визуальные осмотры монолитов, монолиты вскрывались и изучалась их структура по срезам.

Описанная экспериментальная установка позволила провести комплексные исследования фильтрации в исходно ненасыщенных суглинистых грунтах, выявить физическую картину фильтрации и определяющие ее факторы, дать их количественную характеристику и отыскать пути для надежного установления фильтрационных параметров.

Поскольку последняя задача была главной в проведении экспериментов, при анализе их результатов наилучшим количественным показателем служила величина коэффициента фильтрации. Поэтому по дан-

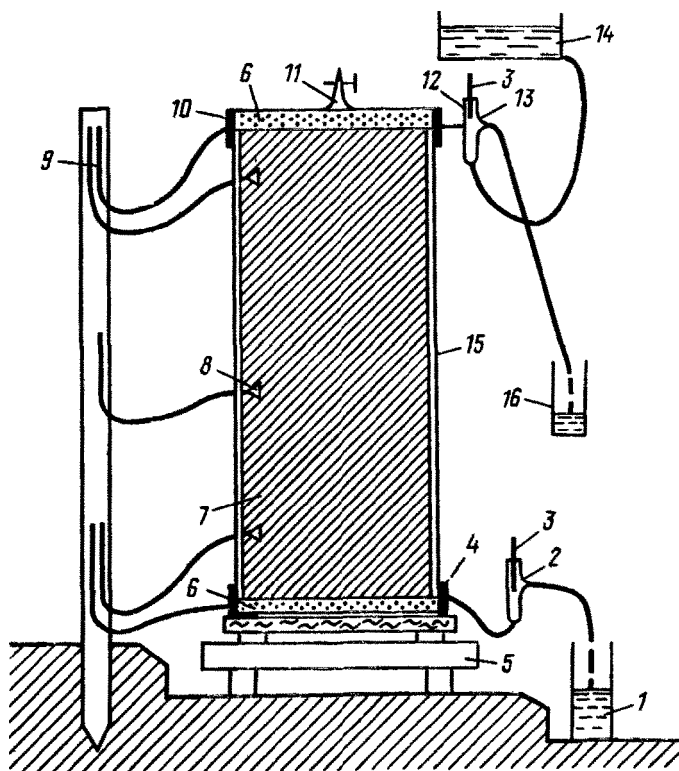


Рис. 26. Схема установки для определения коэффициента фильтрации с учетом заземленного воздуха:

1 — мерный сосуд; 2 — водослив, фиксирующий напор; 3 — термометр; 4 — поддон; 5 — весы; 6 — песок; 7 — монолит грунта; 8 — пьезометр; 9 — манометры; 10, — водоприемник; 11 — воздухоуловитель; 12 — распределительный коллектор; 13 — водослив уровня подачи; 14 — сосуд для подачи воды; 15 — гидроизоляционное покрытие; 16 — сброс

ным измеренных при проведении опытов величин (расходы воды, напоры и др.) определялись коэффициенты фильтрации грунта монолита.

Напоры и другие гидродинамические элементы в ходе опытов изменялись весьма медленно, поэтому на протяжении коротких интервалов времени режим фильтрации приближенно можно было считать установившимся, а значение элементов — стабильным. Для расчета коэффициента фильтрации расчетный расход Q определялся по зависимости

$$Q = V/t, \quad (15)$$

где V — объем воды, вытекший из монолита за время t .

При расчетном интервале времени t , принимаемом в пределах 5–10 мин, напоры в расчетных сечениях практически оставались постоянными.

Коэффициент фильтрации $k_{\omega_{3.в}}$ рассчитывался по зависимости Дарси:

$$k_{\omega_{3.в}} = Q / (F I); \quad I = \Delta H / (\Delta l), \quad (16)$$

где Q , I — соответственно расход воды и градиент напора при объеме заземленного воздуха $\omega_{3.в}$; ΔH — перепад напора между расчетными сечениями в монолите; Δl — расстояние между расчетными сечениями; F — площадь поперечного сечения монолита.

Коэффициенты фильтрации, определяемые при различной температуре, приводились к температуре 10°C по формуле Хазена:

$$k_{10^\circ\text{C}} = k_t^\circ\text{C} (0,7 + 0,03 t). \quad (17)$$

Длительность опытов на монолитах, в зависимости от изученности отдельных факторов, определялась задаваемыми условиями и составляла 25–60 сут. Для изучения изменений водопроницаемости грунта во времени опыты на некоторых монолитах повторялись 4–6 раз с общей длительностью фильтрации до 180 сут. В общей сложности эксперименты проводились на 75 монолитах суглинистых грунтов.

Влияние свойств воды на процесс фильтрации

Известно, что фильтрация воды в грунтах зависит от вязкости и плотности воды, которые, в свою очередь, определяются минерализацией, температурой и давлением. С повышением температуры воды уменьшается ее вязкость, а следовательно, увеличивается подвижность. Например, при изменении в течение суток температуры воды, подаваемой на фильтрацию в монолит, на 10°C , расход при прочих равных условиях синхронно изменялся от 0,04 до 0,06 л/ч. С уменьшением средней суточной температуры фильтрующейся воды на 5–6 $^\circ\text{C}$ фильтрационный расход за 7 сут уменьшился с 1,5 до 0,65 л/ч.

Экспериментально установлено, что изменение водопроницаемости грунта под воздействием температуры становится менее заметным при увеличении в грунте объема заземленного воздуха. Объясняется это тем, что при повышении температуры с уменьшением вязкости воды водопроницаемость возрастает, но в то же время при повышении температуры увеличивается объем заземленного воздуха, т. е. уменьшается эффективная пористость. Таким образом, эти факторы как бы противостоят друг другу. При содержании заземленного воздуха 5 % и больше его влияние на водопроницаемость будет определяющим: при повышении температуры коэффициент фильтрации будет уменьшаться и при понижении температуры — увеличиваться (рис. 27).

Наблюдениями установлено, что при содержании заземленного воздуха до 10 % с понижением температуры в течение суток масса монолитов увеличивалась, и наоборот. С увеличением массы в этом случае росла водопроницаемость. Таким образом, по мере уменьшения количества

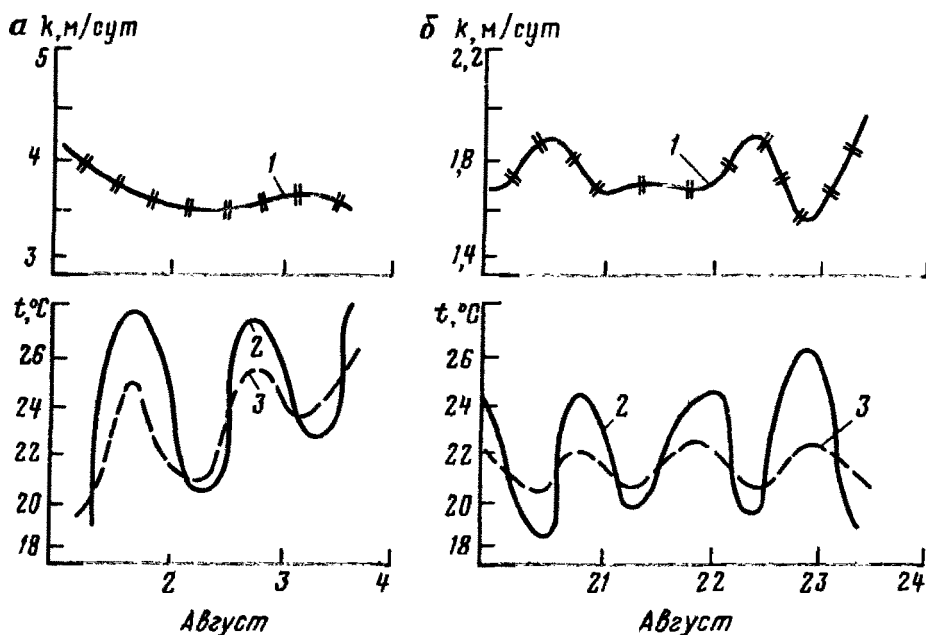


Рис. 27. Графики зависимости коэффициента фильтрации от температуры воды при содержании защемленного воздуха 2 % (а) и 3 % (б) :

1 — коэффициент фильтрации; 2 и 3 — температура воды на входе в монолит и на выходе из него

защемленного воздуха его влияние на проницаемость с изменением температуры падает в сравнении с влиянием вязкости.

В опытах отмечалась также зависимость водопроницаемости от изменения внешнего давления — атмосферного и гидростатического. В частности, это было заметно при фильтрации с градиентом 0,1, когда подача воды и слив были установлены у верхнего торца монолита высотой 1 м. В данном случае защемленный воздух находился под дополнительным давлением столба воды 0,9—1 м, следовательно, объем его уменьшался.

Известно, что на водопроницаемость грунта существенно влияет газонасыщенность подаваемой на фильтрацию воды, зависящая от температуры и давления газа над ее поверхностью. Именно степенью газонасыщенности воды при прочих равных условиях определяется ее способность поглощать защемленный воздух. Для изучения этого явления монолиты размещались в специально оборудованном крытом шурфе, в котором температура была ниже, чем на поверхности земли. Вода, используемая для фильтрации, находилась на поверхности земли, поэтому температура ее была выше температуры воздуха в шурфе, а следовательно, и температуры монолитов. Проходя через монолит, фильтрующаяся вода охлаждалась. Если амплитуда суточных изменений температуры воды на входе в монолит обычно составляла 5—10 $^{\circ}\text{C}$, то на выходе из него вода была холоднее. В монолитах, до 1 м эта разница достигала 3 $^{\circ}\text{C}$ (при фильтрации с градиентами, высотой равными 1), а

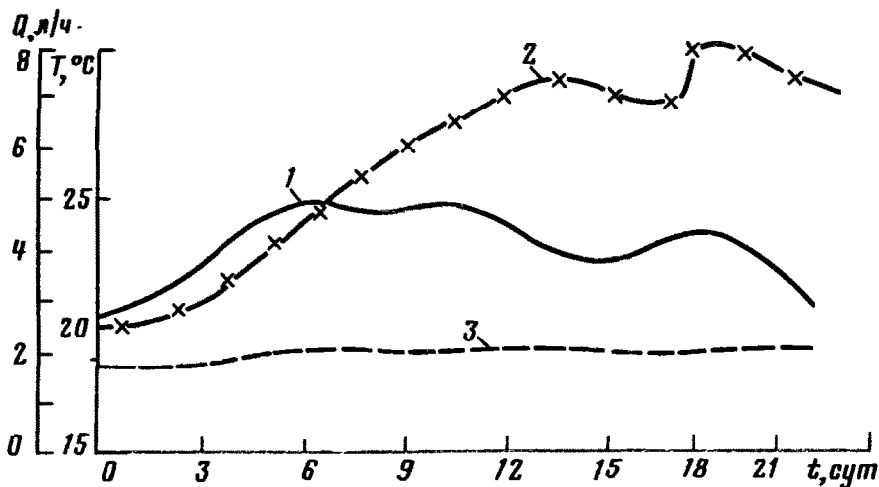


Рис. 28. Графики изменения температуры и расхода воды во времени:

1 — температура воды на входе в монолит; 2 — расход воды; 3 — температура воды на выходе из монолита

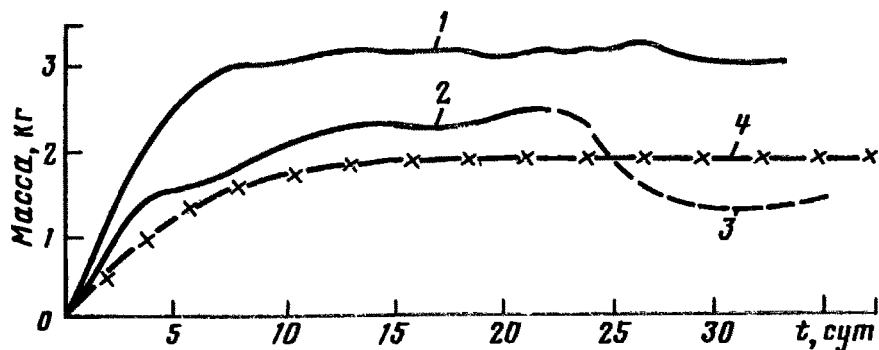


Рис. 29. Графики изменения массы монолитов при фильтрации воды:

1, 2 — фильтрация дегазированной водой (монолиты 54 и 16); 3 — фильтрация газированной водой при $p = 0,1$ МПа (монолит 6-2); 4 — то же, при $p = 0,12 - 0,13$ МПа (монолит 16)

колебания температур на входе в монолит и выходе были синхронными. При градиентах, меньших 1, и в монолитах высотой 3 м разница температур достигала 6°C со смещением во времени на несколько часов. Анализ опытных данных показал, что на величину перепада температур и смещение во времени экспериментальных точек при прочих равных условиях влияли в основном высота монолита, степень насыщения грунта водой и градиент фильтрации.

Снижение температуры воды при прохождении через монолит предопределило поглощение ею воздуха, находящегося в порах грунта в заземленном состоянии. Так, при фильтрации в монолите 4-2 в течение 45 сут 2500 л воды с перепадом температуры в пределах 3–5 °С (рис. 28) в ней могло раствориться до 4 л заземленного воздуха (2,1 % от объема монолита). Расход воды изменился с 2,5 до 8 л/ч, коэффициент фильтрации за этот период увеличился с 0,12 до 2,4 м/сут.

Аналогичные результаты были получены и на других монолитах. По данным взвешивания монолитов 6-2, 16 и 54 (рис. 29), видно, что наиболее интенсивное увеличение их массы происходит в течение первых 8–10 сут. Увеличение массы на 2,4–3,1 кг в данном случае обусловлено поглощением заземленного воздуха водой, а также выносом его в свободном состоянии. Следует отметить, что во многих опытах вынос воздуха в свободном состоянии не наблюдается, а в некоторых случаях воздух в свободном состоянии не выходил даже при фильтрации снизу вверх.

Скорость роста водопроницаемости грунта неодинакова по высоте монолитов. Сначала увеличиваются значения коэффициентов фильтрации верхних интервалов, а затем — нижних (рис. 30). Объясняется это тем, что фильтрующаяся вода лучше поглощает воздух со стороны входа ее в монолит и теряет эту способность по мере движения в монолите. Зона, в пределах которой происходит более интенсивное поглощение заземленного воздуха, смещается вниз в направлении потока воды со скоростью от 3 до 15 см/сут и более. В интервалах монолита, расположенных над зоной, в которой сравнительно меньше поглощено зазем-

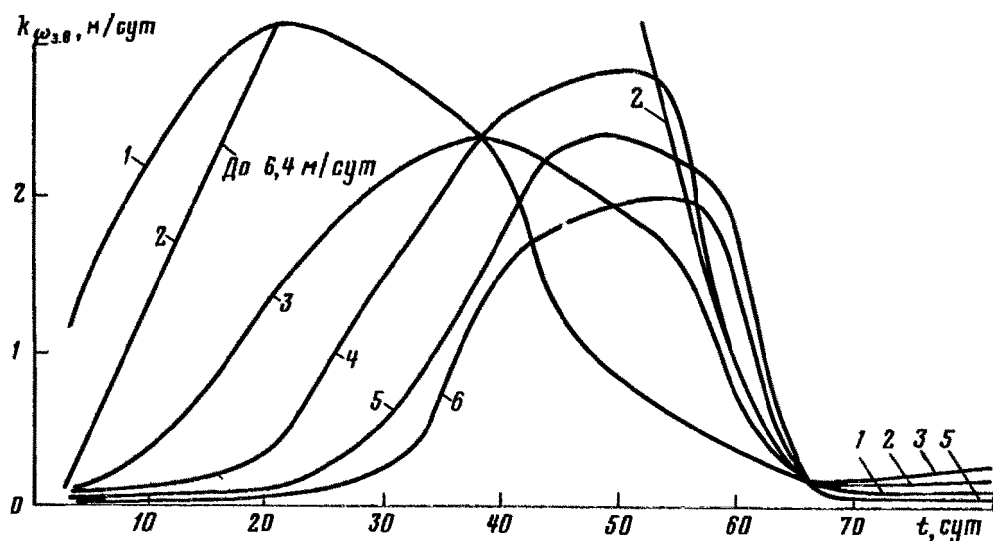


Рис. 30. Графики изменения коэффициента фильтрации во времени в отдельных интервалах по высоте монолита 4-2:

Интервалы (от дневной поверхности, м): 1 — 0,36 — 0,9; 2 — 0,9 — 1,4; 3 — 1,4 — 1,9; 4 — 1,9 — 2,4; 5 — 2,4 — 2,9; 6 — 2,9 — 3,4

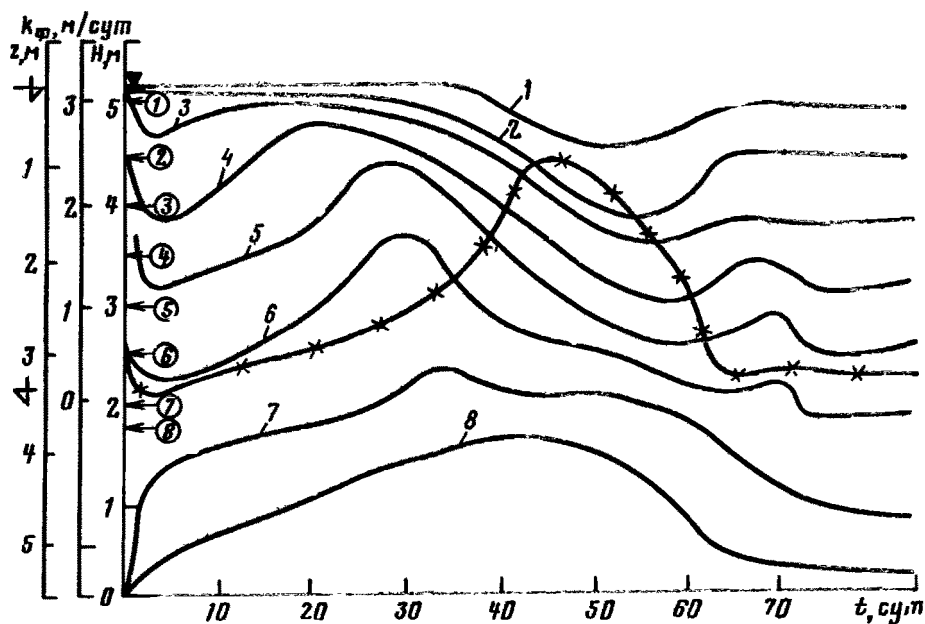


Рис. 31. Графики изменения пьезометрических напоров и коэффициента фильтрации во времени в монолите 4-2:

Знаками слева показаны верх и основание монолита. Цифры на кривых — номера тензиометров. Кривая без номера — график изменения коэффициента фильтрации

ленного воздуха, а следовательно, менее проницаемой (рис. 31), наблюдается рост напоров.

Время достижения полной влагоемкости грунта существенно сокращается при использовании в опытах дегазированной воды. Так, при подаче дегазированной воды после фильтрации обычной воды расход ее при прочих равных условиях увеличивается в 1,5–2 раза (рис. 32). Столь быстрого увеличения расхода воды за такое время при фильтрации обычной воды не наблюдалось. В опыте на монолите 10 наблюдалось интенсивное изменение проницаемости грунта в результате поглощения заземленного воздуха под воздействием дегазированной воды. Полная влагоемкость грунта была достигнута за 41 сут. Из них общее время фильтрации составило лишь 3,5 сут. Остальное время монолит был насыщен водой, и фильтрация не проводилась. В монолите 79 увеличение проницаемости было зафиксировано после шести-семисуточных остановок опыта. Это свидетельствует о том, что в состоянии покоя происходит растворение заземленного воздуха водой.

Наиболее интенсивное изменение водопроницаемости наблюдалось в опытах, когда поровой воздух перед насыщением монолитов замещался углекислым газом. Состояние полной влагоемкости достигалось за несколько часов, иногда за одни-два суток. В монолите 74 грунт

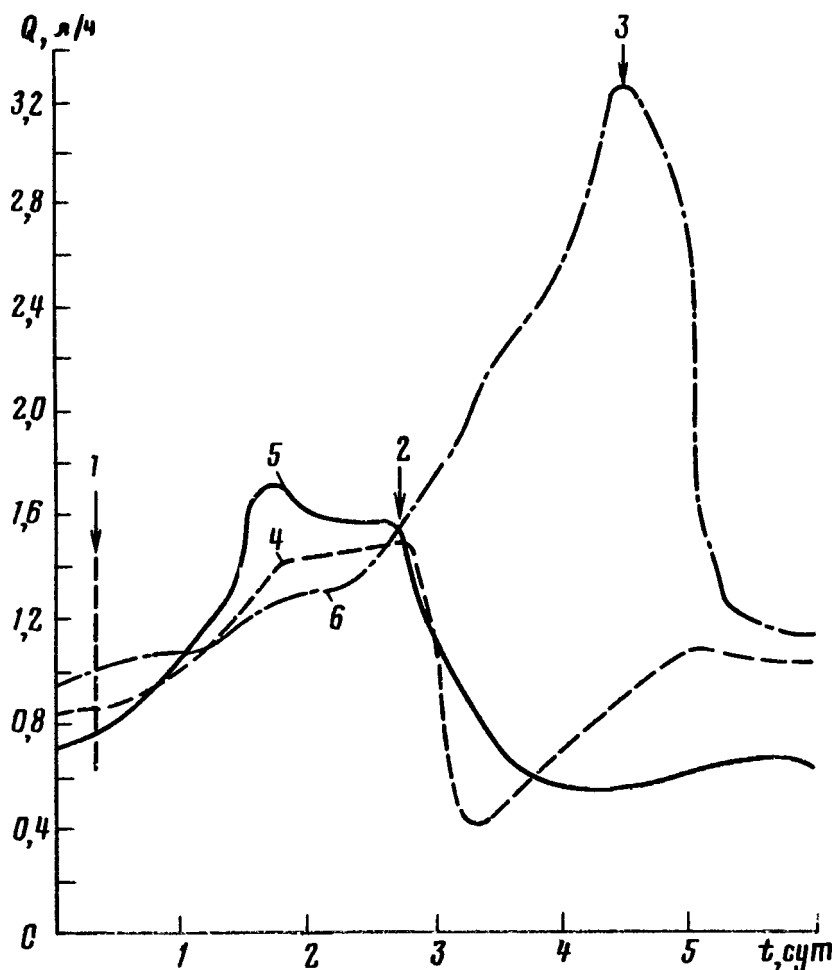


Рис. 32. Графики изменения расхода во времени при фильтрации в монолитах дегазированной и газированной воды:

Цифры на кривых — номера монолитов. Цифры на стрелках: 1 — начало фильтрации дегазированной водой в монолитах 4, 5 и 6; 2 — кратковременный перерыв фильтрации в монолитах 4 и 5; 3 — начало фильтрации газированной водой в монолите 6

достиг максимальной водопроницаемости за 4 ч, в монолите 11 — за 3 сут; это объясняется быстрым поглощением фильтрующейся водой углекислого газа, оставшегося в грунте в защемленном состоянии после насыщения монолита.

Высокая проницаемость с самого начала опыта была получена в монолите 4-2, в котором поровый воздух предварительно был замещен углекислым газом и на фильтрацию подавалась дегазированная вода (рис. 33). Значение коэффициента фильтрации в двухметровом интер-

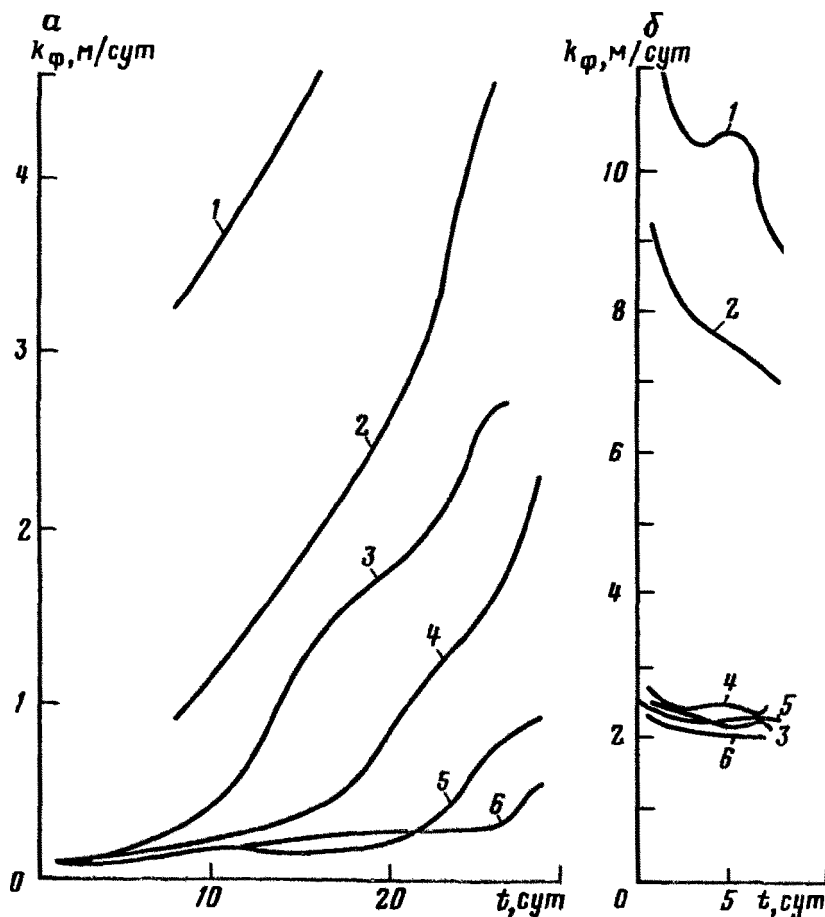


Рис. 33. Графики изменения коэффициента фильтрации во времени в отдельных интервалах по высоте монолита 4-2:

а – фильтрация дегазированной водой; б – фильтрация обычной водой после предварительной замены порового воздуха в грунте углекислым газом. Интервалы (от дневной поверхности, м): 1 – 0,36–0,9; 2 – 0,9–1,4; 3 – 1,4–1,9; 4 – 1,9–2,4; 5 – 2,4–2,9; 6 – 2,9–3,4

вале монолита (1,4–3,4 м) в первые сутки составляло 2,5 м/сут (см. рис. 33), в то время как при фильтрации дегазированной воды без замены порового воздуха углекислым газом величина его в начале опыта составляла в среднем 0,2 м/сут, т. е. в 12 раз меньше.

Следует отметить, что в некоторых монолитах после замены порового воздуха углекислым газом при фильтрации обычной водой коэффициенты фильтрации также имели высокие значения (2–3 м/сут), однако со временем проницаемость падала (рис. 34). Это явление наблюдается и в верхних интервалах монолита 4-2 (см. рис. 33).

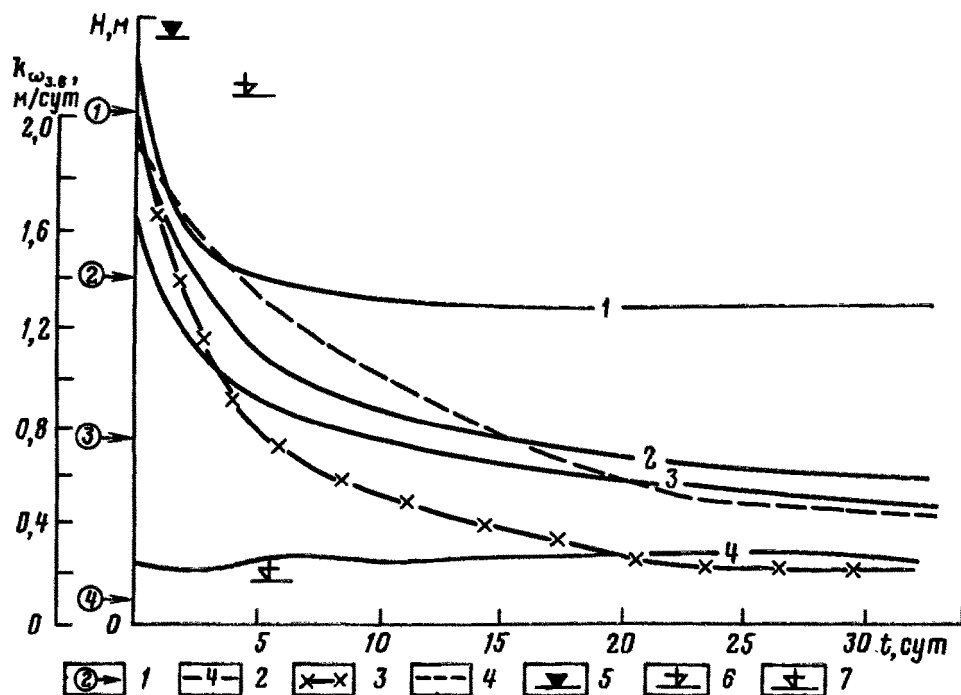


Рис. 34. Графики изменения пьезометрических напоров и коэффициента фильтрации во времени в монолите 53:

1 — место установки пьезометра и его номер; 2 — кривые пьезометрического напора и номера пьезометров; 3 — кривая коэффициента фильтрации всего монолита; 4 — то же, в интервале от первого пьезометра до основания монолита; 5 — уровень воды в водоприемнике; 6 — положение верха монолита; 7 — положение основания монолита

Влияние эффективной пористости на водопроницаемость грунта

Вследствие взаимодействия воды и грунта возникают условия, при которых возможно изменение структуры грунта и порового пространства, т. е. факторов, определяющих водопроницаемость грунта. Условно выделяются физико-химические, биологические и механические факторы, воздействие которых проявляется в процессе насыщения монолита и фильтрации воды.

К физико-химическим факторам следует отнести диспергацию и набухание грунта вследствие обменных реакций между грунтовым раствором и фильтрующей водой, а также растворение водой содержащихся в грунте солей. Изменения водопроницаемости, связанные с набуханием грунта, должны проявляться в самом начале опыта. Действительно, в опытах на монолитах, при прочих равных условиях, в первые часы фильтрации расход уменьшался в 5–10 раз (рис. 35). Интен-

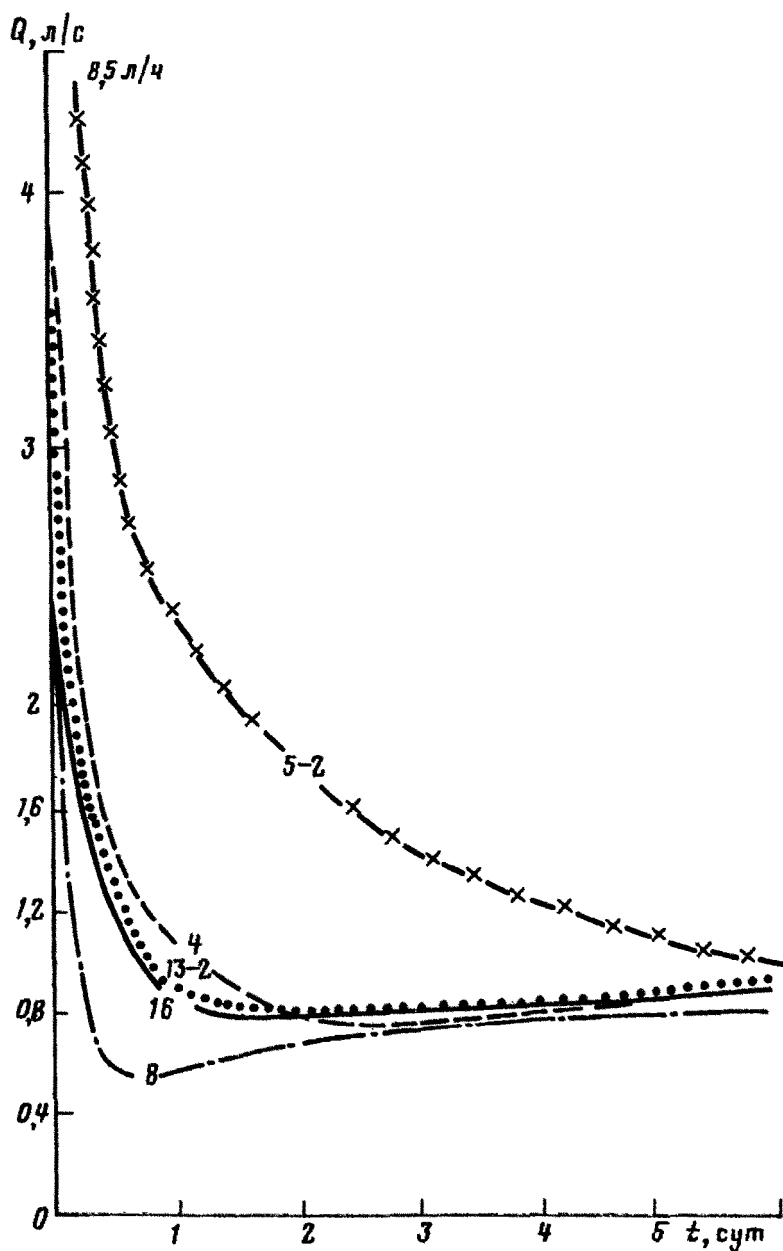


Рис. 35. Графики изменения расхода воды во времени в течение первого периода (цифры на кривых — номера монолитов)

сильное уменьшение водопроницаемости грунта с минерализацией 6 % наблюдалось в опытах как с дистиллированной водой, так и с водой, минерализация которой достигала 23 г/л; при проведении опыта пов-

торно на одном и том же монолите (следовательно, в промытом грунте) заметных изменений в поведении этого показателя не фиксировалось.

При вскрытии монолита после окончания фильтрации и визуальном осмотре грунта отмечалась хорошая промытость пор без видимого нарушения скелета. Расхождения значений объемной массы грунта находились в пределах сходимости результатов "точечного" определения.

Естественно, приведенных данных недостаточно для того, чтобы утверждать об отсутствии влияния различных физико-химических процессов на изменение состояния и структуры грунтов, которое обуславливало бы существенное уменьшение порового пространства; для этого необходимо проведение специальных опытов и наблюдений. В первом приближении для испытываемых суглинистых грунтов постоянно наблюдаемое в опытах уменьшение расхода (и коэффициента фильтрации грунта) можно объяснить перераспределением защемленного воздуха в поровом пространстве.

Рассмотрим вопрос о степени изменения порового пространства вследствие растворения и выноса солей и о воздействии этих процессов на увеличение фильтрационного расхода и коэффициента фильтрации, постоянно наблюдаемое при продолжении опытов.

При минерализации подаваемой на фильтрацию воды 0,5–0,6 г/л минерализация фильтрата в монолитах высотой 3 м в начале опыта достигала 23 г/л. В дальнейшем, на 40–50-е сутки, минерализация фильтрата уменьшалась до 1 г/л. Химический состав фильтрата изменился с сульфатного натриево-магниевого на сульфатный кальциево-магневый. Общее количество вымытых из монолитов солей достигло 4 кг.

Естественно, что растворение солей, находящихся в грунте в твердом состоянии, должно приводить к увеличению водопроницаемости грунта. Например, объем пор грунта в монолите 12 в результате растворения 2,4 кг солей мог увеличиться примерно на 0,5 % от общего объема пор, если бы соли находились только в твердом состоянии. Однако учитывая, что к началу фильтрации общее количество порового раствора в монолите 12 составляло 97 л, можно предположить, что основная масса солей находилась в поровом растворе.

Наиболее интенсивное растворение солей наблюдалось в первые 5–10 сут фильтрации, но коэффициент фильтрации в это время в большинстве случаев увеличивался незначительно. Если учесть, что увеличение эффективной пористости в результате высвобождения за этот период защемленного воздуха достигает 2,5 % (иногда 4–5 %) объема монолита, то становится очевидным подчиненное значение влияния растворения солей при увеличении водопроницаемости грунта.

К биологическим факторам относятся процессы, связанные с жизнедеятельностью микроорганизмов. Известно, что микроорганизмы оказывают влияние на структуру и водопроницаемость грунта. В частности, при длительном затоплении водой или продолжительной фильтрации образующиеся при разложении органических веществ продук-

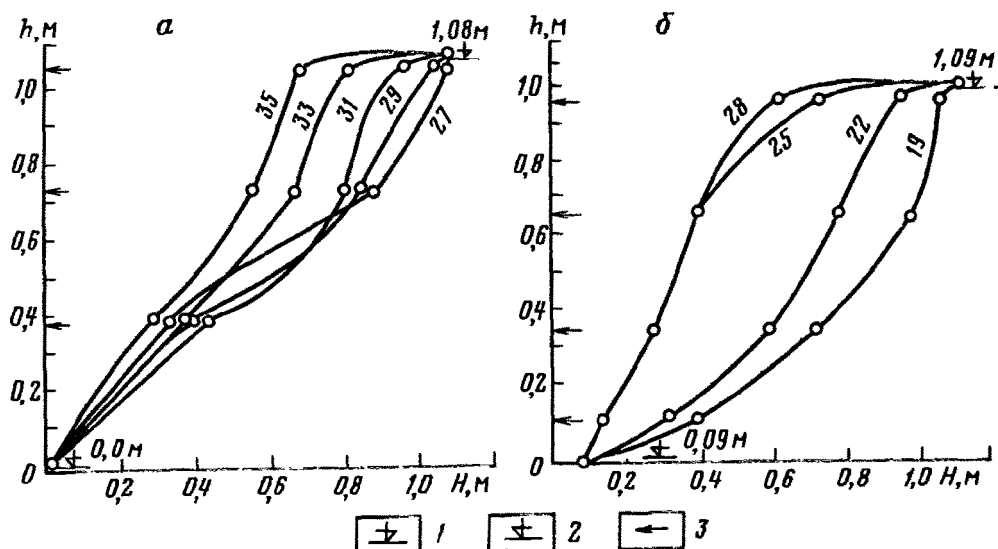


Рис. 36. Графики изменения напоров во времени под влиянием образующейся корки в монолитах 5-2 (а) и 15 (б):

1 — уровень воды в водоприемнике; 2 — уровень воды на сливе; 3 — место установки пьезометра. Цифры на кривых — время от начала фильтрации, сут

ты могут закупоривать поры грунта. В проведенных исследованиях было установлено, что на поверхности грунта образуется слизистая масса (корка), которая, по показаниям пьезометров, создавала потерю напора до 50 см (рис. 36) и заметно уменьшала водопроницаемость верхнего интервала монолита.

Например, в монолите 53 на верхний слой мощностью 5 см приходятся значительные потери напора. На рис. 34 приводится график изменения k_f , рассчитанного для всего монолита и для интервала от первого пьезометра до его основания, т. е. без этого верхнего слоя.

Влияния микроорганизмов на водопроницаемость грунта внутри монолита не было установлено. В частности, при замене подаваемой воды 0,1 %-ным раствором фенола в процессе фильтрации в монолите 4-2 на протяжении 10 сут заметных изменений не наблюдалось.

К механическим факторам, оказывающим влияние на водопроницаемость грунта, относятся кольматация пор различными взвешенными частицами, приносимыми фильтрующей водой. Незначительное количество взвесей в воде, подаваемой на фильтрацию в монолитах, участвует в образовании слабопроницаемой пленки. Опытами не установлено кольматации пор в теле монолитов: после трехкратного (в разные годы) повторения опыта на монолите 4-2 результаты значения напоров и коэффициентов фильтрации в одних и тех же интервалах монолита одинаковы или близки между собой (рис. 37).

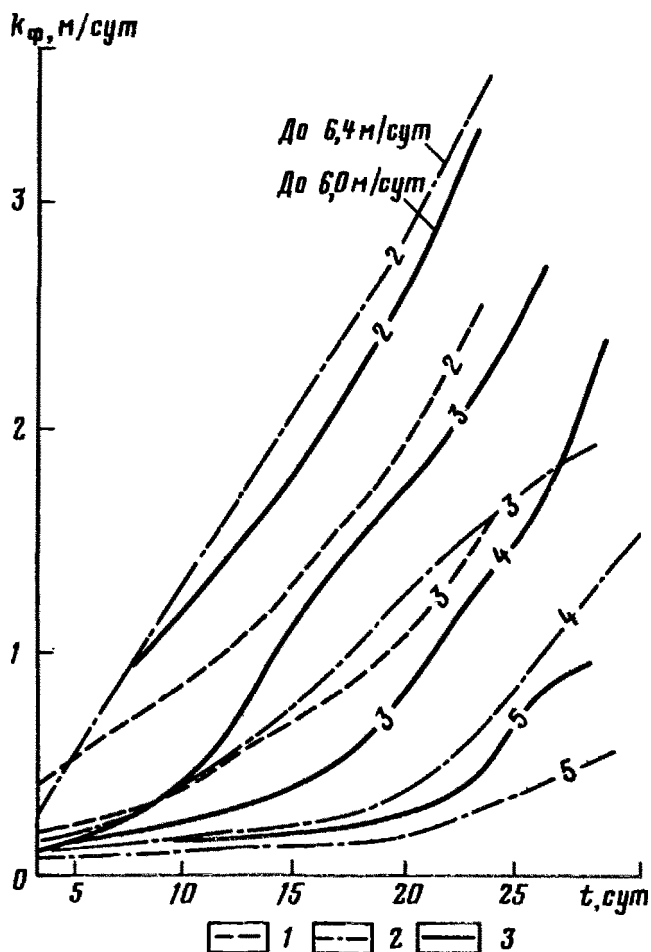


Рис. 37. Графики изменения коэффициента фильтрации во времени в отдельных интервалах по высоте монолита 4-2 при повторных опытах в течение первого (1), второго (2) и третьего (3) года.

Цифры на кривых — номера интервалов

Влияние заземленного воздуха

Опытами установлено, что количество заземленного воздуха, остающегося в монолитах после насыщения их водой, зависит от физических свойств грунта, способа насыщения, начальной влагоемкости грунта, газонасыщенности воды и т. д. После насыщения монолитов с влажностью грунта 17–18 % подачей воды в водоприемник количество заземленного воздуха составляло в среднем 10 % объема монолита, а иногда возрастало до 18 %. При фильтрации воды под воздействием различного рода факторов, объем заземленного воздуха и распределение

его по порам изменяется, обуславливая колебания водопроницаемости грунта.

В большинстве опытов уменьшение водопроницаемости и фильтрационного расхода наблюдается в начале фильтрации (см. рис. 31, 34, 35). Опираясь на результаты опытов, попытаемся объяснить это явление, анализируя процесс перераспределения воздуха в поровом пространстве грунта.

Если вода для насыщения грунта и фильтрации подается на поверхность грунта, то она проникает во все поры, выходящие на эту поверхность. Основная масса воды при этом фильтруется преимущественно по крупным порам, что объясняет большие скорости движения фронта увлажнения при насыщении монолитов, особенно в верхних интервалах, и большие расходы, наблюдаемые в начале фильтрации (см. рис. 35). Скорость движения воды по крупным порам больше, чем по мелким, поэтому естественно, что граница увлажнения не будет ровной. В результате такого сложного движения поверхность фронта увлажнения смыкается ниже еще не успевших насытиться полостей и пор, воздух в которых становится "защемленным", т. е. не связанным с атмосферой.

В дальнейшем под действием менисковых сил вода начинает поступать в мелкие ненасыщенные поры в полостях с "защемленным" воздухом (а следовательно, вытеснять из них воздух), в результате чего давление воздуха в полостях увеличивается. Если оно превысит давление, создаваемое менисками наиболее крупных пор, окаймляющих эти полости, то воздух начнет проникать в крупные водопроводящие поры, уменьшая их свободное сечение. Часть воздуха выносятся потоком фильтрующейся воды в атмосферу, а часть задерживается в порах, препятствуя прохождению воды. Коэффициенты фильтрации уменьшаются при этом на один-два порядка и в большинстве случаев для исследуемых грунтов составляют 0,1–0,3 м/сут (рис. 38 и 39).

Примерно такая же водопроницаемость грунта наблюдалась после введения в грунт воздуха (0,3–0,5 % от объема монолита) в результате кратковременного перерыва подачи воды на поверхность грунта (рис. 40).

Следует отметить, что после неоднократного повторения опытов на одних и тех же монолитах каждый раз в начале опыта наблюдается резкое уменьшение водопроницаемости грунта. Например, в монолите 4-2 при фильтрации сверху уменьшение расхода воды в начале испытания наблюдалось при четырехкратном повторении опыта.

Следует отметить, что в монолитах, которые насыщались при вакуумировании (количество защемленного воздуха до 0,2 % от объема монолита), снижения водопроницаемости в начале опыта не наблюдалось, а величина коэффициента фильтрации во времени оставалась стабильной (рис. 41), не зависящей от направления движения воды.

Приведенные данные дают основание полагать, что основной фактор,

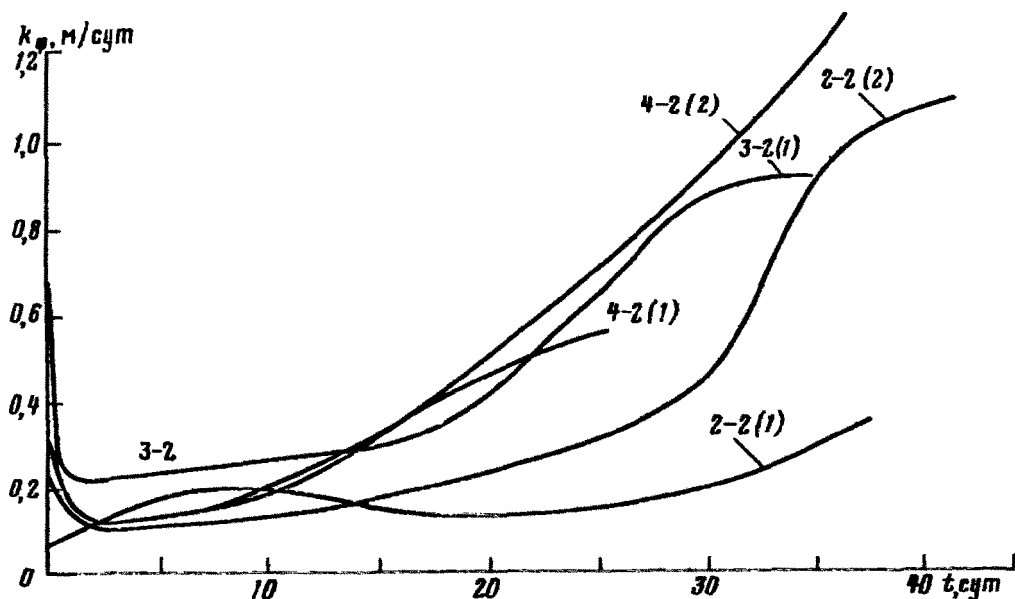


Рис. 38. Графики изменения коэффициента фильтрации во времени.

Цифры на кривых — номера монолитов и год проведения опыта

обуславливающий интенсивное уменьшение водопроницаемости в начале фильтрации, — закупоривание наиболее крупных пор воздухом в результате его перераспределения, а не нарушение структуры грунта. Этот период может быть назван первой фазой развития процесса фильтрации в монолитах грунта.

Фиксируемое далее в опытах увеличение значений коэффициента фильтрации в 10–15 раз (см. рис. 38 и 39) также требует объяснения: оно возможно только при фильтрации воды по крупным порам после освобождения их от заземленного воздуха.

Опытами на монолитах установлено, что фильтрующийся с водой воздух может выноситься в атмосферу в свободном состоянии, например, в монолите 2-2 расход воздуха в первые 4 сут фильтрации достигал 0,14 л/ч, а в дальнейшем в течение 33 сут — в среднем 0,02 л/ч (рис. 42). Объем выносимого в свободном состоянии воздуха составлял 1–2 % от объема монолита. Естественно, что такой вынос способствует росту водопроницаемости грунта, однако транзитное перемещение его по порам не исключает возможности кольтматации пор по потоку воды.

Механизм кольтматации представляется следующим. Когда диаметр пузырьков воздуха в результате его поглощения водой становится меньше, чем диаметр пор, они отрываются от стенок и перемещаются в направлении потока воды. Соединяясь и выходя в меньшие по размеру

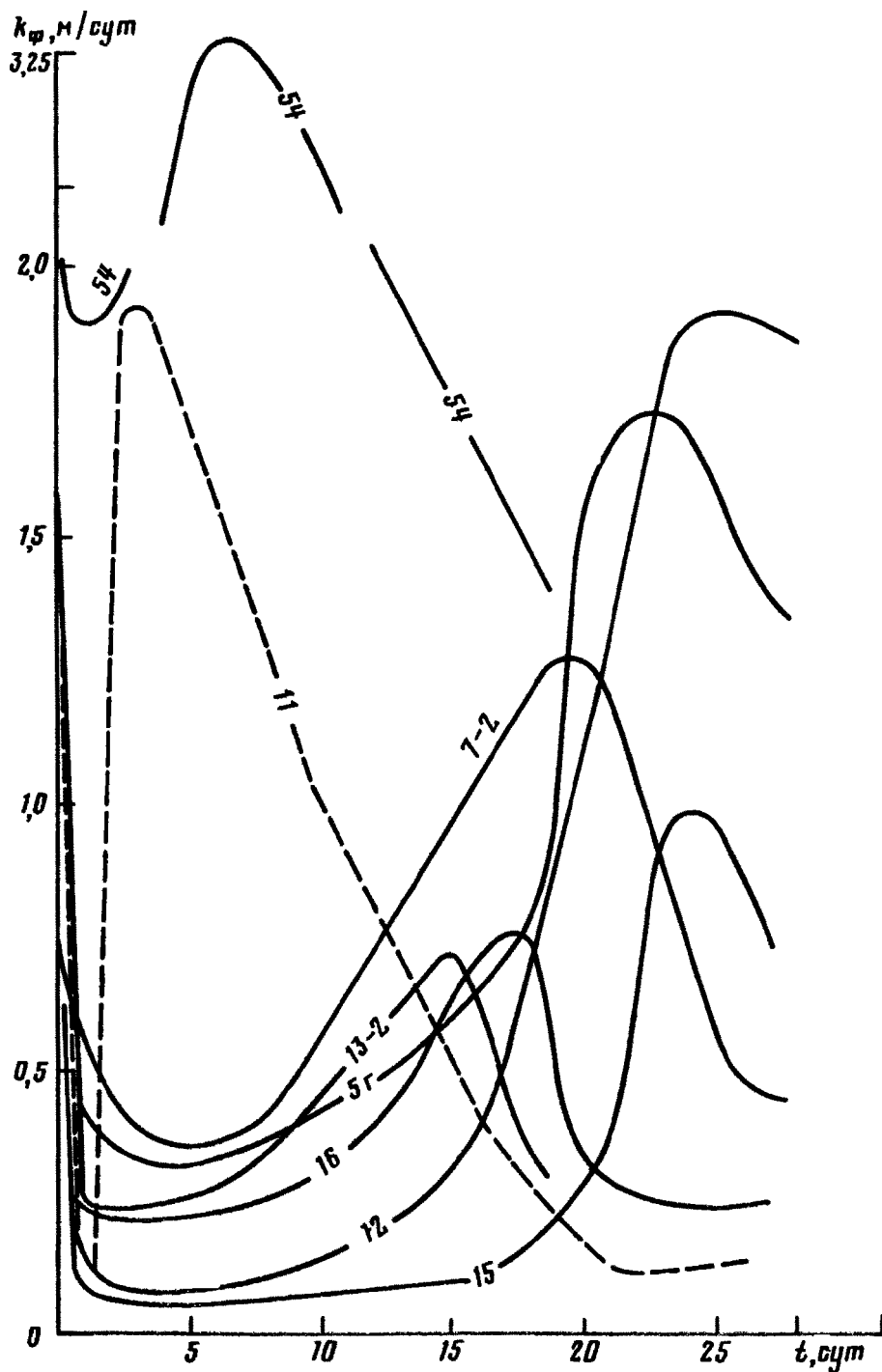


Рис. 39. Графики изменения коэффициента фильтрации во времени в монолитах высотой 1 м.

Цифры на кривых — номера монолитов

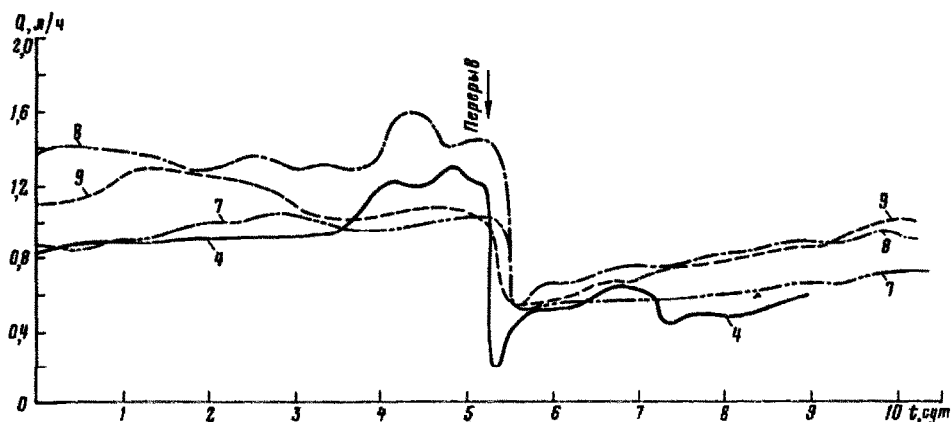


Рис. 40. Графики изменения расхода воды после кратковременного перерыва (10 мин) фильтрации.

Цифры на кривых — номера монолитов

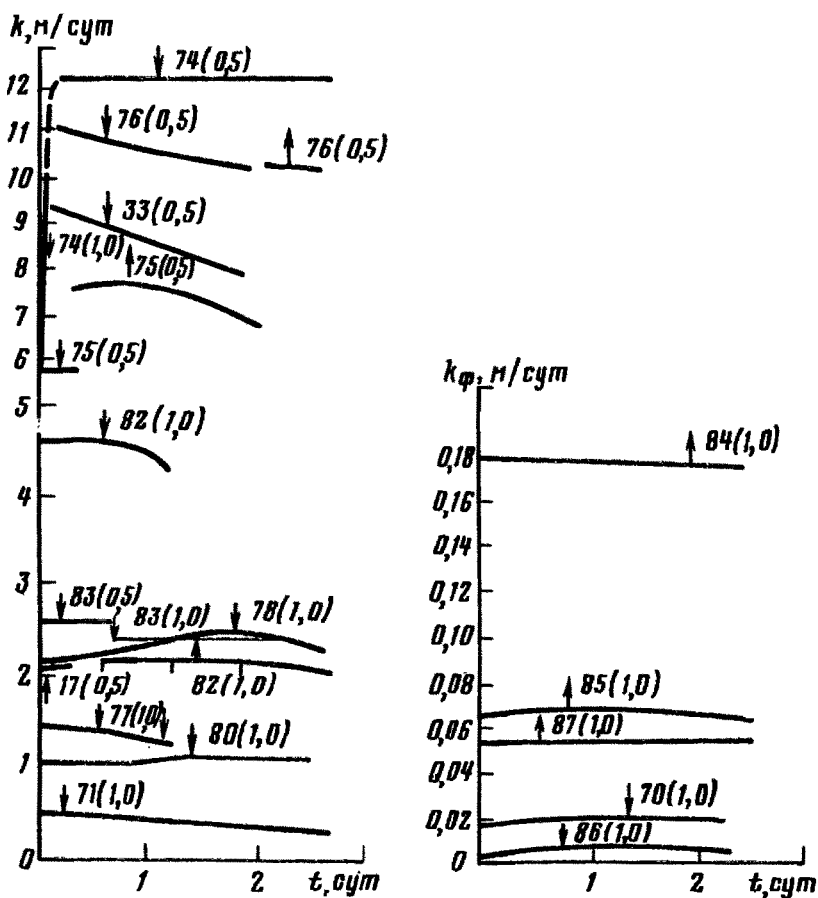


Рис. 41. Графики изменения коэффициента фильтрации во времени в монолитах, насыщенных в вакууме.

Стрелками дано направление фильтрации; цифры на кривых — номера монолитов; цифры в скобках — величины градиента фильтрации

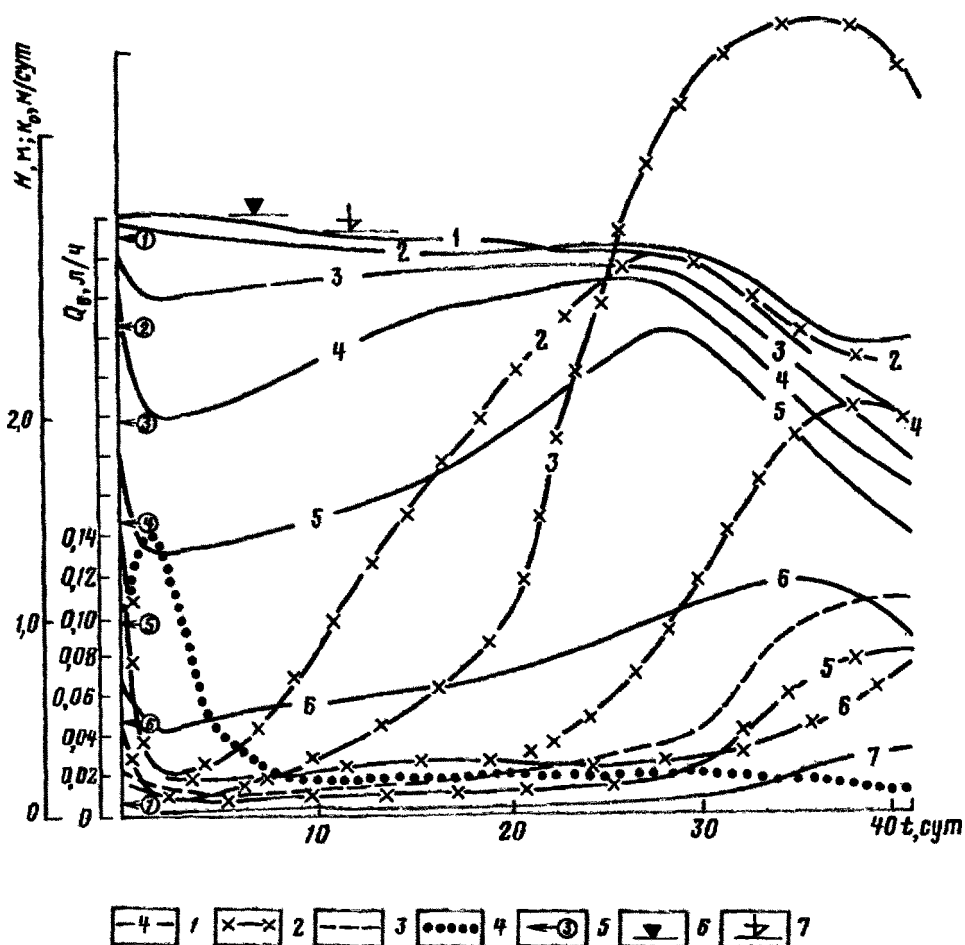


Рис. 42. Графики изменения пьезометрических напоров и коэффициента фильтрации во времени в монолите 2-2:

1 — пьезометрический напор и номер пьезометра; 2 — кривые коэффициента фильтрации в отдельных интервалах монолита (цифра — номер интервала); 3 — то же, всего монолита; 4 — расход выходящего из монолита воздуха в свободном состоянии; 5 — место установки пьезометра и его номер; 6 — уровень воды; 7 — верх монолита. Интервалы определения коэффициента фильтрации (от дневной поверхности, м): 1 — 0,44—0,9; 2 — 0,9—1,4; 3 — 1,4—1,9; 4 — 1,9—2,4; 5 — 2,4—2,9; 6 — 2,9—3,4

поры, пузырьки кольятируют их. По-видимому, основная причина роста напоров, наблюдаемых в опытах (см. рис. 41 и 42), — это кольятация пор воздухом. Зона, в которой происходит кольятация, смещается в направлении потока воды со скоростью до 0,06 м/сут. Напоры, возни-

кающие над зоной и достигающие 1,2 м и более, способствуют дальнейшему перемещению пузырьков воздуха вдоль потока воды и ускорению растворения воздуха в связи с повышением абсолютного давления внутри пузырьков.

Одновременно с выносом воздуха в свободном состоянии, в связи с понижением температуры фильтрующейся воды при прохождении ее через монолит и с повышением давления в пузырьках воздуха, происходит поглощение его водой.

Рассмотренные процессы обуславливают увеличение эффективной пористости и рост водопроницаемости, наблюдаемый в большинстве испытываемых монолитов при перераспределении заземленного воздуха (см. рис. 38 и 39). Повышение насыщенности грунта в течение этого периода подтверждается увеличением массы монолитов (см. рис. 29).

Интенсивность увеличения водопроницаемости во времени различна, она определяется особенностями процесса фильтрации. Так, интенсивность возрастает при высвобождении оставшихся 5 % заземленного воздуха. Объясняется это тем, что в этот период фильтрации проницаемость грунта становится высокой, в связи с чем через грунт в единицу времени фильтруется больше воды. По той же причине интенсивность роста водопроницаемости у монолитов высотой 1 м больше, чем у монолитов высотой 3 м.

Различия в интенсивности изменения водопроницаемости в монолитах 2-2 и 4-2 (см. рис. 38) объясняются тем, что при повторном опыте на фильтрацию подавалась менее газированная вода и поглощение заземленного воздуха фильтрующейся водой было более интенсивным.

Анализ графиков, приведенных на рис. 30 и 33, показывает, что увеличение коэффициента фильтрации в верхних интервалах монолитов, т. е. со стороны поступления воды, начинается раньше; раньше отмечаются и максимальные значения этого показателя. Поэтому можно сделать вывод, что в этих интервалах монолита поглощение воздуха происходит быстрее. Так, в монолитах высотой 3 м и более максимальное значение общего коэффициента фильтрации зафиксировано на 44–45-е сутки (монолит 4-2, см. рис. 31, и монолит 2-2, см. рис. 42), а в отдельных интервалах по высоте даже на 55-е сутки (см. рис. 30). В монолитах высотой 1 м это значение наблюдалось на 15–25-е сутки (см. рис. 39). В монолитах, где поровый воздух перед насыщением грунта водой был замещен углекислым газом, время, за которое коэффициент фильтрации достигает максимального значения, резко сокращается — в монолите 54 до шести суток, а в монолите 11 — до двух суток.

В вакуумированных перед насыщением монолитах, в которых практически отсутствовал заземленный воздух (см. рис. 41), увеличения коэффициента фильтрации не наблюдалось.

Все приведенные данные свидетельствуют о том, что изменение водопроницаемости грунта определяется ростом эффективной порис-

тости грунта в результате выноса заземленного воздуха. Период увеличения коэффициента фильтрации может быть назван второй фазой процесса фильтрации в монолите грунта.

После достижения коэффициентом фильтрации максимальных значений во всех опытах водопроницаемость грунта начинала интенсивно уменьшаться (см. рис. 39). Период повторного уменьшения водопроницаемости грунта называется третьей фазой процесса фильтрации.

Известно, что проницаемость грунта значительно понижается из-за воздуха, который выделяется из просачивающейся воды и аккумулируется в порах при повышении температуры или понижении давления. Причиной, вызывающей выделение воздуха из фильтрующейся воды, в проведенных опытах было отрицательное давление, возникающее в монолите в результате образования на поверхности монолита слабопроницаемой корки. Падение давления приводит к уменьшению равновесной концентрации газа, растворенного в воде, а следовательно, к выделению его из воды в свободном состоянии.

Постепенное уменьшение (сверху вниз) проницаемости грунта, наблюдаемое в монолитах, отмечается в большинстве случаев вслед за возникновением в соответствующих сечениях отрицательного давления (см. рис. 31).

Интенсивность образования пузырьков воздуха на стенках пор и рост их объема, по-видимому, пропорциональны количеству фильтрующейся через поры воды. В связи с этим относительно большое количество пузырьков воздуха будет образовываться в крупных порах, чем и объясняется интенсивное уменьшение проницаемости грунта в третьей фазе.

Таким образом, снижение проницаемости связано с уменьшением эффективной пористости грунта в результате адсорбции грунтом воздуха, выделяющегося из воды.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОПЫТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ НА МОНОЛИТАХ ГРУНТА

Экспериментальные исследования процесса фильтрации в монолитах грунта показали исключительную его сложность, что объясняется присутствием в поровом пространстве заземленного воздуха. Стало очевидным, что фильтрационные свойства исходно ненасыщенных грунтов должны определяться с учетом содержания такого воздуха. Вместе с тем нельзя было рекомендовать в качестве стандартного способа изучения водопроницаемости принятый в экспериментальных исследованиях метод многодневных опытов, поскольку он требует значительных затрат и в процессе его в грунте возникают побочные явления (перераспределение воздуха, образование корки на входе в монолит, возникновение разрежения и т. д.).

В результате анализа экспериментальных данных были выделены три фазы развития процесса, каждая из которых характеризуется однонаправленным изменением коэффициента фильтрации. Для стандартных определений коэффициента фильтрации целесообразно принять режим фильтрации, соответствующий второй фазе процесса, на протяжении которой k_f изменяется от минимальной величины, соответствующей наибольшему содержанию заземленного воздуха (в начале второй фазы) до максимальной, соответствующей полному насыщению грунта (конец второй фазы).

Для выяснения отдельных деталей методики были проведены некоторые специальные опыты, характеризующие режим фильтрации в особых условиях.

ВЛИЯНИЕ ВАКУУМИРОВАНИЯ МОНОЛИТА

При проведении экспериментов было замечено, что отрицательное давление в грунте, которое, как указано выше, вызывает выделение из воды пузырьков воздуха, может служить регулятором процесса фильтрации в монолите. В связи с этим на монолитах были проведены специальные эксперименты по фильтрации воды в условиях вакуума.

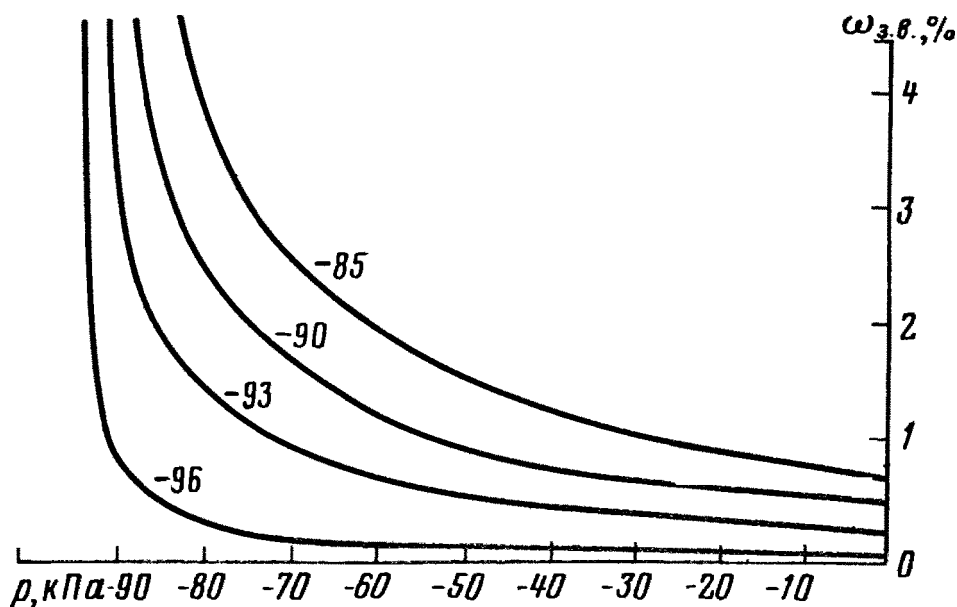


Рис. 43. Графики изменения объема воздуха при увеличении давления в зависимости от величины начального разрежения.

Цифры на кривых — величины начального разрежения, кПа

Прежде всего, экспериментально было установлено, что в одном и том же образце после его насыщения при атмосферном давлении и давлении от -95 до -90 кПа, при прочих равных условиях, остается не заполненным водой примерно одинаковый объем пор. При этом в обоих случаях коэффициенты фильтрации имеют близкие по абсолютной величине значения. Это указывает на достоверность получаемого значения k_f при давлении от -95 до -90 кПа, которым можно характеризовать водопроницаемость грунта при максимальном объеме защемленного воздуха. Затем были проведены опыты по измерению объема защемленного воздуха при увеличении давления в монолите. В монолите, последовательно насыщаемом при разрежениях -96 , -93 , -90 и -85 кПа оставалось примерно 5 % пор, не заполненных водой, т. е. содержащих защемленный воздух (рис. 43). В каждом из опытов постепенно уменьшалось разрежение и, следовательно, возрастало давление. На графике видно, как непрерывно сокращался объем защемленного воздуха. При нулевом (атмосферном) давлении, т. е. после снятия разрежения, в монолите оставалось поровое пространство, не заполненное водой: соответственно 0,1; 0,25; 0,5 и 0,85 % объема монолита. Поскольку при проведении экспериментов монолит был изолирован от атмосферы, а фильтрация и вынос воздуха не развивались, количество защемленного в нем воздуха оставалось постоянным, но объем его уменьшался.

Экспериментами было доказано, что объем защемленного в монолите воздуха снижался при увеличении давления. Следовательно, опыты по определению коэффициента фильтрации под вакуумом можно применять для его установления в необходимом диапазоне изменения объема защемленного воздуха, начиная их при заполнении монолита водой под вакуумом порядка -95 кПа и заканчивая при атмосферном давлении, соответствующем насыщению грунта водой при остаточном объеме порового пространства, не заполненного водой, равном 0,1 % объема монолита.

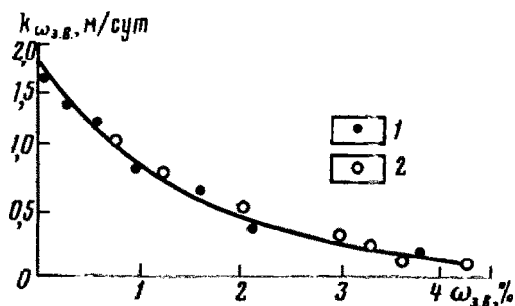
Влияние нестационарности фильтрации

При проведении экспериментов на монолитах наблюдается медленно изменяющееся неустановившееся движение воды, обусловленное монотонным увеличением свободного порового пространства, связанным с перераспределением и выносом водой защемленного воздуха. Этот период — вторая фаза фильтрации в монолитах — при принятом методе проведения экспериментов достаточно длителен: в монолитах высотой 3 м он продолжается 40–50 сут (см. рис. 31 и 42), а в монолитах высотой 1 м (см. рис. 39) — 15–25 сут. Именно поэтому при обработке экспериментальных данных k_f определялся по зависимости, не учитывающей неустановившийся режим фильтрации.

Представляет интерес оценка погрешности такого определения,

Рис. 44. График зависимости коэффициента фильтрации от объема заземленного воздуха.

Режимы фильтрации: 1 — стационарный; 2 — нестационарный



которая может быть выполнена разными способами. Экспериментальная оценка была выполнена в условиях вакуумирования монолита, в которых можно проводить опыт в установившемся и неуставившемся режимах фильтрации. Опытным путем было установлено совпадение величин коэффициентов фильтрации грунта при содержании заземленного воздуха от долей до 4 % объема монолита (рис. 44). В этом случае опыты проводились на одном и том же образце. Сначала опыт проводился в стационарном режиме, ступенями при давлениях —94, —80, —70 и —50 кПа и атмосферном давлении, а затем — при давлении, непрерывно изменяющемся от —90 кПа до атмосферного.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ С УЧЕТОМ ГИСТЕРЕЗИСА

Требования к методике проведения испытаний и обоснование расчетной схемы

Экспериментальные исследования фильтрации в исходно ненасыщенных связных недеформируемых грунтах позволяют достаточно надежно выявить особенности этого сложного процесса и факторы, наиболее существенно влияющие на его развитие.

Анализ результатов фильтрационных опытов, проведенных на монолитах недеформируемых связных грунтов, показывает, что основные причины изменения водопроницаемости — наличие в поровом пространстве заземленного воздуха и изменение его объема и распределения в процессе проведения опытных испытаний.

Другие факторы оказывают заметное влияние на водопроницаемость в основном в результате воздействия на динамику воздуха. Из них наиболее значительными являются следующие: а) температура воды, которая обуславливает вынос воздуха из грунта или накопление его в поровом пространстве; б) продолжительность процесса фильтрации, поскольку при большой его длительности на поверхности монолитов образуется корка, что приводит к изменению объема заземленного в поровом пространстве воздуха; в) способ насыщения монолита, который определяет количество заземленного воздуха, содержащегося в монолите в начале опыта.

При обосновании расчетной схемы определения водопроницаемости исходно ненасыщенных связных грунтов установленные особенности процесса фильтрации должны быть учтены.

Все существующие полевые методы установления коэффициента фильтрации не предусматривают получения информации о наличии заземленного воздуха, и это обстоятельство — их общий недостаток, которой не устраняется даже в таком сложном и дорогом методе опробования, как налив на поверхности земли (налив в котлован).

Анализ опыта применения различных методов определения фильтрационных параметров исходно ненасыщенных грунтов и проведенных экспериментальных исследований процесса фильтрации в таких грунтах позволяет сформулировать основные требования к проведению испытаний, цель которых — получение значений коэффициента фильтрации связных грунтов зоны аэрации.

Схема проведения опыта должна обеспечивать: 1) одномерность фильтрационного потока в условиях насыщенного и квазинасыщенного состояний грунта; 2) возможность определения коэффициента фильтрации на отдельных интервалах слоистой толщи грунтов; 3) получение информации о количестве заземленного воздуха в грунте; 4) небольшую продолжительность опыта. Ни один из существующих полевых методов определения коэффициента фильтрации не удовлетворяет этим требованиям, и вряд ли можно указать реальные перспективы их усовершенствования. Лабораторные методы также не удовлетворяют всем перечисленным требованиям, однако возможности их улучшения существуют.

Результаты исследований позволяют обосновать фильтрационную схему проведения опытов, удовлетворяющую указанным выше требованиям и обеспечивающую представительность получаемых данных.

Опыты должны проводиться на монолитах ненарушенной структуры. Форма монолита, по техническим соображениям, должна быть цилиндрической. Диаметр монолита следует принимать не менее 0,2 м, высоту — 0,5 м. Монолит должен быть покрыт водонепроницаемой оболочкой. Существуют два варианта опытов — в полевых условиях на больших монолитах и лабораторный.

Определение коэффициента фильтрации в полевых условиях на больших монолитах

Для проведения опыта отбираются монолиты грунта диаметром 0,2–0,3 м и высотой 0,5–1,5 м. После зачистки монолита на его поверхность пульверизатором наносится разогретый до 220 °С парафин слоем 1–2 мм. По высоте монолита в местах смены литологии грунта или на расстоянии 0,25–0,3 м устанавливаются пьезометры. Затем монолит обертывается марлевыми бинтами и повторно покрывается парафином.

На верхний и нижний торцы монолита надеваются водоприемник и поддон, представляющие собой металлические крышки с вмонтированными в их бортики трубками для подачи и отвода воды. Высота бортиков в крышках 4—5 см. В поддон и на верхний торец насыпают мелкий щебень слоем до 1 см. Пьезометры устанавливаются в 5 см от верхнего и нижнего торцов монолита, а также по его высоте через каждые 0,2—0,3 м. Пьезометрами служат металлические или стеклянные трубки диаметром 2—3 мм. Глубина их установки в тело монолита 4—5 см. В качестве пьезометров можно использовать тензиометры с пальчиковыми керамическими зондами. При замерах напоров тензиометры имеют некоторые преимущества, в частности они надежно работают при отрицательных давлениях, например в слоистых грунтах или при образовании корки.

Места установки пьезометров, а также зазоры в поддоне и водоприемнике заливаются парафином. После этого для придания покрытию жесткости монолит обертывается резиновым бинтом. Монолит устанавливается на весы (см. рис. 26).

При наличии металлических (полиэтиленовых) труб необходимых диаметров работы, связанные с гидроизоляцией, упрощаются. После зачистки монолита, его обертывают одним слоем марли и покрывают парафином. Затем надевают трубу и закрепляют ее так, чтобы зазор между монолитом и трубой везде был примерно одинаков.

Трубы по высоте снабжены штуцерами для пьезометров и ручками для транспортировки монолита. На торцевых частях труб делаются фланцы, с помощью которых крепятся водоприемник и поддон. Перед заливкой затрубья парафином в штуцеры вставляется проволока, которая вынимается при монтаже пьезометров. Парафин, заливаемый в затрубье, разогревается до 130—150 °С. В качестве наполнителя в затрубье засыпается крупнозернистый песок или мелкий щебень. Заливка парафина и засыпка песка проводятся отдельными интервалами. Как только парафин затвердевает, монолит подрезают снизу и транспортируют к месту проведения опыта. Надевают водоприемник, поддон и устанавливают на весы. Монтаж водосливов, пьезометров производится после установки монолита на весы.

При массовых определениях коэффициента фильтрации в полевых условиях, когда необходимо проводить опыт с большими монолитами (высотой 1 м и более), их размещают в шурфах. Над шурфом делается навес. Установкой монолитов в шурф обеспечивается возможность поддержания температурного перепада фильтрующейся воды на 3—4 °С, что способствует ускорению опыта.

Фильтрация начинается подачей в водоприемник обычной воды, из водоприемника отводится воздух. После появления воды в поддоне пьезометры заполняются водой, производится контрольное взвешивание монолита, и на фильтрацию подается дегазированная вода.

В процессе фильтрации поддерживаются постоянные уровни воды на входе ее в монолит и выходе из него, обеспечивающие сохранение градиента 0,8—1. В ходе опыта регистрируются расход воды, показания пьезометров и масса монолита. В первые 5—6 ч замеры ведутся через 10—20 мин, а затем — через 2—4 ч. Опыт продолжается до тех пор, пока значения массы монолита и расхода воды не будут постоянными (при прочих равных условиях).

Количество защемленного воздуха устанавливается по разности массы монолита при полном насыщении и в момент времени, для которого определяется коэффициент фильтрации. Полученная разность делится на объем монолита и выражается в долях единицы или процентах.

Расчет коэффициента фильтрации $k_{\omega_{3,в}}$ производится по зависимостям (15) — (17). По полученным данным строятся графики $k_{\omega_{3,в}} = f(\omega_{3,в})$ по отдельным интервалам или для всего монолита.

Определение коэффициента фильтрации в лабораторных условиях экспрессным методом

Экспрессный метод определения зависимости коэффициента фильтрации от объема защемленного воздуха основан на том, что изменение объема защемленного воздуха в порах грунта производится искусственно путем изменения давления в испытываемом образце в ходе опыта.

Методика предусматривает проведение опытов в лабораторных условиях на образцах ненарушенной структуры. Используются образцы цилиндрической формы высотой 0,4—0,5 м и диаметром 0,18—0,2 м. Отобранный образец помещается в металлическую обойму 2 (рис. 45). Зазор между образцом и обоймой заливается парафином 3 или другим водостойким материалом.

Для устройства водоприемника 13 и поддона 19 торцовые части образца срезаются на 15—20 мм. Для предупреждения разрушения грунта в водоприемник и в поддон укладывается сетка 4 (капроновая, металлическая или из другого материала), которая прижимается к торцам образца пружиной 15.

Для создания герметичности между обоймой, крышкой 6 и основанием 20 применяются резиновые прокладки 5. Крышка снабжена штуцерами для подачи воды на фильтрацию и подключения воздухоуловителя 16 и пьезометра 17. Обойма с образцом стягивается с крышкой и основанием винтом 14, установленным на скобе 7.

Для подачи и слива профильтровавшейся воды используются мерные стеклянные сосуды 10 и 22. В качестве резервного сосуда можно использовать стеклянную бутылку вместимостью 10—20 л.

Зависимость коэффициента фильтрации от объема защемленного воздуха может быть получена в близком к стационарному режиме при изменении давления в системе ступенями.

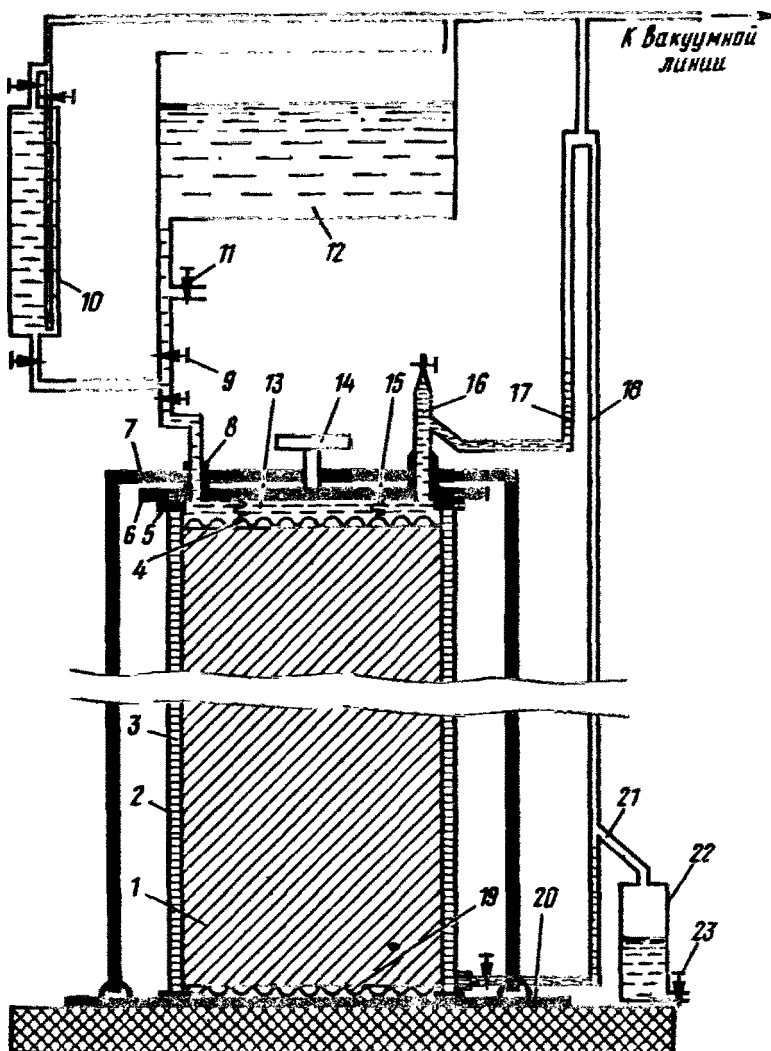


Рис. 45. Схема установки для определения коэффициента фильтрации экспрессным способом:

1 — образец грунта; 2 — металлическая обойма; 3 — парафин; 4 — сетка; 5 — резиновая прокладка; 6 — крышка; 7 — скоба; 8 — штуцер; 9 — зажим; 10 — сосуд Мариотта; 11 — отвод для заполнения системы водой; 12 — резервный сосуд; 13 — водоприемник; 14 — винт; 15 — пружина; 16 — воздухоуловитель; 17 — пьезометр; 18 — воздуховодная трубка; 19 — поддон; 20 — основание; 21 — водослив; 22 — мерный сосуд; 23 — отвод для слива фильтрата

Опыт проводится в такой последовательности. Собранную по схеме (см. рис. 45) установку проверяют на герметичность. Затем в системе с помощью вакуумного насоса создается разрежение — 90 кПа. Поддерживая это давление, сначала через отвод 11 заполняются дегазированной водой сосуды 10 и 12, а затем производится насыщение образца водой,

которая подается из сосуда 12 в водоприемник. С появлением воды в поддоне фиксируется время начала опыта и производится фильтрация при давлении -90 кПа. Вода на фильтрацию подается из сосуда 10. Уровень воды со стороны водоприемника задается установкой сосуда 10 на необходимую высоту и поддерживается автоматически, в поддоне — установкой водосливной трубки 21 на постоянной высоте. Фильтрация воды производится при градиентах $0,5-1$. Опыт при давлении -90 кПа проводится в течение получаса. После этого последовательно проводится фильтрация при давлениях -80 , -70 , -50 кПа и атмосферном. Переход от одной ступени к другой производится установкой в системе образца указанных давлений. Время проведения опыта на каждой ступени достигает 2 ч.

Количество воды, поступающей в образец на донасыщение при переходе со ступени на ступень, определяется по уменьшению объема воды в верхнем сосуде 10. Объем воды, поступившей в образец в данном случае, численно равен уменьшению объема пор, не заполненных водой. Полученное значение объема воды, отнесенное к объему образца и выраженное в процентах, показывает уменьшение объема пор, не заполненных водой при переходе на следующую ступень. При переходе от одной ступени к другой скорость изменения давления в системе образца должна быть такой, чтобы внизу в водосливной трубке оставалась вода, т. е. чтобы в образец не проник воздух.

При донасыщении образца вода не должна поступать в нижний сосуд. Момент появления фильтрата в нижнем сосуде 22 соответствует началу фильтрации при соответствующем объеме пор, не заполненных водой.

При проведении опыта измеряется объем воды в верхнем 10 и нижнем 22 сосудах; уменьшение объема воды в верхнем сосуде практически равняется увеличению объема воды в нижнем.

Опыт заканчивается фильтрацией при атмосферном давлении, которая соответствует полному насыщению грунта. Объем пор, не заполненных водой в образце при давлении -90 кПа (первая ступень), будет численно равен сумме объемов воды, поступившей в образец при всех ступенях давлений, т. е. разнице объемов поступившей в образец и вышедшей из него в течение всего опыта воды.

Вода в верхнем сосуде пополняется из резервного сосуда. Удаление воды из нижнего сосуда производится через штуцер 23 с помощью емкости, в которой давление меньше, чем в системе образца.

Обработка результатов опыта аналогична описанной выше.

Гидрофизические параметры являются коэффициентами уравнений влагопереноса, для которых точные аналитические решения отсутствуют. Выбор метода определения этих параметров зависит от направленности исследований (которые могут проводиться на стадии ТЭО, проектирования или при обосновании режима орошения и дренажа при эксплуатации мелиоративных систем), требуемой точности полевых наблюдений и прогнозирования расхода оросительной воды на инфильтрацию и изменение водно-солевого баланса грунтов.

В целом, методы получения параметров переноса влаги основаны на использовании эмпирических зависимостей между искомыми параметрами и какими-либо характеристиками свойств грунтов (полная влагоемкость, удельная поверхность частиц грунта, механический состав и др.) или на их определении опытным путем. Применение различного рода эмпирических моделей целесообразно в период предпроектных проработок и на стадии ТЭО. На последующих стадиях проектирования мелиоративных систем и при их эксплуатации следует ориентироваться на экспериментальные методы.

Существует множество экспериментальных методов определения параметров переноса влаги и солей, которые, по нашему мнению, можно классифицировать по ряду признаков, среди которых как главные выделим: 1) детерминированность моделей (детерминированные, стохастические, смешанные); 2) условия проведения опыта (лабораторные, полевые); 3) режим опытов (установившийся или неустановившийся); 4) схема массопереноса (линейная или радиальная); 5) форма образца (цилиндрическая или параллелепипедальная); 6) направленность процесса изменения влажности грунта (иссушение, увлажнение); 7) режим изменения влажности грунта (несколькими ступенями, одной ступенью, непрерывное изменение влажности); 8) динамичность потока (наличие или отсутствие потока влаги); 9) способ подачи или отвода влаги из грунта (при разрежении, нагнетании или комбинированный); 10) способ обработки результатов опытов (по определению параметров, по приближенному аналитическому решению, по конечно-разностному уравнению). Кроме того, как дополнительные классификационные признаки должны быть рассмотрены наличие контрольных датчиков всасывающего давления влаги или засоленности и размеры монолитов. Из известных способов должны быть выбраны оптимальные, позволяющие при минимальных затратах времени и средств и имеющейся технической оснащенности обеспечить заданную точность исследований.

Отметим, что зависимости влажности и коэффициента влагопереноса от всасывающего давления влаги связаны друг с другом, поэтому их

определение целесообразно совмещать в ходе одного опыта, что позволит существенно повысить точность исследований и одновременно сократить затраты на эксперименты.

Значительной части разработанных методик присущи недостатки, связанные в основном со сложностью аппаратуры, неадекватностью процессов влагопереноса в опытах и в естественных условиях, отсутствием контроля непосредственно в испытываемом образце, недостаточной представительностью образцов по размерам и трудоемкостью опытов.

В естественных и нарушенных техногенезом, в частности мелиорацией, условиях диапазон изменения всасывающего давления влаги в грунтах зоны аэрации находится в основном в диапазоне от 0 до -90 кПа, поэтому анализируем методы определения гидрофизических параметров в этом диапазоне.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ И ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ВЛАГОПЕРЕНОСА И ВЛАЖНОСТИ ОТ ВСАСЫВАЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ ВЛАГИ

Гидрофизические параметры грунтов — зависимости влажности и коэффициента влагопереноса от всасывающего давления влаги — определяются многообразием действующих сил, гетерогенностью порового пространства, структурой и текстурой грунта. Сложное сочетание этих факторов не позволило до настоящего времени построить обобщенную модель зависимостей $\theta(p)$ и $k(p)$. Использование экспериментальных полевых и лабораторных данных для прогнозирования водно-солевого режима грунтов, как правило, требует знания аналитических выражений для гидрофизических параметров грунтов.

В многочисленных статьях и монографиях предлагаются различные аналитические зависимости, основанные на теоретических предпосылках, полевых наблюдениях и данных экспериментов.

Зависимости $\theta(p)$ условно можно подразделить на две группы. К первой относятся выражения, содержащие неизвестные эмпирические коэффициенты, определение которых требует проведения полевых или лабораторных экспериментов с последующей оптимизацией. Ко второй группе относятся выражения, включающие значения почвенно-гидрологических констант; их определение проводится стандартными методами. Имеются и другие зависимости, например описание функции $\theta(p)$ с помощью кубических сплайнов.

Коэффициент влагопереноса ненасыщенных грунтов представляется двумя способами — как функция влажности или всасывающего давления влаги. Практическое использование аналитических выражений для гидрофизических параметров грунтов возможно, если они отвечают ряду

условий: адекватности математических функций физической сущности искомых параметров; гладкости и непрерывности математических функций $\theta(p)$, $k(\theta)$ и $k(p)$; непрерывности первой производной $\theta'(p)$; возможности аппроксимации математической функции в виде, достаточно приближенном к реальной зависимости; использованию минимального машинного времени для счета функций. Основными являются первые четыре условия.

Исследования, проведенные А.М. Зейлигером, показали, что, во-первых, структура некоторых математических функций может быть представлена в общем виде $\theta = (\theta_{пв} - \theta_0) \cdot f(A, B, p) + \theta_0$ (где $\theta_{пв}$ — полная влагоемкость, θ_0 — влажность на нижней границе измеренного диапазона, A, B — эмпирические коэффициенты, которые требуется определить); во-вторых, наилучшую сходимость с экспериментальными данными (от глин до песков) дают зависимости

$$\frac{\theta - \theta_0}{\theta_{пв} - \theta_0} = \frac{1}{[1 + (\lambda p^n)]^m},$$

где λ, n, m — коэффициенты, определяемые эмпирически.

Анализ зависимостей для определения коэффициента влагопереноса показал, что в предварительных расчетах можно использовать выражения, в которых в качестве аргумента взята влажность грунта

$$k = k_\phi \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_{пв} - \theta_0} \right)^n; \quad \bar{\theta} = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_{пв} - \theta_0};$$

$$k = k_\phi (\bar{\theta})^n \left[\frac{\int_0^{\bar{\theta}} \frac{d\bar{\theta}}{p(\bar{\theta})}}{\int_0^{\theta} \frac{d\bar{\theta}}{p(\bar{\theta})}} \right]^2,$$

а также выражения, записанные относительно всасывающего давления влаги,

$$k = k_\phi = \frac{A}{A + p^B};$$

$$k = k_\phi \left\{ \exp \left[- \left(\frac{p}{B} \right)^C \right] \right\}^N;$$

$$k = k_\phi \left\{ \exp \left[- \left(\frac{p}{B} \right)^C \right] \right\}^{0,5} \left\{ 1 - \Gamma \left[\left(\frac{p}{B} \right)^C C \right] \right\}^2,$$

где A, B, C, N — коэффициенты, определяемые оптимизационными расчетами по зависимости $\theta(p)$; Γ — неполная гамма-функция.

Использование для расчетов оптимизационных методов показало, что наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных отмечается тогда, когда выражения для коэффициента влагопереноса имеют два или три показателя, подлежащих определению.

Весьма перспективными представляются методы расчетов гидрофизических параметров грунтов по данным о гранулометрическом составе грунтов, межагрегатной и внутриагрегатной пористости, минеральном составе и других физико-механических характеристиках. Один из подходов к созданию модели зависимости влажности от всасывающего давления влаги основан на применении регрессионного уравнения, связывающего влажность (при фиксированном значении всасывающего давления влаги) с процентным содержанием различных фракций грунта. В другой модели по данным о гранулометрическом составе рассчитываются радиусы пор для каждой фракции, а затем по формуле Жюрена находится всасывающее давление влаги [26]. Существует также способ определения $\theta(p)$ для реального грунта, основанный на учете объемов отдельных фракций грунта и минерального состава.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Экспериментальные методы целесообразно разделить на полевые, основанные на интерпретации результатов натурных режимных наблюдений за влажностью грунта и всасывающим давлением влаги, и лабораторные, включающие опытные испытания образцов грунта ненарушенного сложения (монолитов) различными способами.

Полевые методы предусматривают одновременное (синхронное) определение влажности грунта (любым из известных прямых или косвенных методов) и измерение всасывающего давления влаги (тензиометрами), по которым строится зависимость $\theta(p)$. Преимущество этих методов заключается в том, что θ и p определяются в естественном режиме влагопереноса.

Недостатком полевых методов является то, что при медленном изменении влажности грунта для получения зависимости $\theta(p)$ требуется длительное время. Кроме того, наблюдаемые в природных условиях смены циклов увлажнения и иссушения грунта в пределах небольших перепадов всасывающего давления затрудняют определение зависимости $\theta(p)$ отдельно для ветви увлажнения или иссушения.

Лабораторные методы определения зависимости $\theta(p)$ можно подразделить на три группы. В одной из них используются приборы, действующие по схеме капилляриметра, которая основана на том, что влага грунта приводится в гидростатическое равновесие со свободной водой путем понижения (повышения) давления последней до уровня давления влаги в грунте, находящемся в специальной камере, на порис-

той мембране. Давление можно также задавать в пористом зонде, помещенном в образец грунта. В грунте в этом случае поровый воздух связан с атмосферой.

Разрежение в системе задается ступенями. На каждой ступени испытание заканчивается после прекращения поступления воды из грунта в водосборник (при обезвоживании) или изменения массы образца. Мерой всасывающего давления влаги грунта является манометрическое давление, взятое с отрицательным знаком. По полученным в момент равновесия значениям влажности грунта и всасывающего давления строится график зависимости между ними.

Ко второй группе относятся методы, основанные на определении объемов поступающей в образец и вытекающей из него воды (в ходе влагопереноса) при переходе от одной ступени всасывающего давления влаги к другой.

В состав третьей группы входит метод мембранного пресса, основанный на том, что приведение в гидростатическое равновесие влаги грунта со свободной водой достигается путем повышения (понижения) общего давления газа в камере. Грунт при этом соприкасается с пористой мембраной, к которой с обратной стороны подведено атмосферное давление, или в образец грунта установлен пористый зонд внутри которого поддерживается атмосферное давление. Давление под пористой мембраной (в зонде), равное атмосферному, принимается за 0. Отсюда, значение задаваемого положительного давления, взятое с обратным знаком, принимается численно равным значению всасывающего давления влаги.

Различные модификации приборов для измерения влажности достаточно подробно описаны в литературе [8, 14].

Для работы в лабораторных условиях применяется капилляриметр Смеркера, модифицированный С.И. Долговым. Здесь пористая мембрана вставлена в воронку, которая нижним концом через резиновую пробку вводится в бюретку. К нижней поверхности мембраны подведен жгут, по которому стекает собирающаяся вода.

Увлажненный образец грунта помещают на мембрану. В бюретке создается определенное разрежение, в результате чего возникает перепад давлений и вода вытекает из образца грунта в бюретку. Опыт проводится ступенями. По известным значениям конечной влажности грунта, объема вытекающей воды и величин разрежения на каждой ступени рассчитывается зависимость $\theta(p)$.

Отсутствие контроля за всасывающим давлением влаги непосредственно в образце грунта обуславливает необходимость проведения опыта на каждой ступени до прекращения оттока воды, что предопределяет большую длительность опыта.

В Киевском государственном университете опыты по получению зависимости $\theta(p)$ проводились на монолитах грунтов ненарушенной структуры, помещенных в металлические цилиндры высотой 50 мм и диаметром 100 мм. К торцам монолита подсоединяются камеры

пониженного давления. В середину его через отверстие в цилиндре устанавливается контрольный тензиометр. Насыщение образца производится путем подачи воды снизу и контролируется тензиометром. Обезвоживание образца проводится одновременно через обе камеры, которые подсоединяются к балластному сосуду с заданным отрицательным давлением. Опыт производится при ступенях разрежения $-2,5$; -5 ; -10 ; -20 ; -50 и -70 кПа. При достижении равновесного состояния на каждой ступени замеряется объем вытекшей воды. Показания контрольного тензиометра в это время должны соответствовать задаваемому разрежению.

Принцип измерения потенциала влажности с помощью мембранного пресса был предложен в 1939 г. Дж. Ричардсом. Л. Ричардс разработал конструкции приборов. Мембранный пресс представляет собой металлический цилиндр с дном и съемной крышкой; он разделен полупроницаемой мембраной на камеру повышенного давления и камеру с атмосферным давлением. Элементами прибора являются также измеритель и источник избыточного давления. При работе в диапазоне давлений от 0 до 90 кПа в качестве полупроницаемой мембраны используются керамические пластины. Для измерения давлений в пределах от 0 до 250 кПа применяется целлофановая пленка. В зависимости от вида мембраны приборы носят название пластинного или пленочного прессов.

В настоящее время разработаны различные модификации мембранных прессов. В Ленинградском агрофизическом научно-исследовательском институте применяется пластинный мембранный пресс. Для пресса используются специально изготовленные керамические пластины. На одну сторону пластины (по ее образующей) крепится тонкая листовая резина. Между резиной и пластиной прокладывается металлическая или капроновая сетка. Полость между резиной и керамической пластиной служит камерой атмосферного давления. Штуцер вводится в камеру через керамическую пластину. Для размещения большого числа проб грунта в камеру высокого давления устанавливается (одна на одну) несколько пластин.

Мембранные пленочные прессы имеют самые разнообразные конструкции. Пресс, выпускаемый в США, состоит из стального цилиндра и крышек, соединенных болтами. Пленка крепится поверх металлической или капроновой сетки на диск, к которому снизу припаяна выводная трубка. Для улучшения контакта грунта с пленкой применена диафрагма из листовой резины, с помощью которой при небольшом перепаде давлений в прессе и над диафрагмой образцы прижимаются к пленке. Эта конструкция позволяет пользоваться цилиндрами различной высоты, т. е. подвергать испытаниям образцы необходимой высоты. Известен ряд других приборов, отличающихся от описанной конструкции лишь способом соединения деталей.

Изучение зависимости влажности от всасывающего давления на прессах может производиться с одним большим образцом грунта или с боль-

шим числом малых. При проведении опыта с одним образцом для сокращения времени берут образцы большого диаметра и малой толщины. Избыточное давление задается ступенями с регистрацией объема выходящей воды. Влажность, соответствующую задаваемым давлениям, определяют пересчетом по данным об объеме вытекшей воды и о конечной влажности грунта. В другом варианте пробы грунта отбирают в металлические или пластмассовые кольца диаметром 30–50 мм и высотой 10 мм с необходимым числом повторностей. Влажность грунта определяется после каждой ступени давлений, для чего из прибора вынимают несколько образцов. Образцы грунта перед установкой в пресс насыщаются до полной влагоемкости.

Достоинством мембранного прессы является то, что с его помощью можно исследовать большой диапазон влажности грунта. Этот прибор можно использовать и в качестве капилляриметра, если избыточное давление заменить равным ему по величине разрежением под мембраной. Кроме того, есть приборы, которые действуют одновременно и как капилляриметр, и как пресс. В таких приборах задается разрежение в одной из камер и избыточное давление в другой, где помещен образец.

Следует отметить, что зависимости влажности от всасывающего давления влаги, установленные с помощью капилляриметра и мембранного прессы, различаются между собой. Влажность грунта при одном и том же всасывающем давлении, определенная на капилляриметре, ниже, чем на мембранном прессе. Объясняется это в основном наличием в порах грунта заземленного воздуха, объем которого уменьшается под воздействием избыточного давления, а освобождаемое пространство заполняется влагой. Этот объем влаги и увеличивает влагоемкость грунта в опытах на мембранном прессе. Однако проведенные эксперименты [23] показали, что расхождение значений влажности грунта при одном и том же всасывающем давлении влаги небольшое — не превышает 0,5 объема, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к точности определения зависимости $\theta(p)$.

К недостаткам в работе большинства рассматриваемых конструкций прессов можно отнести трудность поддержания в течение опыта хорошего контакта грунта с мембраной. Контакт ухудшается в результате усадки грунта при иссушении, что значительно увеличивает время проведения опыта. Негативным является и то, что для опыта берутся небольшие по размеру образцы грунта. Кроме того, при длительном пребывании образца под высоким давлением повышается растворимость солей, что нарушает естественное течение процесса. Отсутствие контроля за давлением внутри образца создает сложности при проведении опыта в режиме увлажнения грунта.

Кроме прессов с вертикальным потоком для определения $\theta(p)$ Л. Ричардс и П. Ричардс предложили использовать прибор с радиальным потоком. В качестве камеры атмосферного давления в приборе применяется цилиндрический зонд, установленный соосно в середину цилиндра.

дрического образца грунта. Преимуществом такого прибора является то, что при усадке грунта в меньшей степени, чем в прессах с плоскими мембранами, нарушается контакт грунта с мембраной. Кроме того, диффундирующий через мембрану газ удаляется с помощью специальной ловушки. Этот прибор может действовать и как капилляриметр. По данным опыта на этом приборе при определении зависимости $\theta(p)$ можно произвести расчет зависимости коэффициента влагопереноса от всасывающего давления влаги.

Один из основных недостатков этого метода — отсутствие контроля за давлением влаги непосредственно в образце грунта, поэтому требуется длительное выдерживание образца на каждой ступени опыта, особенно при увлажнении грунта.

Конструкция пресса и методика получения рассматриваемых зависимостей были в дальнейшем усовершенствованы рядом исследователей.

Особенность мембранного пресса, разработанного в МГУ [28], заключается в том, что образец грунта закладывается в резиновый мешочек. Мембрана состоит из пористого зонда, на который надета целлофановая пленка. Такая конструкция мембраны позволяет производить опыты в большом диапазоне давлений — от 0 до -3 МПа. Резиновый мешочек способствует уплотнению грунта и обеспечивает надежный контакт с мембраной. Методика предусматривает проведение опыта с грунтом нарушенной структуры, поэтому значения влагоемкости грунта при нулевом давлении могут существенно отличаться от значений влагоемкости, характеризующих грунт ненарушенной структуры при том же давлении. Последнее обстоятельство — один из недостатков предложенной методики.

Таким образом, общими для прессов являются следующие недостатки: 1) возможное нарушение контакта испытываемого грунта с пластиной; 2) использование в опытах небольших по объему образцов грунта; 3) нарушение процесса иссушения или увлажнения в результате перерыва опыта для отбора проб на влажность; 4) завышение влажности грунта при определенном давлении в результате уменьшения объема защемленного воздуха; 5) нарушение естественного режима растворимости солей в результате задания положительного давления; 6) трудность (а на некоторых конструкциях невозможность) проведения испытаний в режиме увлажнения.

Определение коэффициента влагопереноса грунта в основном проводится в режиме обезвоживания в условиях стационарного и нестационарного потока влаги.

Известны многочисленные методы определения k_v в натурных (зондовые методы) и лабораторных условиях, которые достаточно детально описаны А.М. Глобусом [8].

Наиболее широко распространено определение коэффициента влагопереноса в установившемся режиме с помощью потокометров различных конструкций. Принцип работы потокометра заключается в том, что с

помощью специальных камер создается разность гидродинамического напора, обуславливающая возникновение потока влаги. Необходимое давление в камерах обеспечивается вакуумным насосом и поддерживается с помощью балластного сосуда.

При задании в верхней и нижней камерах разного давления возникает поток влаги, причем опыт ведется до полной стабилизации процесса переноса влаги. Для замера всасывающего давления в образце устанавливаются контрольные пористые зонды.

В ходе опыта ведутся систематические замеры объема поступающей в образец и вытекающей из него воды, а также всасывающего давления. Опыт считается законченным после достижения постоянных значений расхода воды и всасывающего давления влаги.

Коэффициент влагопереноса k_v рассчитывается по зависимости

$$k_v = -q / (F \Delta H),$$

где q — расход потока влаги; F — площадь поперечного сечения образца; ΔH — перепад гидродинамического напора между датчиками, находящимися на расстоянии l друг от друга.

Полученную величину k_v относят к среднему значению всасывающего давления, измеренного по двум контрольным зондам тензиометров.

Аналогично проводят опыты при других значениях коэффициента влагопереноса при давлениях $-2,5$; -5 ; -10 ; -20 ; -30 ; -50 и -70 кПа. По полученным данным строят график зависимости коэффициента влагопереноса k_v от всасывающего давления влаги p .

Основной недостаток рассмотренного метода — большая трудоемкость (опыты продолжаются несколько недель или даже месяцев), связанная с необходимостью достижения стационарных условий влагопереноса.

Методы определения коэффициента влагопереноса в нестационарном режиме требуют значительно меньшего времени. Они многочисленны и подразделяются на две группы [12]: 1) методы, основанные на приближенных решениях уравнения влагопереноса; 2) методы, основанные на представлении нестационарного потока влаги в виде суммы стационарных этапов.

Поскольку уравнения, описывающие нестационарный влагоперенос, существенно нелинейны, получить для них точное аналитическое решение краевых задач современными методами математической физики невозможно. Поэтому речь может идти только о приближенных решениях, полученных в результате различного рода допущений, линеаризующих уравнение. Р. Гарднером дано два приближенных решения уравнения влагопереноса для расчета k_v .

Первое решение дифференциального уравнения влагопереноса, записанного относительно функции влажности, состоит в том, что, во-первых, закон зависимости влажности от давления в пределах неболь-

ших его перепадов предполагается линейным и, во-вторых, в пределах того же небольшого изменения давления коэффициент влагопереноса считается независимым от влажности, а следовательно, и от давления. При этих предпосылках уравнение становится линейным и может быть решено в бесконечных рядах. А.М. Глобус, проведя соответствующие исследования, предложил способ оценки времени, после которого в решении можно ограничиться первым членом. В результате получаем вполне приемлемое выражение и методику для определения коэффициента влагопереноса по номограммам.

Метод прост и удобен, но погрешности, вызванные в основном линеаризацией (независимость коэффициента на каждой ступени опыта), значительны.

Второе решение основано на применении метода Фурье (метод разделения переменных). В соответствии с этим методом функция распределения влажности, в простейшем случае зависящая от пространственной координаты и времени, представляется в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от пространственной координаты, а другая — только от времени. Разделяя переменные, получают два уравнения — одно по пространственной координате, другое по времени. Предполагая, что величина k_v мало изменяется по пространственной координате, получают зависимость для расчета коэффициента влагопереноса. Этот метод дает меньшие погрешности, так как при его использовании предполагается независимость коэффициента влагопереноса только от пространственной координаты. Если поставить эксперимент таким образом, чтобы влажность (давление) по протяжению образца менялась мало, то погрешности будут минимальны.

В настоящее время наиболее распространен метод определения k_v , предложенный Л. Ричардсом и П. Ричардсом и заключающийся в том, что обезвоживание (увлажнение) грунта производится с помощью полупроницаемого зонда цилиндрической формы, установленного в образец той же формы. Опыт проводится на прессе или в зонде, где создается разрежение, под влиянием которого вода перетекает из образца в зонд. В ходе опыта регистрируется скорость вытекания воды, и по изменению ее во времени вычисляется коэффициент влагопереноса.

Уточненный метод определения зависимости $k_v(p)$, предложенный И.И. Судницыным [28], сравнительно прост и позволяет повысить точность определений коэффициента влагопереноса. При выводе формулы для расчета k_v принимаются экспоненциальная зависимость между влажностью грунта и всасывающим давлением влаги и степенная зависимость между всасывающим давлением влаги и коэффициентом влагопереноса.

Анализ существующих методов определения k_v показывает, что подавляющему их большинству присущи те или иные недостатки, в основном характерные и для методов определения зависимости $\theta(p)$. К общим для всех методов недостаткам можно отнести значительные затраты

труда и времени на проведение опыта, недостаточно представительные размеры образцов, несовершенство аппаратуры и др. Все это обусловило необходимость проведения новых исследований и разработки более совершенных методов определения гидрофизических параметров.

Методы определения гидрофизических параметров грунтов с учетом гистерезиса

Определение зависимости влажности θ от всасывающего давления влаги p производится в лабораторных условиях на образце ненарушенной структуры цилиндрической формы высотой 0,21–0,22 м и диаметром 0,15–0,18 м.

Испытываемые образцы отбираются в поле или в лаборатории из монолитов грунта. Для каждой разновидности грунта отбираются два-три образца. Цилиндрическую форму образцу придают специальным разъемным резакон, изготовленным из металлической трубы высотой 0,05–0,07 м с заостренным нижним концом и приваренными ручками. Параллельно отбирают образцы грунта в пять–семь колец для определения объемной массы грунта и полной влагоемкости; высота колец 5 см, диаметр 7 см.

Установка для определения влажности грунта собирается следующим образом. Вырезанный образец грунта помещается в металлическую обойму (рис. 46). Зазор между образцом грунта и обоймой заливается разогретым парафином. Камерой пониженного давления служит керамический зонд цилиндрической формы (рабочий зонд), установленный отверстием вниз в центр образца соосно его высоте. Зонд тензиометра помещается эксцентрично у боковой поверхности образца. В качестве зондов используют бактериальные фильтры с длиной рабочей части 21–22 см, диаметром 3 см. Перед установкой определяется давление барботирования зондов и их объем. Торцы образца также заливают парафином (см. рис. 46).

Опыт проводится в такой последовательности: сначала проводится обезвоживание образца от влажности, соответствующей полной влагоемкости грунта, затем его увлажняют, после чего вновь обезвоживают.

Первоначальное насыщение образца грунта до полной влагоемкости производится дегазированной водой под разрежением. Для этого образец помещается в герметичную камеру, в которой создается разрежение –100 кПа. Затем, поддерживая разрежение, в камеру медленно подается вода. После того как образец покроется водой, разрежение постепенно снимается. Параллельно с этим подвергаются насыщению образцы грунта для определения полной влагоемкости и объемной массы. Насыщенный образец подвешивается на кронштейн.

К рабочему зонду с помощью тройника 4 подсоединяется мерный сосуд для замера объема сдвинувшейся в ходе опыта воды. Для этой цели используются мерные цилиндры вместимостью 0,5–1 л. Цилиндры

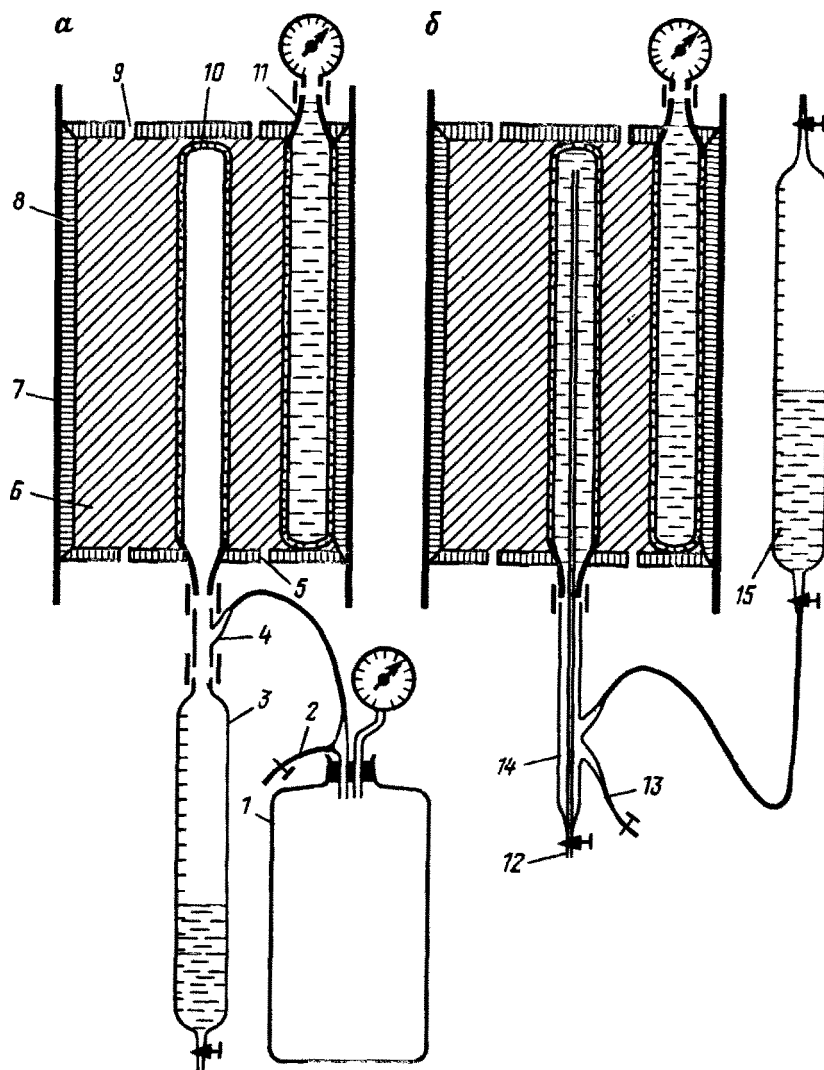


Рис. 46. Схема установки для определения гидрофизических параметров при обезвоживании (а) и при увлажнении (б) :

1 — балластный сосуд; 2 — отвод к насосу; 3 — мерный сосуд; 4 — тройник; 5 — отверстие для подачи воды при насыщении образца; 6 — образец грунта; 7 — металлическая обойма; 8 — парафин; 9 — отверстие для выхода воздуха при насыщении образца водой; 10 — камера отрицательного давления; 11 — тензиометр; 12 — отвод для удаления воздуха из зонда при заполнении его водой; 13 — отвод для подачи воды; 14 — трубка с отводами; 15 — мерный сосуд

в нижней части имеют отвод, через который удаляется вода после их заполнения. К зонду, установленному на боковой поверхности образца, подключается воздухоуловитель с манометром (вакуумметром) для замера всасывающего давления влаги в ходе опыта. Наиболее чувствительны и точны *U*-образные ртутные манометры.

Обезвоживание производится при незаполненном водой рабочем зонде. Это исключает возможность поступления воды обратно в образец в случае разгерметизации системы. По возможности следует поддерживать близкую к природной температуру.

После задания разрежения в рабочем зонде фиксируется время начала опыта. Для поддержания постоянного разрежения используется балластный сосуд вместимостью 10–20 л. Контроль за величиной разрежения в рабочем зонде ведется манометром, установленным в балластном сосуде. В ходе опыта замеряют объем сдrenированной воды, снимают показания контрольного тензиометра и отмечают время замера. В первые 2–3 ч опыта отсчеты снимаются через 10–15 мин, затем реже, а спустя 2–3 сут — один-два раза в сутки.

Когда всасывающее давление в образце от – 60 до – 70 кПа, опыт заканчивают. Длительность опыта по обезвоживанию образца с одной ступенью разрежения, равной –100 кПа, до давления –70 кПа составляет в среднем 5–7 сут. Всасывающее давление влаги в момент замера считается отвечающим равновесному состоянию влаги.

Объемная влажность грунта θ_p для соответствующего всасывающего давления p при известной величине полной влагоемкости грунта $\theta_{пв}$ рассчитывается по формуле

$$\theta_p = \theta_{пв} - (V_v/V_r) \cdot 100 \%,$$

где V_v — объем воды, вытекшей из образца грунта к моменту замера всасывающего давления; V_r — объем образца грунта.

По полученным данным строится график зависимости $\theta(p)$, который целесообразно использовать для характеристики грунтов, находящихся значительное время в насыщенном состоянии, в результате чего влажность их могла достичь полной влагоемкости.

Для проведения опыта в режиме увлажнения собирают установку по схеме, показанной на рис. 46, б. Рабочий зонд заполняется водой с помощью трубки 14 путем создания в нем через отвод 12 разрежения.

Чтобы вода во время заполнения зонда не попадала в грунт, разрежение в нем должно на –3 . . . –4 кПа превышать по абсолютной величине значение p , полученное при обезвоживании в конце опыта. Мерный цилиндр, из которого в ходе опыта подается вода, располагается так, чтобы уровень воды в нем находился на середине образца.

Первое минимальное разрежение задается на 20–30 кПа больше давления, при котором закончено обезвоживание, затем увеличивается на 20, 10 и 5 кПа, и заканчивается опыт при нулевом давлении. Например, если опыт был закончен при давлении – 70 кПа, то задаются следующие значения разрежения: – 40, – 20, –10 и 0 кПа.

Переход от меньшей ступени разрежения к большей производится следующим образом. При достижении в ходе опыта в тензиометре давле-

ния, близкого по величине к заданному в рабочем зонде, подачу воды прекращают на 0,5—1 сут, с тем чтобы сделать контрольный замер всасывающего давления влаги на данной ступени. Так поступают и на следующей ступени разрежения. Если величина всасывающего давления влаги в образце близка к 0, необходимо следить, чтобы не было потерь воды.

Объемную влажность θ_p для всасывающего давления влаги в режиме увлажнения рассчитывают по формуле

$$\theta_p = \theta_k + (V_B/V_r) \cdot 100 \%,$$

где θ_k — конечная объемная влажность, полученная при обезвоживании образца; V_B — объем воды, поступившей в образец грунта к моменту замера всасывающего давления.

По данным контрольных замеров, т. е. по значениям всасывающего давления влаги и влажности грунта, зафиксированным в конце испытаний при каждой ступени давления, строится график зависимости $\theta(p)$, который будет характеризовать влажность грунта в процессе его увлажнения.

В дальнейшем опыт производится повторно в режиме обезвоживания, начиная с влажности грунта, достигнутой при увлажнении. Условия проведения опыта аналогичны предшествующему обезвоживанию. Зависимость $\theta(p)$, полученную по данным повторного обезвоживания, рекомендуется использовать для характеристики влажности грунтов в зоне аэрации и активного влагообмена.

Расчеты коэффициента влажностной емкости μ_B , характеризующего изменение влажности θ в единице объема грунта при соответствующем изменении всасывающего давления p , сводятся к нахождению по зависимости $\theta(p)$ производной $d\theta/dp$. Зависимость влажности от всасывающего давления влаги обуславливает зависимость коэффициента влажностной емкости от давления $\mu_B(p)$.

Ввиду линейности зависимости H от P , зависимость $\mu_B(p)$ можно переписать в виде $\mu_B(H)$. Так как функция $\theta(p)$ всегда является возрастающей, величина $\mu_B(p) = (d\theta/dp)$ всегда положительна.

Коэффициент влагопереноса рассчитывается по результатам проведенного опыта с использованием зависимостей $\theta(p)$ и $\theta(t)$. Значения p берутся равными 4 кПа, значения Δp в наиболее крутой части графика зависимости $\theta(t)$ принимаются 0,1—0,2 сут, а по мере выполаживания графика — 1 сут. Значение влажности грунта, соответствующее давлению —100 кПа, определяется путем экстраполяции. Для построения графика зависимости $K_B(p)$ коэффициент влагопереноса определяется при значениях всасывающего давления — 5, —10, — 20, —30, — 50 и — 70 кПа.

Кроме того, для построения такого графика необходимы значения коэффициентов фильтрации, полученные при полной влагоемкости и квазинасыщенном состоянии грунта, т. е. при наличии в порах грунта

заземленного воздуха. Оба эти значения k_{ϕ} характеризуют водопроницаемость грунта при всасывающем давлении влаги, равном 0. Первое значение используется для построения графика $k_{\phi}(\rho)$ в режиме обезвоживания от начальной полной влагоемкости, а второе — для графика $k_{\phi}(\rho)$ в режиме обезвоживания от определенной начальной влажности грунта. Справедливость обобщенного закона Дарси для условий влагопереноса в грунтах, в том числе в монолитах грунта, означает справедливость в каждом элементарном объеме в любой момент времени (в изотермическом режиме, при постоянном засолении грунта) зависимости [18]

$$v = -k_{\phi}(\rho) \operatorname{grad} \rho, \quad (18)$$

где v — скорость переноса влаги через сечение, нормальное к вектору $\operatorname{grad} \rho$.

По результатам нескольких десятков опытов на монолитах установлена экспоненциальная зависимость изменения во времени средней по объему монолита влажности грунта $\theta_{\text{ср}}$ на всех этапах задания фиксированных значений разрежения:

$$\theta_{\text{ср}} \hookrightarrow \exp(-at),$$

где a — коэффициент пропорциональности (сут^{-1}), характерный для каждого этапа опыта; t — время. Аналогичная эмпирическая зависимость $\theta(t)$ установлена Р. Гарднером [8].

Для цилиндрического монолита объем воды, вытекшей за время Δt , составит [10]

$$\Delta V_{\text{в}} = \gamma \Delta t 2 \pi r_1 h,$$

где γ — удельный вес воды; r_1 — внешний радиус зонда; h — высота монолита. Поскольку средняя влажность грунта $\theta_{\text{ср}} = V_{\text{в}}/V_{\text{мон}}$, то из формулы (18) в предположении цилиндрической симметрии В.М. Сокопенко вывел равенство [10]

$$\frac{d\theta_{\text{ср}}}{dt} = -k \frac{d\rho}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial \rho} = -\frac{1}{r_2^2} \frac{2\rho_1}{1-\rho_1^2}, \quad (19)$$

где $\rho = r/r_2$ — безразмерная радиальная координата; r — радиальная координата; r_2 — радиус монолита; $\rho_1 = r_1/r_2$.

Из формулы (19), с учетом экспоненциальной зависимости средней объемной влажности грунта от времени, получается выражение для определения коэффициента влагопереноса [10]

$$k(\rho) = a \frac{d\theta}{d\rho} \cdot r_2^2 R, \quad (20)$$

$$\text{где } R = \frac{\int_{\rho_1}^{\rho_2} \theta \rho d\rho}{\rho_1 \left. \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_1}} \quad (21)$$

Формула (20) является прямым следствием обобщенного закона Дарси, записанного для поверхности $r=r_1$.

Коэффициент R однозначно определяется пространственным распределением влажности в образце. Принимая приближенную зависимость

$$\theta(\rho) = \rho^{-1} \cos \left[(1-\rho) \frac{\pi/2}{1-\rho_1} \right], \text{ получаем } R = 1. \text{ При упрощающем}$$

допущении, что коэффициент диффузивности $D = k(\partial \rho / \partial \theta)$ постоянен по радиусу, можно найти форму распределения $\theta(\rho)$, выписанную через функцию Бесселя. В этом случае при изменении ρ_1 от 0,1 до 0,2 значения R изменяются от 1,2 до 0,5. Оценка этой величины по данным экспериментов на шести монолитах (по семь этапов дренирования на каждом) различного диаметра (от 13 до 27 см) показала, что она равна 1,2–1,25, т. е. соответствует максимальной величине расчетного диапазона R . Для практических расчетов рекомендуется принимать $R \approx 1$.

Для повышения точности расчетов целесообразно определять эмпирическую зависимость $\theta(r)$, а затем конкретное значение коэффициента R по формуле (21) для расчета коэффициента влагопереноса по выражению (20) или непосредственно из уравнения (19).

Точность результатов опыта в значительной степени определяется данными о фильтрационном сопротивлении пористого зонда и призондовой зоны, в которой возможно нарушение влагопроницаемости при установке зонда. Изучение фильтрации воды через чистые пористые зонды, предварительно насыщенные водой под вакуумом, показало, что в условиях свободной фильтрации и при разрежении от 0 до -90 кПа коэффициент фильтрации керамики составляет $(1-3) \cdot 10^{-3}$ м/сут. Пористые зонды, обработанные снаружи глинистым раствором, имеют коэффициент фильтрации на один-два порядка меньше — $n \cdot (10^{-4} - 10^{-5})$ м/сут. В таком же диапазоне изменяется коэффициент фильтрации пористых пластин (с учетом сопротивления призондовой зоны), находящихся в соприкосновении с грунтом.

При задании во внутренней полости рабочего зонда определенного разрежения (давления влаги) за счет дополнительного фильтрационного сопротивления зонда, через керамику в грунт передается давление, меньше задаваемого. Зная коэффициент фильтрации зонда k_z , расход воды Q через него, задаваемое давление в зонде p_z и размеры зонда (высоту Δh , радиус r_z и толщину керамики Δr_z) и воспользовавшись предпосылкой о справедливости закона (18), получим зависимость для расчета давления в грунте

$$p_r = p_3 \pm [O \Delta r_3 / (2 \pi k_3 r_3 \Delta h)],$$

где знак минус берется при дренировании грунта, а знак плюс — при увлажнении грунта [23].

Расчеты показали, что с уменьшением расхода воды через зонд до 1 мл/ч (при указанных выше его размерах) перепадом давления влаги через пористый зонд можно пренебречь и принимать в качестве граничного условия при расчетах $\theta(r)$ и для построения зависимостей $k(p)$ и $\theta(p)$ давление, задаваемое в рабочем зонде.

Экспериментальное обоснование рекомендуемых методов определения гидрофизических параметров грунтов

Образцы грунта ненарушенной структуры, отобранные в нескольких повторностях с одной глубины, испытывались по различным методикам. Опыты проводились в полевой лаборатории, при этом в помещении поддерживалась температура воздуха 10–12 °С, т. е. практически были созданы изотермические условия.

Исследования в режиме обезвоживания. Вначале были проведены опыты на горизонтально расположенных образцах в режиме обезвоживания с помощью камеры пониженного давления (–100 кПа), установленной на торцевую часть образца.

В образце 3 длиной 29 см и диаметром 18 см (рис. 47), в котором контрольные тензиометры были установлены через 7 см, наблюдалась различная интенсивность изменения давления по его длине. Наиболее интенсивное изменение фиксировалось тензиометрами 1 и 2, расположенными вблизи рабочей камеры. После снятия разрежения в камере тензиометры показывали практически одинаковые значения всасывающего давления влаги.

Если значение всасывающего давления влаги, фиксируемое тензиометром 2, примерно равное –7 кПа, могло характеризовать влажностное состояние грунта всего образца к моменту снятия разрежения, так как оно практически не изменилось, то после снятия разрежения повторно на шестые сутки ни одно из показаний тензиометров не могло быть принято как достоверное на момент снятия разрежения. Развитие процесса влагопереноса по такой схеме проходит медленно, поэтому образцы грунта, испытываемые по указанной схеме, не могут использоваться для определения гидрофизических параметров.

В дальнейшем опыты проводились по другой схеме: в качестве камер пониженного давления использовались зонды цилиндрической формы, которые устанавливались в центре образца соосно его высоте и эксцентрично у его боковой поверхности. Такая установка позволила намного сократить длину пути переноса влаги (до 7,5 см), сохранив значительный объем образца, а также обеспечивала более надежный контакт зонда с грунтом.

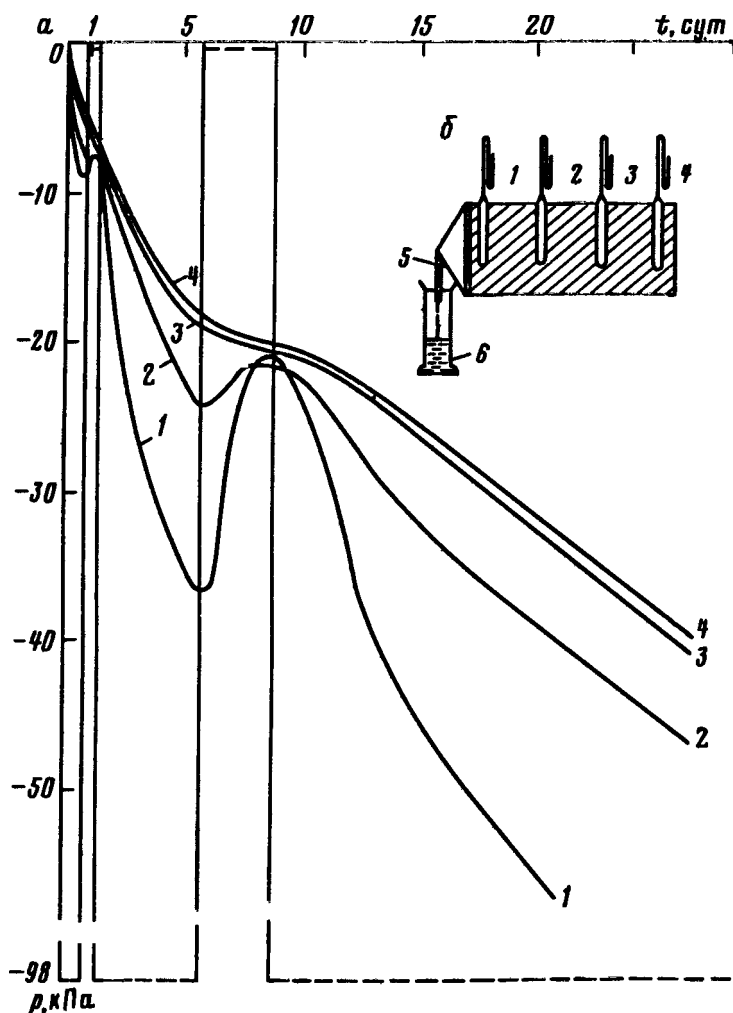


Рис. 47. Зависимость всасывающего давления влаги от задаваемого разрежения при обезвоживании образца 3:

а — графики; **б** — схема установки. 1–4 — графики, полученные для тензиометров соответствующих номеров (см. рис. б); 5 — камера отрицательного давления; 6 — мерный сосуд. Сплошные линии — кривые всасывающего давления влаги; пунктирные — задаваемое разрежение

Для обоснования достоверности показаний контрольных тензиометров, которые устанавливались эксцентрично у боковой поверхности образца, были проведены специальные опыты.

В опыте на образце 3-1 один контрольный тензиометр был помещен на боковой поверхности, а второй — внутри образца (рис. 48). Результаты опыта показывают, что после задания в дренируемом зонде значений разрежения — 20 и — 40 кПа, равных величине всасывающего давления, фиксируемой контрольными тензиометрами, показания контроль-

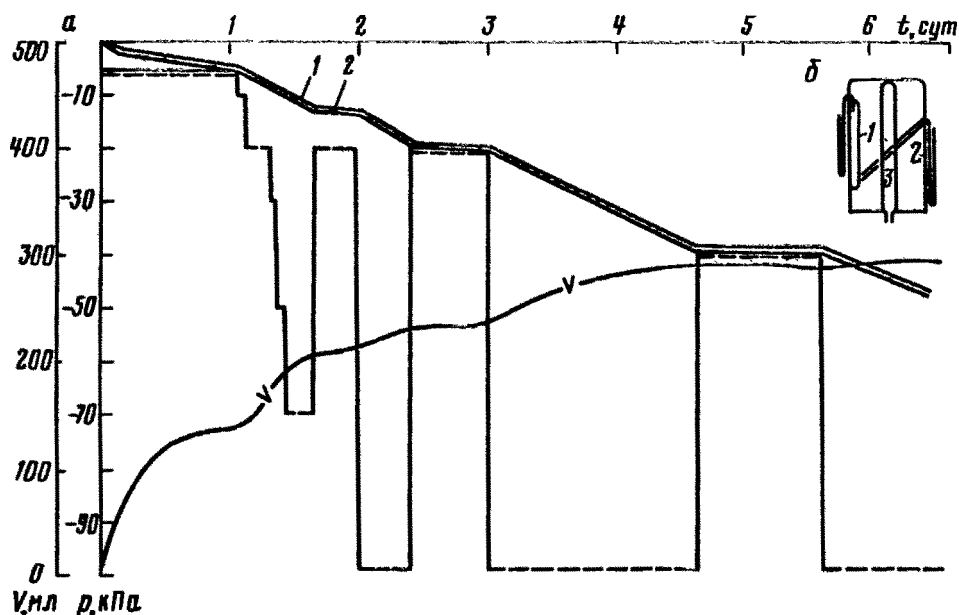


Рис. 48. Зависимость всасывающего давления влаги и объема воды от задаваемого разрежения при обезвоживании образца 3-1:

а — графики; *б* — схема установки. 1, 2 — графики, полученные для тензиометров соответствующих номеров (см. рис. *б*); 3 — камера отрицательного давления. Сплошные линии — кривые всасывающего давления, пунктирные — задаваемое разрежение

ных тензиометров практически не изменялись. Это указывает на то, что значения всасывающего давления, фиксируемые контрольными тензиометрами, в обоих случаях отвечают влажностному состоянию грунта всего образца. Несколько меньшие значения всасывающего давления влаги, фиксируемые тензиометром 2, объясняются тем, что средняя часть этого датчика расположена вблизи дренируемого зонда.

Исходные данные для образца 14, в котором контрольные тензиометры были заложены эксцентрично у боковой поверхности и на расстоянии 2 см от дренируемого зонда параллельно ему, отличаются между собой в среднем на 1,5 кПа (рис. 49). Таким образом, проведенные опыты послужили основанием для заложения тензиометров эксцентрично у боковой поверхности образца.

Были проведены опыты с образцами параллелепипедальной формы, а также с заложением рабочих зондов на боковую поверхность. Тензиометры в обоих случаях устанавливались на противоположные стороны образца. Для сопоставления результатов, полученных на образцах разной формы и с различными схемами заложения зондов, использовались грунты одинакового литологического состава.

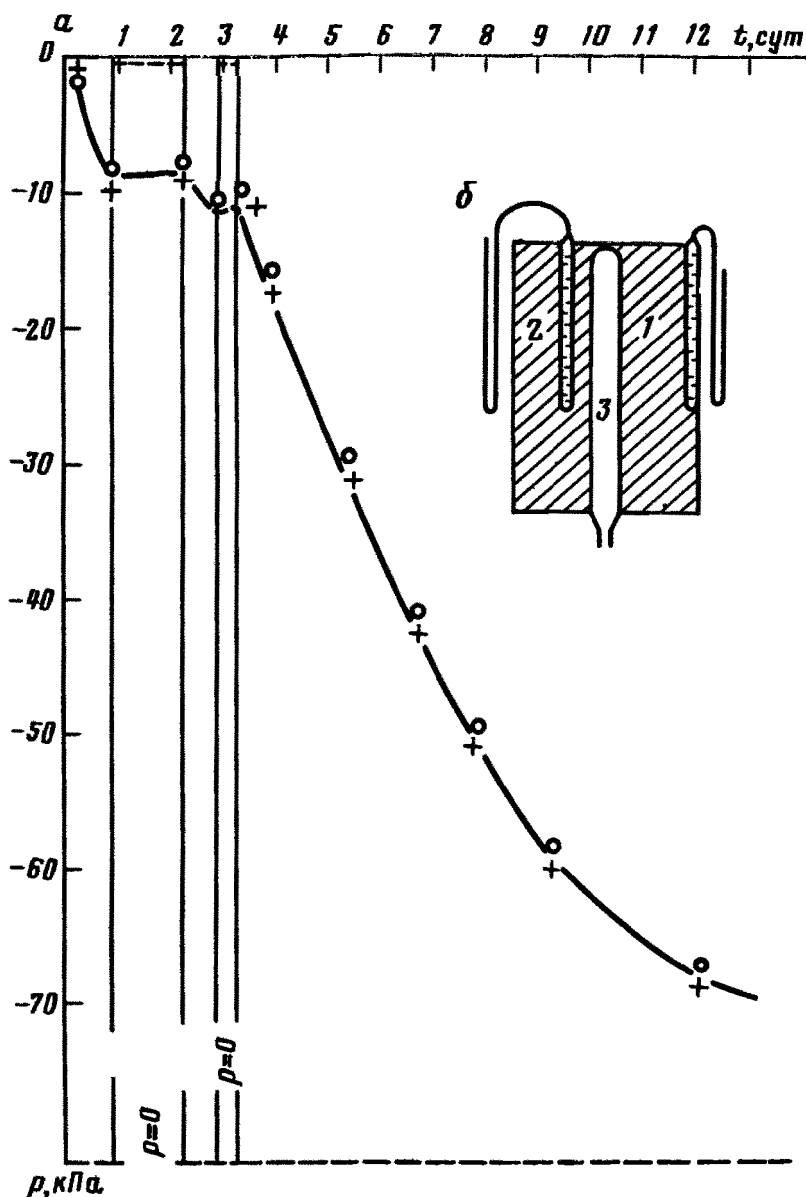


Рис. 49. Зависимость всасывающего давления влаги от задаваемого разрежения при обезвоживании образца 14:

а — графики; *б* — схема установки. 1, 2 — графики, полученные для тензиометров соответствующих номеров (см. рис. *б*); 3 — камера отрицательного давления

На рис. 50 приведены результаты опытов по обезвоживанию четырех образцов одинакового грунта при одной ступени разрежения, равной -100 кПа, с различными схемами заложения рабочих зондов. Разброс значений влажности грунта во всем диапазоне зависимости $\theta(p)$ не превышает 1%.

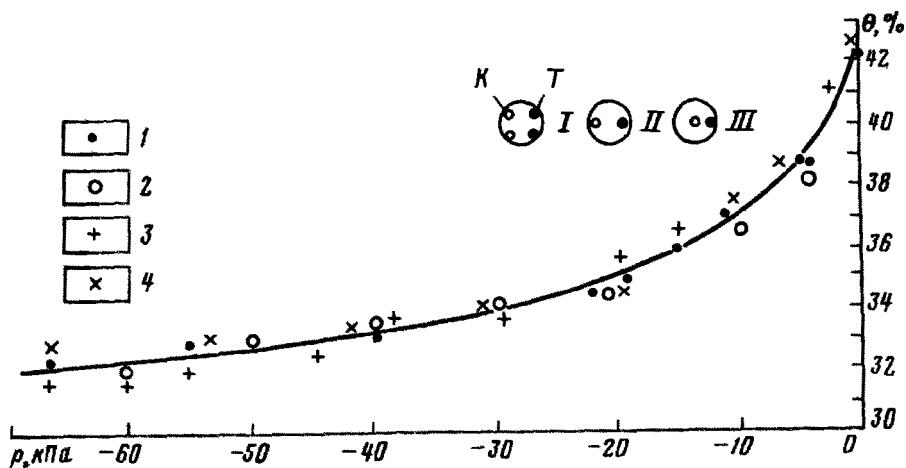


Рис. 50. График усредненной зависимости всасывающего давления влаги от влажности грунта по образцам, отобранным с глубины 1 м в одном шурфе, с различными схемами оснащения при обезвоживании с разрежением — 98,1 кПа:

1 — образец 20, испытывавшийся по схеме I; 2 — образец 21, испытывавшийся по схеме II; 3 — образец 22, испытывавшийся по схеме III; 4 — образец 23, испытывавшийся по схеме III. I, II, III — схемы испытания образцов. Буквы: K — камера отрицательного давления; T — тензиометр

Данные повторных испытаний на одних и тех же образцах, а также на образцах с формой параллелепипеда, вырезанных из цилиндрических монолитов, на которых уже был проведен опыт, практически одинаковы (рис. 51). Опыты показали, что в образцах, где зонд для дренирования влаги установлен в центре (при прочих равных условиях) обезвоживание идет быстрее. Если в монолите 22, где зонд был установлен в центре (расстояние переноса влаги 7,5 см), величина всасывающего давления —40 кПа была получена за двое суток, то в монолите 20 (расстояние переноса влаги в среднем 14 см) на достижение этой величины всасывающего давления было затрачено более четырех суток, несмотря на то что обезвоживание в нем проводилось двумя зондами.

Таким образом, результаты проведенных испытаний дают основание считать схему с центральным расположением рабочего зонда и эксцентричным расположением тензиометра у боковой поверхности образца приемлемой для определения влажности в режиме обезвоживания.

Один из факторов, определяющих гидрофизические параметры грунтов, — их начальная влагоемкость. При насыщении образца путем погружения его в воду в грунте может остаться до 10 % защемленного воздуха. При насыщении грунта в вакууме количество защемленного воздуха значительно меньше (в среднем 0,02 %). Опыт, проведенный на одном из монолитов, показал, что кривая зависимости всасывающего давления от влажности грунта после насыщения его погружением в воду

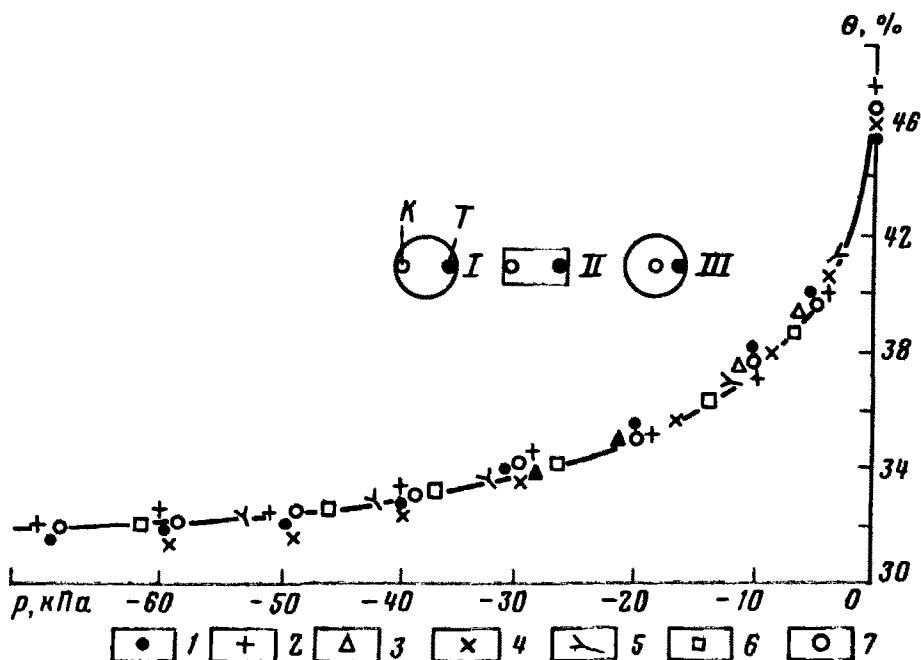


Рис. 51. График усредненной зависимости всасывающего давления влаги от влажности грунта по образцам, отобранным с глубины 1 м при разрежении $-98,1$ кПа и различных по форме, размеру, схеме оснащения и режиму обезвоживания:

1–3 – образец 18, испытывавшийся по схеме I в 1977 и 1978 г. и по схеме II в 1978 г.; 4, 5 – образец 58, испытывавшийся по схеме I в 1977 г. и по схеме II в 1978 г.; 6 – среднее значение по пяти образцам, испытывавшимся по схеме III; 7 – среднее значение по четырем образцам при обезвоживании с фиксированными на период опыта разрежениями – 3, – 5, – 10, – 20, – 30, – 50 и – 70 кПа. I, II, III – схемы испытания образцов. Буквы: K – камера отрицательного давления; T – тензиометр

в интервале давлений от 0 до $-3,5$ и от 0 до -45 кПа имеет меньшие значения влажности при одних и тех же давлениях, чем кривая, полученная после насыщения под вакуумом. Разница влажности грунта при нулевом значении всасывающего давления влаги достигает 2,2 %. При повторении опыта после насыщения под вакуумом кривая практически повторяет кривую, полученную при проведении первого опыта.

Данные шестикратного обезвоживания монолита 12 (насыщение в вакууме) показывают, что разброс значений влажности при одном и том же всасывающем давлении влаги не превышает 1 % (см. рис. 50). Хорошая сходимости результатов была получена для четырех образцов грунта, отобранных вблизи друг от друга на глубине 1 м (см. рис. 50, а) и насыщавшихся при вакуумировании. Эти опыты послужили основанием для того, чтобы рекомендовать для дальнейших исследований насыщение образцов грунта в вакууме.

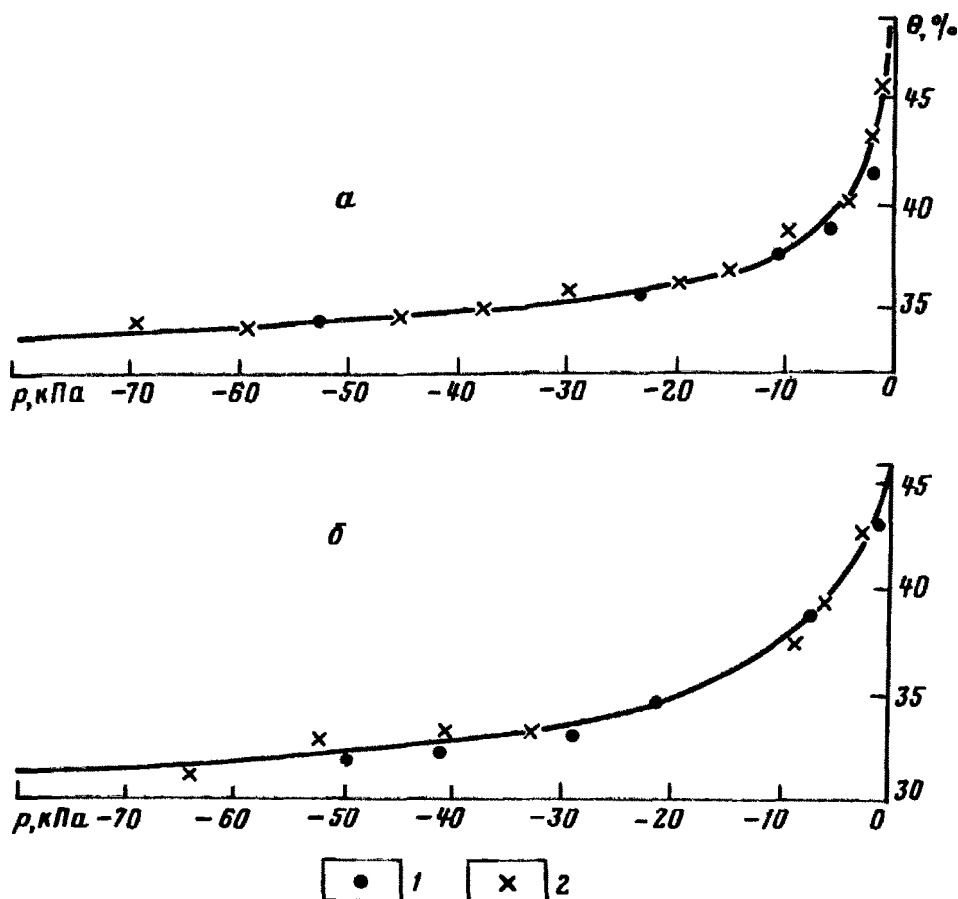


Рис. 52. Графики зависимости всасывающего давления влаги от влажности грунта при различных способах обезвоживания для образцов 3-1 (а) и (б), отобранных с глубин 1 и 0,5 м соответственно:

1 — при обезвоживании ступенями; 2 — при одной ступени разрежения ($-98,1$ кПа)

Известно, что интенсивность дренирования образца (при прочих равных условиях) зависит от величины задаваемого в рабочем зонде (камере) разрежения. В опыте, проведенном на монолите 20, установлено, что объем сдренированной воды при задании в зонде разрежения ступенями был в среднем на 0,3 % меньше, чем при одной ступени разрежения -100 кПа, почти в течение всего опыта. Это объясняется, по-видимому, тем, что влага при разрежении -100 кПа не успевает равномерно распределиться по всему объему образца (расстояние переноса влаги в среднем 14 см), и контрольный тензиометр фиксирует несколько большее значение всасывающего давления влаги, не соответствующее средней влажности грунта монолита. Следовательно, эти данные указывают на то, что радиус монолита при обезвоживании грунта при одной ступени, равной -100 кПа, должен быть меньшим.

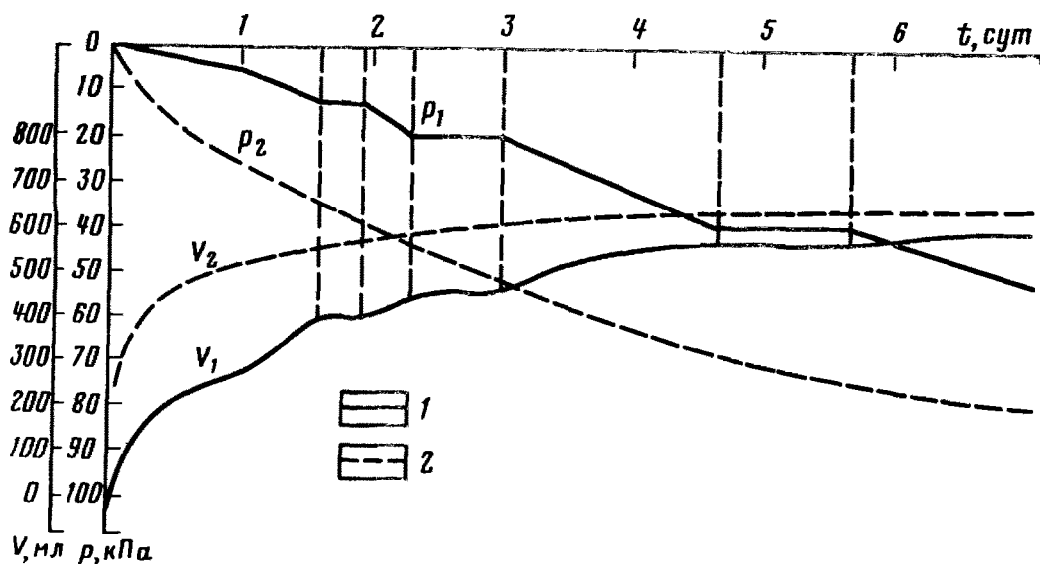


Рис. 53. Графики зависимости всасывающего давления влаги p и объема дренируемой воды V от задаваемого разрежения при различных режимах обезвоживания образца 3-1:

1 — обезвоживание ступенями; 2 — обезвоживание одной ступенью ($-98,1$ кПа)

Как указывалось выше, при обезвоживании образца 14 (диаметр 18,5 см, расстояние переноса влаги 7,5 см), в котором дренирующий зонд установлен в центр (см. рис. 49), влага практически успевает перераспределяться по объему образца.

В опытах на монолитах 2 и 3-1 (диаметр 15 см, расстояние переноса влаги 6 см) при обезвоживании одной и несколькими ступенями разрежения значения влажности грунта при равных всасывающих давлениях фактически повторяют друг друга (рис. 52).

На рис. 53 показаны результаты опытов по обезвоживанию монолита 3-1 при одной и нескольких ступенях разрежения. По истечении суток после начала опыта при разрежении -100 кПа величина всасывающего давления была в 5 раз меньше, а объем вытекшей воды в 2 раза больше, чем при дренировании влаги ступенями. Объем воды (0,6 л), сдренированной при разрежении в зонде -100 кПа за 2,5 сут, при разрежении ступенями был получен за 7 сут, т. е. быстрее чем в 2 раза. Анализ результатов опытов показывает, что одинаковым по величине значениям всасывающего давления влаги в обоих случаях соответствуют равные объемы сдренированной воды.

Таким образом, полученные данные послужили основанием для определения зависимости $\theta(p)$ при одной ступени разрежения -100 кПа.

Достоверность получаемых экспресс-методом результатов подтверждается и тем, что образцы одного и того же грунта при испытаниях раз-

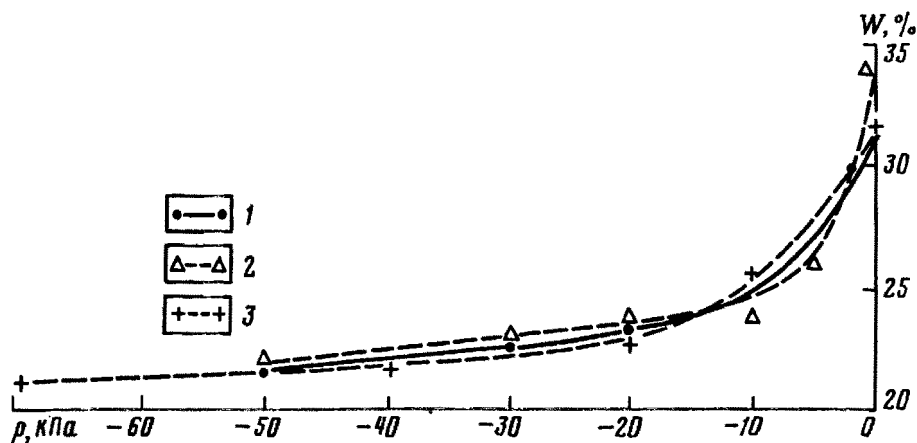


Рис. 54. Графики зависимости всасывающего давления влаги от влажности грунта по образцам с глубины 1 м (из одного шурфа), полученные различными способами:

1 — несколькими последовательными ступенями разрежения на одних и тех же образцах; 2 — фиксированными на весь период опыта разрежениями — 3, — 5, — 10, — 20, — 30, — 50 и — 70 кПа; 3 — одной ступенью разрежения — 98,1 кПа

личными методами — при дренировании больших монолитов при нескольких ступенях разрежения; экспресс-методом на малых монолитах (где для каждой группы образцов задавались фиксированные на весь период опыта разрежения — 3, — 5, — 10, — 20, — 30, — 50 и — 70 кПа) и экспресс-методом на больших монолитах (при одной ступени разрежения, равной — 100 кПа) — имеют хорошую сходимость (рис. 54).

Экспериментально установлено, что данные, полученные при обезвоживании образцов с разрежением, непрерывно изменяющимся от 0 до — 90 кПа, также имеют хорошую сходимость с данными, полученными при одной ступени, равной — 100 кПа. Таким образом, рассмотренные примеры показывают, что данные зависимости $\theta(p)$ с одной ступенью разрежения — 100 кПа могут характеризовать эту зависимость в режиме обезвоживания.

Исследования в режиме увлажнения. Испытания проводились с различными, постоянными и изменяющимися во времени разрежениями в рабочих зондах. Сначала были проведены опыты с постоянными разрежениями, равными 0 и — 10 кПа. В образце 16 увлажнение (при давлении в рабочем зонде, равном 0) проводили сразу же после обезвоживания до величины всасывающего давления — 64 кПа. За 9 ч непрерывной подачи воды всасывающее давление влаги изменялось от — 64 до — 6 кПа, влажность грунта при этом увеличивалась на 1,8 % (рис. 55).

Когда всасывающее давление влаги достигло — 6 кПа, была прекращена подача воды в образец; всасывающее давление начало падать и в течение 12 ч уменьшилось до — 13 кПа. Далее, в течение 9 ч вода

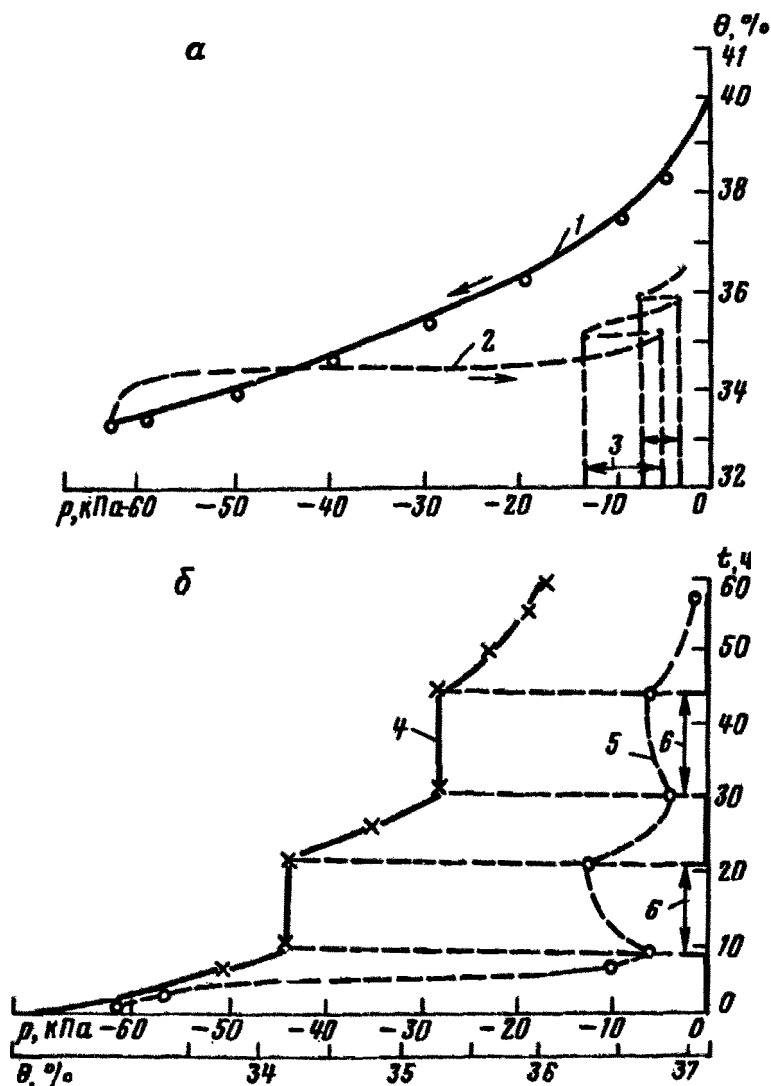


Рис. 55. Результаты опыта по образцу 16 при обезвоживании с разрежением — 98,1 кПа и увлажнении с разрежением, равным 0:

а — при непрерывном изменении всасывающего давления; *б* — при ступенчатом изменении. 1 — зависимость всасывающего давления влаги от влажности грунта при обезвоживании; 2 — то же, при увлажнении; 3 — интервал давлений, в котором вода в образец не подавалась; 4 — изменение всасывающего давления влаги во времени при увлажнении; 5 — изменение влажности грунта во времени при увлажнении; 6 — перерыв подачи воды. Стрелками указано направление изменения влажности

подавалась при нулевом давлении, а затем вновь ее подача прекращалась на 14 ч. Всасывающее давление при этой остановке уменьшилось до — 3,5 кПа. В последующие 10 ч поступление воды сопровождалось ростом всасывающего давления влаги.

Если в самом начале опыта значения давления, фиксируемые контрольным тензиометром, были на 12–13 кПа меньше, чем значения давления, соответствующие этим же влажностям в ветви обезвоживания, то через 9 ч они были в среднем на 30 кПа больше.

Несоответствие всасывающего давления влажности грунта в начале опыта объясняется тем, что поступающая из рабочего зонда в грунт вода не успевала рассасываться, так как грунт при такой влагоемкости имеет весьма незначительную водопроницаемость (коэффициент влагопереноса в среднем 10^{-6} м/сут). Влажность грунта вокруг рабочего зонда в это время выше, чем на периферии образца, а следовательно, фиксируемое тензиометром всасывающее давление не соответствует равновесной влажности.

Уменьшение всасывающего давления влаги после прекращения подачи воды, по-видимому, может быть объяснено следующим. Основное количество воды при давлении в рабочем зонде, равном 0, и сравнительно высоких значениях всасывающего давления перемещается от зонда к периферии образца, в том числе и к зонду тензиометра, по сравнительно крупным порам. Одновременно с этим насыщаются водой и более мелкие поры. Однако поскольку проницаемость мелких пор значительно меньше, чем крупных, заполнение их водой как бы задерживается во времени. С прекращением подачи воды продолжается рассасывание ее под воздействием менисковых сил мелких пор, в результате чего и снижается всасывающее давление. Таким образом, как в начале опыта, так и в дальнейшем, фиксируемое контрольным тензиометром всасывающее давление не соответствует равновесной влажности.

Исследование инерционности в образцах проводилось при меньших значениях всасывающего давления, в частности, в образце 27 подача воды прекращалась в первый раз при достижении всасывающим давлением величины — 50 кПа и во второй — при — 24 кПа. В первом случае всасывающее давление влаги после прекращения подачи воды в течение 12 ч продолжало увеличиваться до — 33 кПа, во втором — до 16 кПа. Рост всасывающего давления в данном случае указывает на то, что перед прекращением подачи воды общее количество влаги не соответствовало равновесному его значению. Абсолютная погрешность составляла соответственно 17 и 8 кПа.

В образце 25 в процессе увлажнения после достижения всасывающим давлением влаги величины — 46 кПа подача воды была прекращена на 12 ч, а затем после достижения всасывающего давления — 29 кПа вода не подавалась в течение 14 ч. Всасывающее давление продолжало увеличиваться в первом случае до — 37 кПа, а во втором до — 26 кПа. Абсолютная погрешность составляла соответственно 9 и 3 кПа.

Уменьшение величины абсолютной погрешности с ростом всасывающего давления наблюдалось и в других образцах. После прекращения подачи воды в образце 23 при достижении всасывающим давлением

величины — 36 кПа в течение 12 ч, а затем — 20 кПа в течение 14 ч абсолютная погрешность соответственно составляла 9 и 1 кПа.

В образце 10 при всасывающем давлении — 4,5 кПа с прекращением подачи воды на 12 ч величина всасывающего давления не изменялась.

Запаздывание реакции контрольного тензиометра, как и в предыдущем опыте, объясняется, с одной стороны, слабой влагопроводностью грунта, а с другой, — обильным поступлением в образец влаги, что связано с поддержанием нулевого давления в рабочей зоне. Все это могло вызвать неравномерное распределение влаги по радиусу образца, в частности относительное переувлажнение вблизи зонда и недонасыщение на периферии.

Уменьшение абсолютной погрешности по мере увеличения всасывающего давления объясняется ростом водопроницаемости грунта, в результате чего влага в образце распределяется быстрее.

Таким образом, опыты с заданием и поддержанием в рабочей зоне давления, равного 0, показали, что интенсивность подачи воды в течение всего опыта должна быть регулируемой. С этой целью были проведены опыты с меньшими значениями давления в рабочей зоне. Особое внимание уделялось начальной стадии увлажнения, при значениях всасывающего давления от — 70 до — 50 кПа. Необходимо было установить оптимальную интенсивность увлажнения, с тем чтобы скорость изменения всасывающего давления влаги в образце была близка к значениям ее в природных условиях.

Скорость изменения всасывающего давления влаги в опытах при увлажнении грунта с давлением в рабочей зоне, равным 0, в начальной стадии опыта для различных образцов составляла от 3 до 41 м/сут.

В опытах с образцами 57 и 59, где в рабочей зоне было задано и поддерживалось в течение всего опыта разрежение — 10 кПа, скорости изменения всасывающего давления изменились соответственно до 25 и 18 кПа/сут. Однако кривая зависимости $\theta(\rho)$ в начале опыта имеет значения влажности при одних и тех же давлениях больше, чем при иссушении грунта (рис. 56). Следовательно, интенсивность подачи воды в начале опыта должна быть еще меньше.

Следующая серия опытов по изучению интенсивности подачи воды была проведена с изменяющимися во времени разрежениями в рабочей зоне. Так, в образце 26, для которого в течение суток разрежение в рабочей зоне постепенно увеличивалось от — 20 до — 5 кПа (рис. 57), средняя скорость изменения всасывающего давления составила 1,1 кПа/сут.

С уменьшением начального разрежения до — 60 кПа скорость изменения всасывающего давления снижается. При начальном разрежении — 50 кПа скорость изменения всасывающего давления в образце 45 в течение 5 сут составляла 5 кПа/сут.

В образце 16 при разрежении в рабочей зоне, снижающемся от — 40 до — 30 кПа со скоростью 6 кПа/сут, скорость изменения вса-

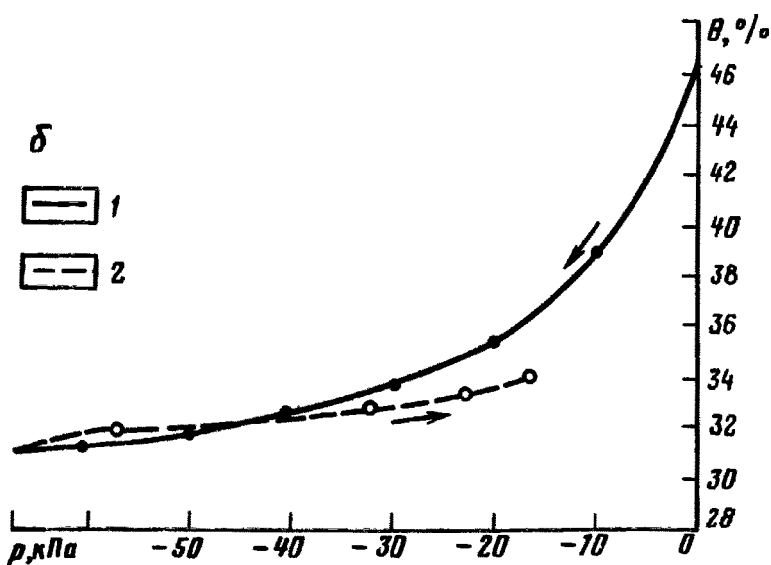
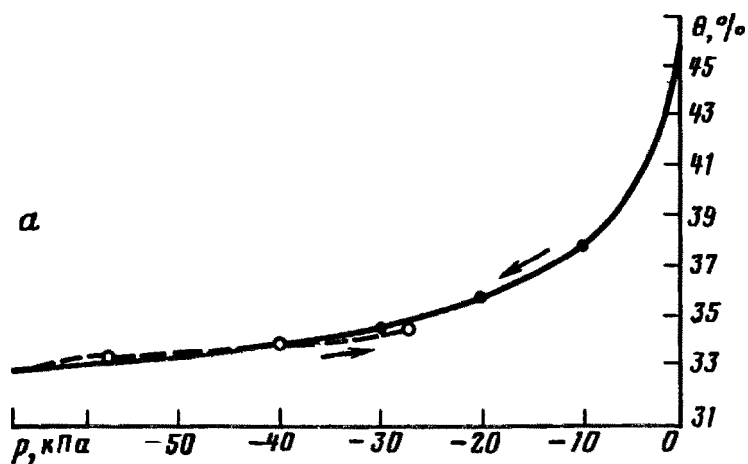


Рис. 56. Графики зависимости всасывающего давления влаги при обезвоживании и увлажнении грунта для образцов 59 (а) и 57 (б):

1 — обезвоживание грунта при разрежении $-98,1$ кПа; 2 — увлажнение грунта при разрежении -10 кПа. Стрелками указано направление изменения влажности

сывающего давления составляла $0,3$ кПа/сут. Однако при поддержании в рабочем зонде разрежения от -60 до -50 кПа в течение 6 ч вода в грунт практически не поступала и всасывающее давление не изменялось. Таким образом, с уменьшением величины начального разрежения до -60 кПа и скорости его роста, скорость изменения всасывающего давления $p_{\text{контр}}$ снижается.

Результаты опытов показывают, что при задании в рабочем зонде начального разрежения от -40 до -50 кПа и скорости изменения его

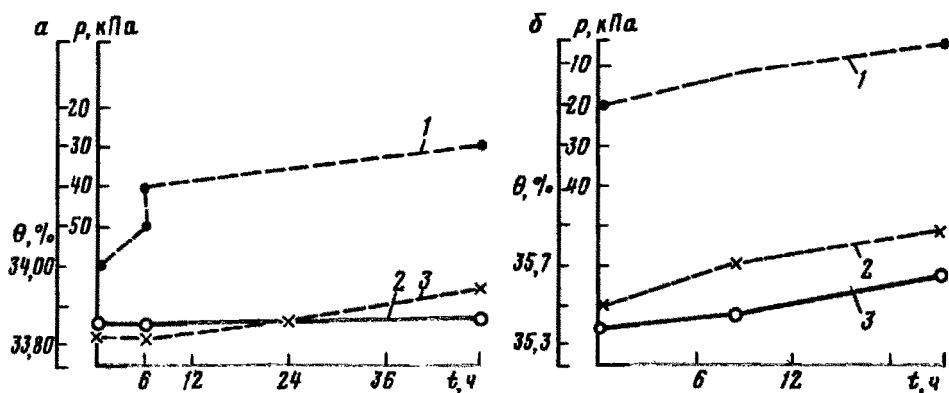


Рис. 57. Графики изменения всасывающего давления влаги и влажности грунта во времени при непрерывно уменьшающемся разрежении для образцов 16 (а) и 26 (б):

1 — задаваемое разрежение; 2 — всасывающее давление влаги; 3 — влажность грунта

в пределах 16–6 кПа/сут скорости изменения всасывающего давления в образцах и в естественных условиях близки.

Поскольку опыты с изменяющимся во времени разрежением в рабочих зондах по физической сути ближе к природным процессам, были проведены опыты в нестационарном режиме во всем диапазоне давлений.

Результаты опыта, проведенного на образце 48 (рис. 58), показывают, что при заданном начальном разрежении — 40 кПа и скорости изменения его 46 кПа/сут всасывающее давление в интервале от — 74 до 30 кПа изменялось со скоростью 18 кПа/сут. Влажность в интервале давлений от — 74 до — 16 кПа изменялась сравнительно равномерно. Значения влажности грунта в интервале давлений от — 74 до — 40 кПа почти совпадают со значениями, полученными при обезвоживании. При перерыве подачи в образец воды при значении всасывающего давления — 17 кПа, всасывающее давление влаги в течение 18 ч изменилось всего на 0,3 кПа. Это указывает на то, что практически во всем диапазоне значений всасывающего давления влаги влажность грунта близка к равновесным значениям.

В образце 45 при заданном начальном разрежении — 50 кПа и скорости изменения разрежения 7–5 кПа/сут всасывающее давление в интервале от — 68 до — 1,5 кПа изменялось в среднем со скоростью 5 кПа/сут. Значения влажности грунта близки к величинам влажности соответствующих давлений ветви обезвоживания в интервале от — 70 до — 20 кПа. Остановка в подаче воды при всасывающем давлении — 15 кПа привела к изменению его в течение 17 ч на 0,3 кПа (абсолютная погрешность 2 %), что подтверждает высокую точность полученного результата.

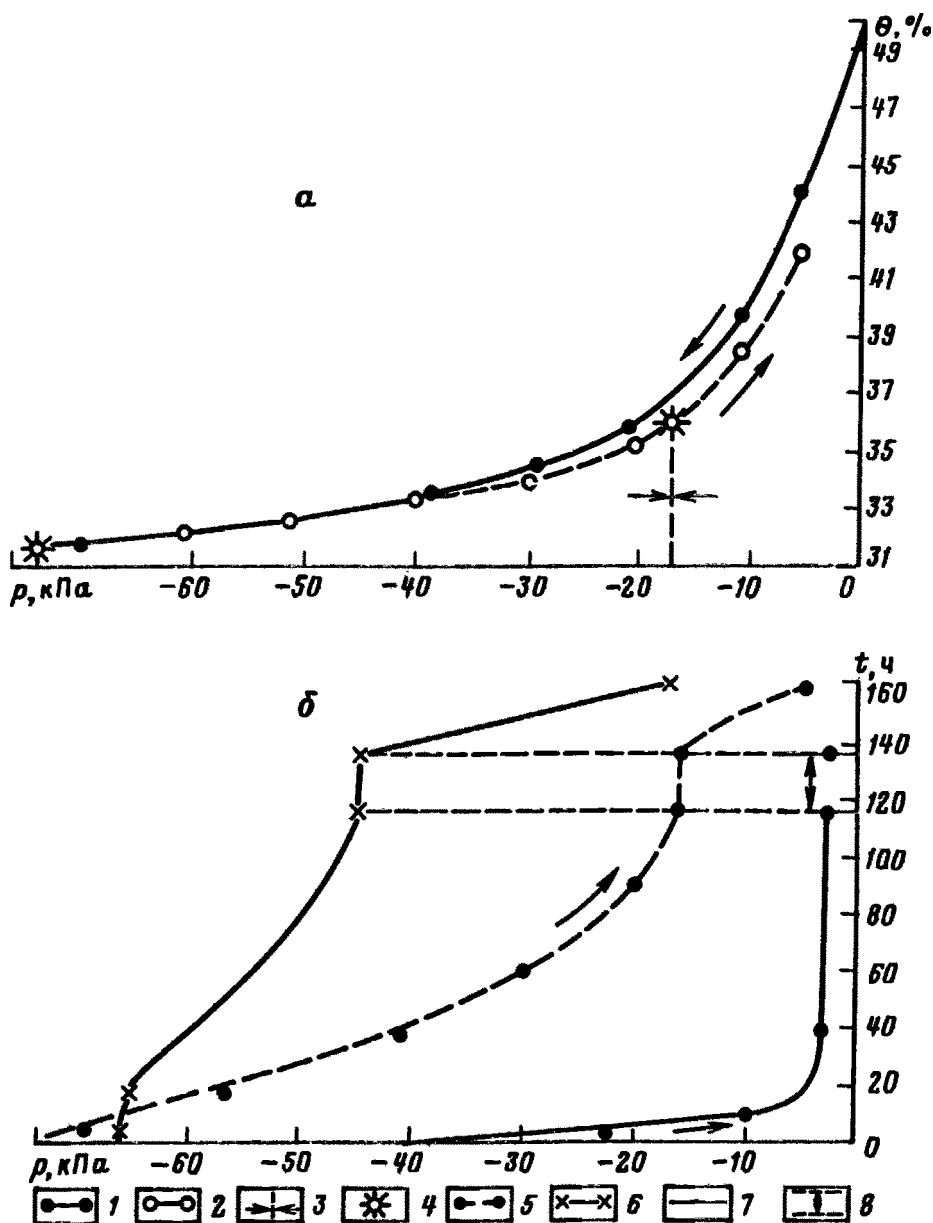


Рис. 58. Результаты опыта по образцу 48 при обезвоживании с разрежением - 98,1 кПа и увлажнении:

a — при непрерывно изменяющейся влажности; *б* — при переменном изменении влажности. 1, 2 — зависимость всасывающего давления влаги от влажности грунта при обезвоживании и увлажнении; 3 — перерыв подачи воды; 4 — контрольная проба влажности грунта; 5, 6 — изменения задаваемого разрежения и всасывающего давления влаги во времени; 7 — изменение влажности грунта во времени; 8 — перерыв подачи воды

Результаты опыта по увлажнению образца 42 при заданном начальном разрежении -40 кПа и скорости изменения его 18 кПа/сут в интервале от -40 до -10 кПа показывают, что скорость изменения всасывающего давления в этом интервале составила 11 кПа/сут. Как и в описанных выше опытах, всасывающее давление влаги после прекращения подачи воды за 18 ч изменилось на незначительную величину ($-0,4$ кПа). Значения влажности грунта в интервале всасывающих давлений от -66 до -20 кПа практически повторяют значения влажности ветви обезвоживания.

В образце 61, для которого было задано начальное разрежение -40 кПа, а скорость его изменения в дальнейшем в интервале от -40 до -10 кПа составила 21 кПа/сут, всасывающее давление в этом же интервале изменялось со скоростью 16 кПа/сут, наблюдается значительный гистерезис. Ветвь увлажнения расположена на графике левее ветви иссушения практически с самого начала опыта, и уже при влажности $37,5\%$ разница давлений достигает 10 кПа и сохраняется до конца опыта. Разность влажностей грунта уже при всасывающем давлении -25 кПа достигает 1% , а при значении -5 кПа превышает $3,5\%$. После прекращения подачи воды, при $p_{\text{контр}} = -5,5$ кПа, в течение 18 ч всасывающее давление изменилось до $5,7$ кПа, т. е. всего на $0,2$ кПа (абсолютная погрешность составила $3,6\%$). Это свидетельствует о том, что всасывающее давление влаги находится в соответствии с равновесной влажностью и данные, по которым построен график изменения влажности, достоверны. Наиболее вероятной причиной наблюдаемого в этом образце значительного гистерезиса, по-видимому, является увеличение дисперсности грунта. В данном случае — это глина с глубины 18 м (объемная масса $1,73$ г/см³).

Анализируя результаты проведенных опытов (табл. 4), можно сказать следующее. Увлажнение пород при атмосферном давлении в рабочем зонде (разрежение равно нулю) сопровождается большими скоростями изменения всасывающего давления (от 216 до $37,3$ кПа/сут), намного превышающими скорости, наблюдаемые в естественных условиях. При таком интенсивном увлажнении грунта влага не успевает рассасываться и равномерно распределяться по всему объему образца, в результате чего контрольными тензиометрами фиксируются завышенные или заниженные в сравнении с равновесными значения всасывающего давления влаги.

Значительно меньше скорость изменения всасывающего давления влаги при поддержании в рабочем зонде разрежения -10 кПа, однако при малых значениях всасывающего давления график изменения влажности, как и ранее, имеет большие значения θ при одном и том же давлении, чем на кривой обезвоживания. Опытами с изменяющимся во времени разрежением установлено, что наиболее рационально увлажнение путем задания разрежения в среднем на 30 кПа меньше начального и

Таблица 4. Результаты опытов по определению зависимости $\theta(p)$ в режиме увлажнения

Номер образца	Разрежение в рабочем зонде, кПа		Скорость изменения задаваемого разрежения, кПа/сут	Интервал изменения всасывающего давления, кПа		Скорость изменения всасывающего давления, кПа/сут
	от	до		от	до	
16		0	—	—60,80	—5,88	147,10
11		0	—	—68,65	—8,83	215,75
10		0	—	—60,80	—19,61	156,91
23		0	—	—68,65	—34,32	81,40
25		0	—	—68,65	—44,12	40,21
27		0	—	—62,76	—49,03	37,27
57		—10	—	—65,70	—16,67	24,52
59		—10	—	—64,72	—24,48	17,65
42	—39,23	—9,81	17,65	—64,72	—29,42	10,79
26	—19,61	—49,03	14,71	—73,55	—62,76	10,79
45	—49,03	—14,71	6,86	—66,69	—14,71	4,90
16	—39,23	—29,42	5,88	—72,57	—71,59	0,29
16	—58,84	—49,03	39,23	—72,57	—72,57	—
48	—39,23	—9,81	68,65	—72,57	—29,42	17,65
61	—39,23	—9,81	20,59	—60,80	—39,23	21,67
43	—19,61	—49,03	17,65	—74,53	—29,42	15,69

поддержание скорости изменения его 15—20 кПа/сут в интервале всасывающих давлений от —70 до —30 кПа. Скорость изменения всасывающего давления в образце при этом составляет 11—22 кПа/сут.

Скорость изменения всасывающего давления 10—20 кПа/сут может быть рекомендована при проведении опытов в режиме увлажнения грунта до достижения всасывающего давления — 20 кПа.

Водопроницаемость грунта растет с повышением его влажности, поэтому после достижения всасывающего давления влаги — 20 кПа интенсивность подачи воды можно увеличить. Следует учесть то обстоятельство, что при близких к нулю значениях всасывающего давления влаги вода может вытекать из образца. В связи с этим, при проведении опыта по увлажнению грунта необходимо надежно изолировать образец или прекратить опыт, как только начинается истечение воды. Общая продолжительность опыта в режиме увлажнения грунта составляет в среднем 7 сут.

Сопоставляя данные о влажности грунта и соответствующие им значения p , полученные в естественных условиях, с данными зависимостей $\theta(p)$, полученными на образцах грунта при обезвоживании их от влажности, соответствующей полной влагоемкости (рис. 59, 60), видим, что подавляющая часть значений влажности меньше, чем данные, полученные по зависимостям, установленным лабораторным путем при одних

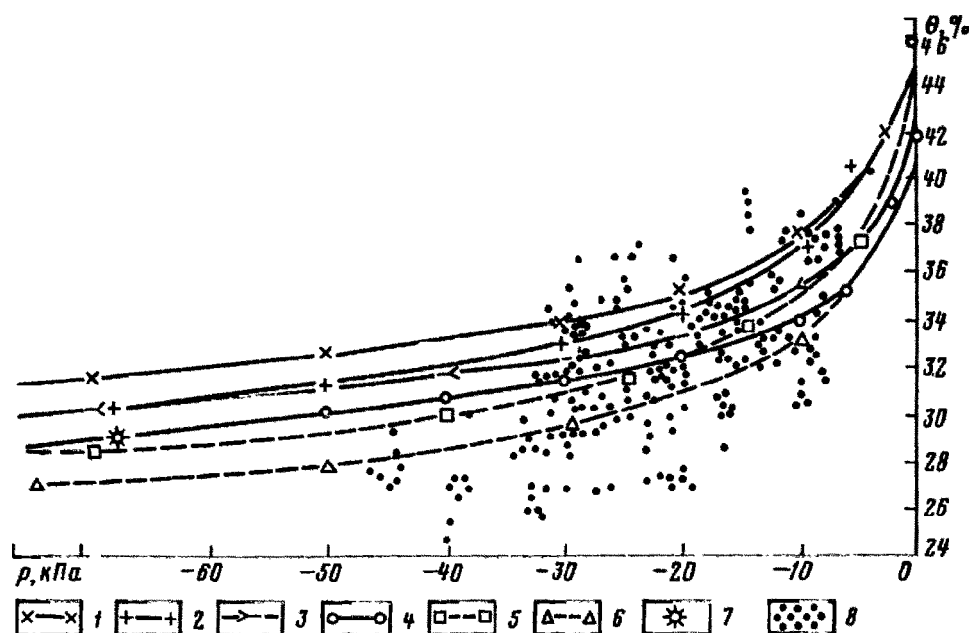


Рис. 59. Графики зависимости $\theta(p)$, полученные в лабораторных определениях (в режиме обезвоживания от полной влагоемкости грунта) и при натурных наблюдениях в шурфах (глубина 1–2 м):

1 — по 16 образцам ($h = 4$ см, $d = 5$ см), 1986 г.; 2 — по 3 образцам ($h = 22$ см, $d = 15$ см), 1979 г.; 3 — по 4 образцам ($h = 22$ см, $d = 18,5$ см), 1977 г.; 4 — по образцу 45 ($h = 22$ см, $d = 15$ см), 1978 г.; 5 — по образцу 64 ($h = 22$ см, $d = 15$ см), 1979 г.; 6 — по образцу 36 ($h = 22$ см, $d = 15$ см), 1979 г.; 7 — по контрольной пробе; 8 — по пробам грунта из шурфов с глубины 1; 1,5 и 2 м, 1974–1975 гг. h, d — высота и диаметр образца. Стрелками дано направления изменения влажности

и тех же значениях p . Причиной этого может быть гистерезисный эффект. Действительно, значения влажности грунта в экспериментально полученных зависимостях при дренировании от начальной полной влагоемкости, имеют (в данном случае) для каждой разновидности грунта максимальные значения во всем диапазоне p .

Такие величины влагоемкости для грунтов зоны аэрации, за редким исключением, не характерны. Поэтому указания тщательно насыщать образец влагой при проведении опыта в режиме обезвоживания, по-видимому, недостаточно обоснованы. Не следует использовать для характеристики проницаемости грунта и коэффициенты влагопереноса, рассчитанные по такой зависимости $\theta(p)$, так как они дают завышенные значения.

Гистерезисом объясняется и значительное (до 10 %) расхождение величин влажности при одинаковых значениях всасывающего давления влаги в естественных условиях.

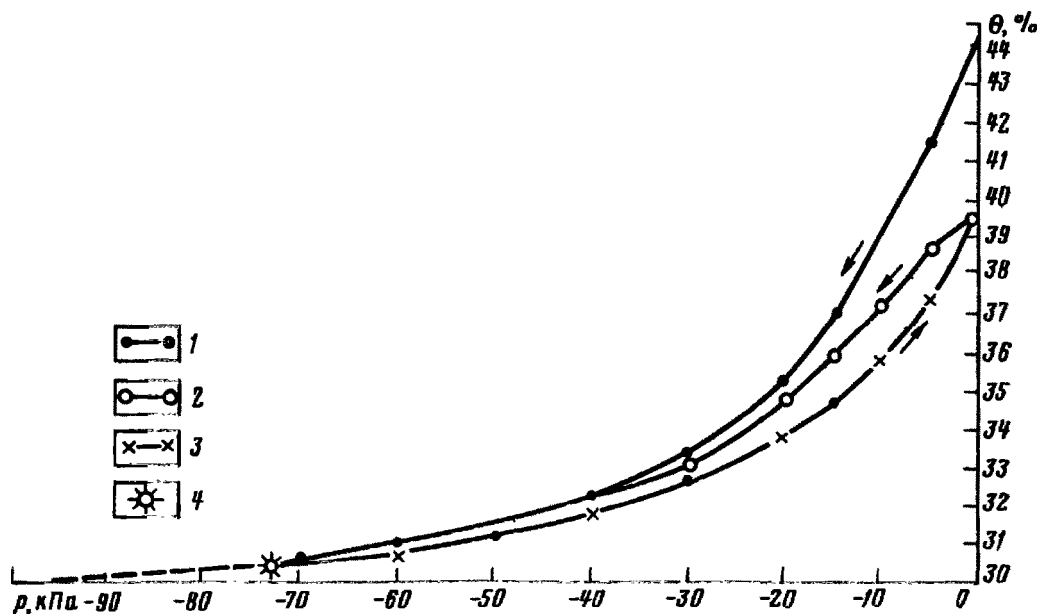


Рис. 60. Графики зависимости всасывающего давления влаги от влажности грунта при обезвоживании и увлажнении:

1 — обезвоживание при разрежении — 98,1 кПа от влажности, соответствующей влагоемкости грунта; 2 — то же, от влажности, соответствующей квазинасыщенному состоянию грунта; 3 — увлажнение при непрерывном увеличении давления; 4 — влажность контрольной пробы грунта. Стрелками дано направление изменения влажности.

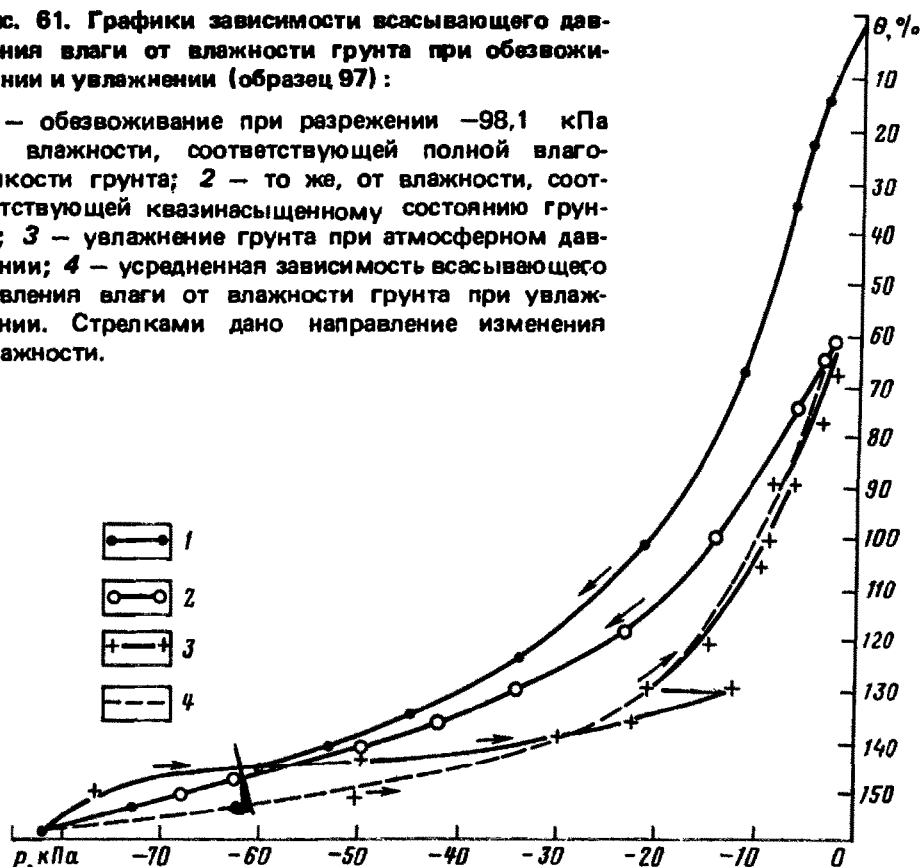
Полученные данные были использованы для нахождения в режимах обезвоживания таких зависимостей $\theta(p)$, которые бы наиболее полно характеризовали состояние грунта в диапазоне влажностей, наблюдаемых в природе.

Учитывая то обстоятельство, что в степных районах в естественных условиях как на богаре, так и на орошаемых участках в подавляющем большинстве случаев влажность грунта изменяется в пределах значений всасывающего давления влаги от -2 до -70 кПа, авторы предлагают эти значения p принять за граничные в зависимости $\theta(p)$ и определять ее экспериментально лишь в этом интервале. В данном случае полученная для обоих режимов зависимость находится между граничными кривыми обезвоживания и увлажнения в правой части гистерезисной петли с максимальными значениями влажности. Поскольку на влажность грунта влияют скорость обезвоживания и увлажнения, а также начальные значения влагоемкости, опыты целесообразно проводить с учетом этих факторов, т. е. приближать к естественным условиям.

В частности, влагоемкость грунта, соответствующая разрежению от -60 до -70 кПа, с которой начиналось увлажнение грунта, дости-

Рис. 61. Графики зависимости всасывающего давления влаги от влажности грунта при обезвоживании и увлажнении (образец 97):

1 — обезвоживание при разрежении $-98,1$ кПа от влажности, соответствующей полной влагоемкости грунта; 2 — то же, от влажности, соответствующей квазинасыщенному состоянию грунта; 3 — увлажнение грунта при атмосферном давлении; 4 — усредненная зависимость всасывающего давления влаги от влажности грунта при увлажнении. Стрелками дано направление изменения влажности.



галась при обезвоживании грунта от полной влагоемкости. Необходимость дренирования образца от этой влагоемкости объясняется тем, что полученная кривая изменения влажности служит для характеристики грунтов, которые могут оказаться под уровнем грунтовых вод. Влажность грунта при всасывающем давлении влаги от -2 до -4 кПа достигалась в результате увлажнения с интенсивностью близкой к природной. Экспериментально установлено, что наиболее приемлем режим увлажнения с непрерывно увеличивающимся давлением в рабочей зоне, когда влага, поступающая в образец, успевает перераспределиться по всему его объему (рис. 61, см. рис. 58).

Хорошие результаты дает увлажнение при двух-трех ступенях с атмосферным давлением в рабочей зоне, при условии достижения на каждой ступени влажности грунта, близкой к равновесной (рис. 61). В данном случае пунктирная кривая будет характеризовать зависимость $\theta(p)$ в режиме увлажнения. Естественно, что график, соответствующий увлажнению от меньших начальных значений всасывающего давления влаги (например, -100 кПа), имел бы более низкие значения влажности

при одних и тех же величинах всасывающего давления влаги. Зависимости $\theta(p)$ в режиме обезвоживания, полученные от начальной влагоемкости, соответствующей $p = 0$, в образцах 70 и 71 и $p = -2$ кПа в образце 97, наиболее приемлемы для характеристики изменения влажности грунтов в испытываемом диапазоне всасывающих давлений влаги.

Таким образом, полученные экспериментальным путем данные позволяют предложить для практического применения методику, основанную на использовании двух зависимостей $\theta(p)$ в режиме обезвоживания и одной — в режиме увлажнения. В режиме обезвоживания одна зависимость применяется для испытания от начальной влажности грунта, равной полной влагоемкости, и вторая — для испытания от начальной влажности, соответствующей всасывающему давлению влаги от -2 до -4 кПа, достигнутому при медленном увлажнении (от значений всасывающего давления влаги $-60 \dots -70$ кПа, полученных при первом обезвоживании грунта от полной влагоемкости). В режиме увлажнения используют зависимость, полученную от значений всасывающего давления влаги $-60 \dots -70$ кПа.

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ О ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ВЛАЖНОСТЬЮ И ВСАСЫВАЮЩИМ ДАВЛЕНИЕМ ВЛАГИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕСТЕСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВ*

Развитие методов математического моделирования мелиоративно-гидрогеологических условий и их изменения во времени вызвало повышение интереса к исследованиям, связанным с изучением естественной гетерогенности грунтов. Широко используемые в настоящее время детерминированные модели чаще всего дают возможность учесть лишь вертикальную неоднородность грунтов. При этом принимается предпосылка о плановой однородности отложений изучаемого участка. Однако материалы полевых исследований показывают, что даже в пределах ограниченных территорий имеет место плановая неоднородность свойств грунтов, поэтому использование этой предпосылки может привести к получению неверных результатов.

Некоторые исследователи считают, что при изучении процессов влагопереноса на больших площадях в условиях существенной плановой неоднородности грунтов использование уравнений (7) и (8) в их традиционном виде неправомерно. Предлагаются модели, основанные на вероятностно-статистической трактовке этого уравнения и ему подобных, при реализации которых используют вероятностно-статистические характеристики параметров, входящих в уравнения, в частности —

* Раздел написан совместно с Е.А. Древиным.

функции плотности вероятности, функции распределения, статистические моменты и т. п.

При создании подобных моделей учитывают изменчивость ограниченного числа параметров, допуская, что остальные фильтрационные характеристики изменяются в пространстве незначительно, а следовательно, их можно считать постоянными.

Тем не менее в процессе усовершенствования моделей этого типа такие ограничения будут устранены, и в идеальном случае для адекватного описания природной обстановки модель будет содержать полный спектр данных об изменчивости параметров.

Поэтому в настоящее время наибольший интерес представляет установление видов распределений значений различных характеристик грунтов, рассматриваемых как случайные величины. Решение этой задачи даст возможность на основе использования аппарата математической статистики применять различные виды статистического анализа, что, в свою очередь, позволит на количественной основе принимать или отклонять выдвинутые гипотезы об изучаемом объекте, в том числе об однородности или неоднородности грунтов исследуемого массива.

В настоящей работе излагается анализ неоднородности грунтов по глубине и площади орошаемого массива на примере изучения основной гидрофизической характеристики грунта (ОГХ) — зависимости влажности от всасывающего давления. Авторами были проанализированы данные двухлетних наблюдений на массиве площадью около 60 га в совхозе "Семисотка" Крымской области. В геологическом строении исследуемой территории в пределах интересующих глубин принимают участие суглинки — средние, лёссовые, желто-бурые, с включениями "белоглазки", тугопластичные. Глубина их залегания (от поверхности земли) достигает 1 м. Ниже, до глубины примерно 2 м, залегают те же суглинки, но с большим количеством включений и редкими прожилками гипса. В первый год образцы грунта отбирались в скважинах 1, 2, 3, 4 и шурфах 1, 2 на глубинах 0,5; 1 и 2 м; на второй год — в скважинах 1, 5, 6, 9 на глубинах 0,3; 0,5 и 1 м.

Для определения зависимости всасывающего давления от влажности грунта был применен экспресс-метод. С целью сокращения времени опыт проводился одновременно на нескольких образцах при различных значениях всасывающего давления влаги. Для достижения исходного полного водонасыщения образцы грунта ненарушенной структуры предварительно насыщались водой в условиях разрежения. Поскольку в естественных условиях в корнеобитаемом слое преобладает процесс иссушения [28], опыты проводились при иссушении. Представительность данных, позволяющая применить методы математической статистики для обработки результатов опытов, обеспечивалась достаточно большой пропускной способностью используемого оборудования. Для получения зависимости распределения влажности от величины всасывающего дав-

ления влаги в один прибор помещалось 16 образцов грунта (в бюксах высотой 4 см и диаметром 5 см). Опыты проводились при фиксированных значениях (ступенях) разрежения — 2, — 5, — 10, — 20, — 30, — 40, — 50 и — 60 кПа.

После насыщения грунта бюксы размещали в приборах и в системе "зонд — мерный сосуд" задавали необходимое разрежение, которое контролировали манометром. Вода из грунта стекала в мерный сосуд. Прекращение поступления воды из бюксов свидетельствовало о равновесии всасывающего давления влаги в исследуемых грунтах с задаваемым давлением. После этого бюксы снимали с установками и определяли влажность грунта традиционным термостатно-весовым методом.

Полученные данные позволяют судить о распределении значений влажности грунта при определенных значениях всасывающего давления влаги, а также построить графики $\theta(p)$ для каждой точки отбора образцов и обобщенные по площади для каждой исследуемой глубины.

Статистическая обработка проводилась отдельно по результатам каждого года исследований. На первом этапе по полной выборке данных, полученных для исследуемого массива, на каждой из указанных глубин выяснялся закон распределения значений влажности грунта при определенном всасывающем давлении влаги. Поскольку значения влажности при фиксированных значениях всасывающего давления влаги подчинялись нормальному распределению, дальнейший анализ проводился с применением параметрических методов статистики.

На втором этапе проверялась гипотеза о том, что обобщенные по площади распределения $\theta(p)$ для каждой из исследуемых глубин незначительно отличаются друг от друга, или, другими словами, оценивалась однородность вертикального строения грунтов зоны аэрации в пределах одного массива по данным зависимостей между влажностью грунта и всасывающим давлением влаги. Тестовая реализация проводилась следующим образом. На какой-либо ступени задаваемого давления с помощью критериев Стьюдента t и Фишера F сравнивались попарно средние значения и дисперсии выборок, полученные для различных глубин по всей исследованной территории. Таким способом были обработаны средние значения и дисперсии выборок для значений всасывающего давления влаги 0, — 5, — 10, — 20, — 30, — 40, — 50 и — 70 кПа.

На последнем, третьем этапе проверялась гипотеза о том, что распределения $\theta(p)$, полученные при обработке образцов грунта, отобранных в различных точках исследуемого массива с одной глубины, незначительно отличаются друг от друга, т. е. с помощью ОГХ проверялась гипотеза об однородности грунтов по площади в пределах массива. Тестовая реализация проводилась с помощью обобщенного критерия проверки принадлежности нескольких выборок к общей генеральной совокупности и критерия Бартлетта.

Обобщенный критерий F определяется по формуле

$$F^{(k)}(k-1, n_1 + n_2 + \dots + n_k - k) = \frac{\frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k n_j [\bar{x}_k(n_k) - \bar{x}(n)]^2}{\tilde{S}^2(n)}$$

где

$$\bar{x}(n) = \frac{1}{n_1 + \dots + n_k} \sum_{j=1}^k n_j \bar{x}_j(n_k); \quad j = 1, 2, \dots, k;$$

$$\tilde{S}^2(n) = \frac{1}{n_1 + \dots + n_k - k} \sum_{j=1}^k (n_j - 1) S^2(n_j);$$

$$S^2(n_j) = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} [x_i - \bar{x}_k(n_k)]^2;$$

k — число выборок; n_k — число вариантов в каждой выборке; $\bar{x}(n)$ — общее среднее арифметическое, подсчитанное по объединению всех выборок; $\bar{x}_k(n_k)$ — среднее арифметическое каждой выборки; $\tilde{S}^2(n)$ — общая выборочная дисперсия; $S^2(n_j)$ — выборочные дисперсии каждой выборки.

Если окажется, что $F^{(k)}(k-1, n_1 + \dots + n_k - k) \leq F_\alpha(k-1, n_1 + \dots + n_k - k)$, (где F_α — критическое значение F -критерия для $k-1$ и $n_1 + \dots + n_k - k$ степеней свободы числителя и знаменателя соответственно), то гипотеза об однородности выборок принимается.

Критерий Бартлетта реализуется следующими формулами:

$$M = N \ln \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^k v_j S^2(n_j) - \sum_{j=1}^k v_j S^2(n_j) \right];$$

$$N = \sum_{j=1}^k v_j,$$

где v_j — число степеней свободы каждой выборки.

Если гипотеза об однородности дисперсий верна и все $\partial_j > 3$, то отношение

$$M = \left[1 + \frac{1}{3(k-1)} \left(\sum_{j=1}^k \frac{1}{v_j} - \frac{1}{N} \right) \right]^{-1}$$

распределено приближенно, как χ^2 с $k-1$ степенями свободы.

В результате обработки имеющихся данных установлено, что распределение значений влажности, полученное по образцам грунта, отобраным с одной глубины в различных точках изучаемого массива, при определенном всасывающем давлении влаги с 95 %-ной доверительной вероятностью может быть описано нормальным законом.

Установлено, что при всасывающем давлении влаги менее -5 кПа точность определения средних значений влажности грунта достаточно высокая — порядка 1—2 %. При полной влагоемкости грунтов увеличивается разброс значений в выборках, и погрешность определения средних значений влажности возрастает до 5 %; при этом коэффициент вариации в выборках при $p = 0$ кПа составил около 10 %, в то время как при остальных ступенях всасывающего давления влаги он редко превышал 5 %. Такое изменение статистических оценок объясняется тем, что при полной влагоемкости грунта в процессе влагообмена участвуют поры самого крупного диаметра, незакономерно распределенные в грунте.

Анализ выборочных дисперсий, выполненный с помощью критерия Бартлетта на уровне 5 %-ной значимости, показал, что дисперсии значений влажности в выборках при проведении опыта в диапазоне от полного насыщения до давления -70 кПа не являются статистически однородными, а имеют тенденцию к уменьшению с понижением всасывающего давления влаги, кроме случая выборок, сделанных для глубины 1 м, где равенство дисперсий на указанном уровне значимости принимается.

Возможно, что на глубине 1 м для грунта характерно более однородное распределение пор по размерам, что и привело к отсутствию какой-либо тенденции в изменении значений дисперсий, полученных при различных значениях всасывающего давления влаги.

Исследованиями установлено, что при проведении опыта на какой-либо одной ступени давления дисперсии выборок на уровне значимости 5 % статистически однородны, кроме случая полного насыщения, вне зависимости от глубины отбора образцов.

Проверка гипотезы об однородном вертикальном строении верхней двухметровой части зоны аэрации в пределах изучаемого массива (по данным зависимостей $\theta(p)$) показала, что распределения $\theta(p)$ для глубин 0,3; 0,5; 1 и 2 м существенно различаются между собой. Это можно рассматривать как результат вертикальной неоднородности влажности грунтов в пределах первых 2 м зоны аэрации (рис. 62).

Отклонение гипотезы однородности принято по критерию сравнения средних значений выборок, полученных с различных глубин, в то время как F -критерий дисперсий давал значения в пределах уровня принятия гипотезы.

Анализ полученных зависимостей $\theta(p)$ на каждой из исследуемых глубин с целью изучения площадной изменчивости $\theta(p)$ показал, что

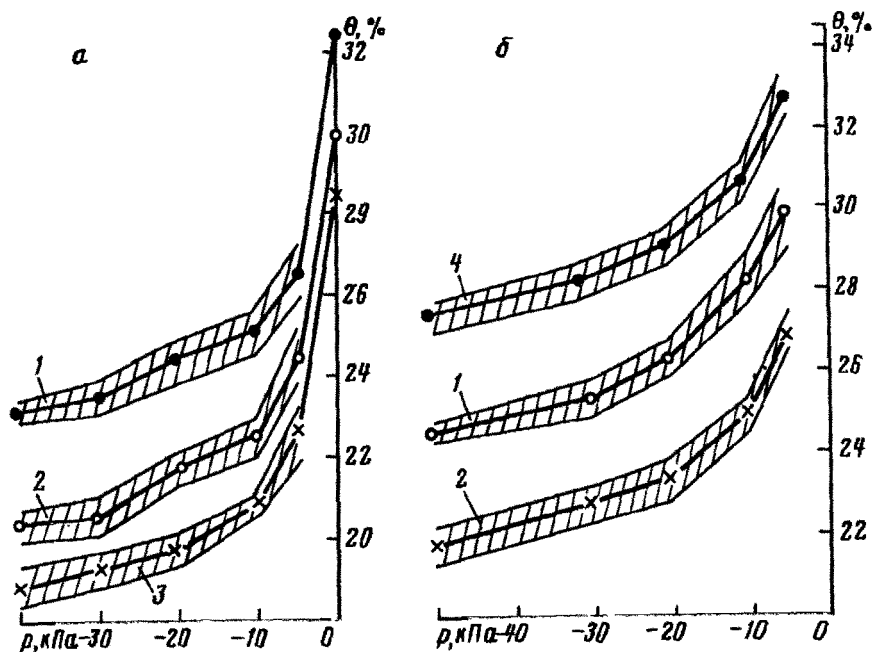


Рис. 62. Графики зависимости $\theta(p)$ с 90 %-ными доверительными областями, полученные по результатам первого (а) и второго (б) года исследований.

Глубины: 1 – 0,5 м; 2 – 1 м; 3 – 2 м; 4 – 0,3 м

в первый год исследований гипотеза однородности распределений влажности грунтов по площади принимается на уровне значимости 5 % для глубин 0,5 и 1 м. (Данные с глубины 2 м получены только для шурфов 1 и 2 и поэтому в площадной интерпретации не использовались).

Аналогичная проверка, выполненная по данным второго года исследований, показала, что гипотеза однородности ОГХ для глубины 0,3 м несостоятельна при значениях всасывающего давления 0, – 2, – 5, – 10, – 30 и – 50 кПа и состоятельна при давлениях – 20 и – 70 кПа. Для глубины 0,5 м однородность отвергается для значений давления влаги от 0 до – 20 кПа и принимается для давлений от – 30 до – 70 кПа. Для глубины 1 м однородность распределений $\theta(p)$ отвергается для давлений от – 10 до – 70 кПа и принимается для давлений влаги от 0 до – 5 кПа.

По данным, полученным в течение второго года, в грунтах наблюдается существенное различие распределений $\theta(p)$ по территории исследований, хотя в отдельных случаях при некоторых значениях всасывающего давления влаги их можно считать однородными. Качественное представление об однородности-неоднородности распределений в пределах первого метра зоны аэрации можно получить по данным, приведенным в табл. 6.

Отклонение однородности проверено также по критерию сравнения выборочных средних. Критерильная проверка выборочных дисперсий показала их сопоставимость.

Таблица 5

Глубина, м	Принятие (+) или отклонение (—) гипотезы при различных давлениях (кПа)							
	0	—2	—5	—10	—20	—30	—50	—70
0,3	—	—	—	—	+	—	—	+
0,5	—	—	—	—	—	+	+	+
1,0	+	+	+	—	—	—	—	—

Причину того, что в различные годы исследований были получены противоположные результаты, следует искать в случайном характере распределения структурных особенностей грунта, а также в дискретности отбора образцов грунта. При этом возможна ситуация, когда опробование по одному ансамблю точек, случайным образом попавших в однородные области массива, показало однородное площадное распределение влажности, а опробование по другой совокупности точек — неоднородное. Следовательно, в целом констатируется неоднородное распределение влажности грунтов по площади орошаемого массива, что представляет собой проявление площадной гетерогенности грунтов.

Таким образом, в результате анализа зависимостей влажности от всасывающего давления влаги установлено, что распределение влажности грунтов существенно неоднородно по глубине и площади исследуемого орошаемого массива. Следовательно, изучаемые грунты нельзя рассматривать как однородные с точки зрения изменчивости величины ОГХ даже в пределах одной литолого-генетической разности. Несмотря на значительную площадную гетерогенность грунтов в отношении распределения их влажности, возможны случаи их однородности на некоторых локальных участках.

ГЛАВА 5

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И РАСЧЕТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА ГРУНТОВ ЗОНЫ АЭРАЦИИ

Завершающая стадия исследований водного режима грунтов — это обработка материалов наблюдений, которая может проводиться на основе детерминированных и вероятностно-стохастических моде-

лей. Наиболее распространенный прием расчетов элементов водного баланса — использование детерминированного подхода, который предусматривает оценку расхода и запасов влаги в различных слоях при инфильтрационном питании грунтовых вод по одному вертикальному сечению зоны аэрации (например, по данным измерений в одном шурфе или по одному кусту скважин). Это — традиционный и пока самый распространенный на практике подход, однако он не учитывает площадную изменчивость водопроницаемости, влажности и всасывающего давления влаги.

В последнее время в разных областях науки и техники, в том числе в гидрофизике грунтов широко применяются вероятностно-стохастические методы. Использование их дает возможность оценить площадную изменчивость условий формирования водного режима грунтов и перейти от локальных характеристик влагопереноса к интегральным обобщениям для больших площадей. Судя по возможностям вероятностно-статистических методов, в будущем они получат приоритет в проведении и обобщении результатов гидрофизических исследований.

РАСЧЕТЫ ЕДИНИЧНОГО РАСХОДА (СКОРОСТИ) ПОТОКА ВЛАГИ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ

Исходными для расчета расхода потока влаги в грунтах зоны аэрации являются данные режимных гидрофизических наблюдений, представленные на эпюрах и хронологических графиках изменения гидродинамического напора, а также результаты определения коэффициента влагопереноса.

Расчет производится для требуемого момента времени по обобщенной зависимости Дарси, которая выражается формулой (6) :

$$q_{t,i,i+1} = k_v(h_v, i + 1/2) \frac{H_{i+1} - H_i}{z_{i+1} - z_i} \quad (22)$$

где $q_{t,i,i+1}$ — единичный расход влаги (скорость влагопереноса) в момент времени t между расчетными сечениями i и $i + 1$; $k_v(h_v, i + 1/2)$ — средний коэффициент влагопереноса для интервала между сечениями i и $i + 1$; H_{i+1}, H_i — гидродинамический напор в соответствующих сечениях в момент времени t ; z_{i+1}, z_i — вертикальная координата, соответствующая сечениям $i + 1$ и i ; h_v — высота всасывания.

Наиболее правильно определять величину расхода потока влаги в требуемый момент времени по информации о распределении напоров по вертикальному сечению зоны аэрации. Зависимость (22) предусматривает использование среднего коэффициента влагопереноса, характеризующего расчетный интервал, поэтому расчетные сечения i и $i + 1$

необходимо выбирать в пределах однородного по литологии слоя. Если смежные тензиометры расположены в пределах одного слоя, то в качестве расчетных следует принимать сечения, в которых располагаются зонды тензиометров. Соответственно для каждого сечения с графиков снимаются значения напоров и координат.

Для получения среднего значения коэффициента влагопереноса по хронологическому графику или эпюре напоров определяется величина высоты всасывания в сечении $i + 1/2$, т. е. посередине между расчетными сечениями. Затем с графика зависимости k_v от p_v для соответствующего по литологии слоя грунта при конкретной величине высоты всасывания снимается величина коэффициента влагопереноса.

Если зонды смежных тензиометров располагаются в разных слоях, расчет величины единичного расхода будет менее точным, так как при определении расчетной величины коэффициента влагопереноса неминуема погрешность.

Для получения достаточно надежных расчетных величин необходимо строго выполнять требования к размещению зондов тензиометров (при оборудовании опытной площадки) выше и ниже плоскостей напластования смежных слоев.

РАСЧЕТЫ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ И ЗАПАСОВ ВЛАГИ

Исходными данными для расчета влажности грунтов зоны аэрации являются эпюры и хронологические графики изменения напоров, а также основная гидрофизическая характеристика грунтов $\theta = f(h_v)$.

Расчет производится для конкретного момента времени t , причем вертикальный разрез зоны аэрации разделяется на расчетные интервалы. Для такого интервала в момент t запасы влаги (в миллиметрах водного слоя) определяются по зависимости

$$U_{i,i+1} = 10(z_{i+1} - z_i) \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{2}, \quad (23)$$

где θ — объемная влажность грунта в момент времени t .

В качестве расчетных сечений i и $i + 1$ следует принимать места заложения зондов тензиометров. Если смежные сечения располагаются в пределах одного слоя, оценка запасов влаги будет наиболее точной; если один из зондов находится в другом слое, точность определения уменьшается.

Для каждого расчетного сечения с графиков снимаются его координаты z и соответствующие величины высоты всасывания в момент времени t . Затем с графика ОГХ снимаются величины влажности θ_{i+1} и θ_i , после чего по зависимости (23) определяются запасы влаги.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕДИНИЧНОГО РАСХОДА ПОТОКА ВЛАГИ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ И ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ

При использовании гидрофизического метода для воднобалансовых наблюдений иногда возникает необходимость в прямом измерении в естественных условиях единичного расхода потока влаги в зоне аэрации (скорости влагопереноса) по вертикальной координате. Для таких измерений необходимо оборудование глубинных потокомеров и проведение специальных, довольно сложных наблюдений. В этом случае глубина шурфов должна быть равна мощности зоны аэрации. В шурф устанавливаются почвенные тензиометры и, кроме того, на глубинах, соответствующих сечениям, в которых намечено измерять расход, вырезаются ниши для установки измерительных устройств. Стенки шурфа покрываются гидроизоляцией 1. На верхней и нижней поверхностях ниш монтируются отдельные блоки потокомеров (рис. 63): верхняя камера отрицательного давления 8 с керамической пористой пластиной 9 и нижняя камера отрицательного давления 4 с пористой пластиной. В камерах устанавливаются отводы 3 к вакуумному насосу, а также специальные отводы для подачи 5 порового раствора в нижнюю камеру и для отвода 6 из верхней камеры 8. При определении расхода влаги необходимо с помощью камер 4 и 8 поддерживать всасывающее давление, которое соответствует показаниям рабочих тензиометров 10, установленных на противоположной стенке шурфа в тех же сечениях.

Поддерживая над нишей и под ней в исследуемом грунте давление, равное давлению влаги в ненарушенных условиях и фиксируемое рабочими тензиометрами 10 на заданной глубине зоны аэрации, можно сохранить естественное движение влаги. Объем порового раствора, прошедшего через верхнюю камеру и по отводу поступившего в измерительный сосуд, характеризует величину расхода влаги.

Единичный расход потока влаги в данном сечении определяется по зависимости

$$q = V / (F \Delta t), \quad (24)$$

где V — объем воды, поступившей через пористую пластину за время Δt ; F — площадь сечения пористой пластины.

В нижнюю камеру по отводу 5 подается поровый раствор, необходимый для сохранения движения влаги ниже сечения, в котором устроена ниша.

При использовании глубинного потокомера для решения частной задачи оценки инфильтрационного питания установка нижней камеры не требуется, а верхнюю камеру можно размещать в нише, заложенной над поверхностью грунтовых вод. В этом случае измеряемый расход будет характеризовать нисходящий поток влаги и соответствовать величине инфильтрационного питания.

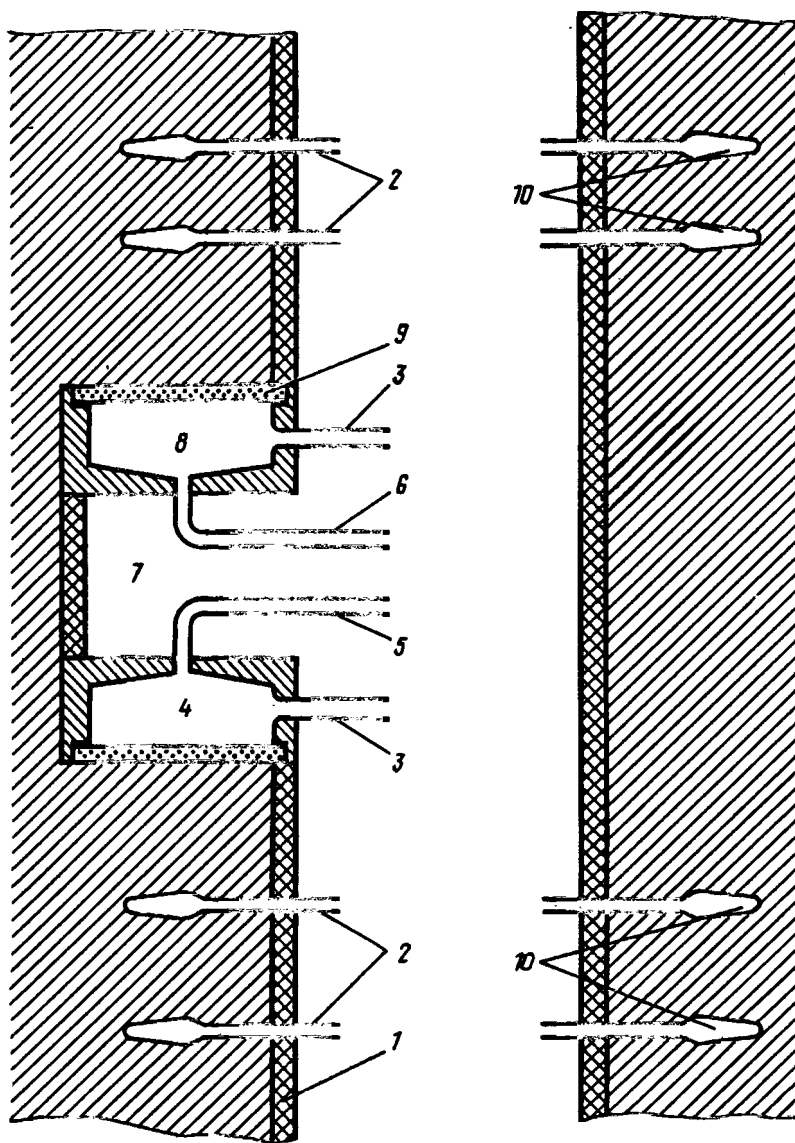


Рис. 63. Схема глубинного потокомера:

1 — гидроизоляция; 2 — зонды контрольных тензиометров; 3 — отвод к вакуумному насосу; 4 — нижняя камера отрицательного давления; 5, 6 — отводы для подачи (5) и приема (6) порового раствора; 7 — ниша в шурфе; 8 — верхняя камера отрицательного давления; 9 — полупроницаемая керамическая пластина; 10 — зонды рабочих тензиометров

Инфильтрационным питанием грунтовых вод принято называть единичный расход потока влаги, поступающей на уровень грунтовых вод. При расчете этой величины в соответствии с рекомендацией, приведенной выше, для расчетного интервала, расположенного непосредственно над поверхностью грунтовых вод, получается величина инфильтрационного питания в момент времени t .

Для слоя активного водообмена (мощностью 2—5 м) характерен резко неустановившийся режим изменения влажности и разнонаправленное движение влаги (вверх или вниз). Эти особенности динамики переноса влаги обусловлены резкими изменениями поступления воды на поверхность почвы, сменой обильного увлажнения (атмосферные осадки и поливы при орошении) процессами иссушения (бездождевые и межполивные периоды); велико также значение процесса транспирации влаги растениями в пределах зоны развития их корневой системы.

В таких условиях дополнительно к информации о переносе влаги, которую дают режимные тензиометрические наблюдения, целесообразно получить оценку водного баланса слоя активного водообмена в целом. Для этих целей в специальном шурфе оборудуется балансометр-потокосмер. В слое активного водообмена закладывают шурф на глубину, превышающую мощность этого слоя на 1—1,5 м. Для сохранения естественного режима влажности грунтов стенки шурфа покрывают гидроизолирующей 1 (рис. 64).

В стенке шурфа на необходимых глубинах устанавливаются зонды рабочих тензиометров 9. На противоположной стенке шурфа вырезается монолит грунта ненарушенной структуры 7, высота которого соответствует мощности слоя активного водообмена. Монолит также гидроизолируется и оснащается контрольными тензиометрами, зонды которых 6 устанавливаются на глубинах, соответствующих сечениям, где установлены зонды рабочих тензиометров. В нижнем торце монолита находится полупроницаемая керамическая пластина 5 с камерой отрицательного давления 4. В балансометре поддерживается движение влаги, соответствующее переносу влаги в естественных условиях, фиксируемому рабочими тензиометрами 9.

Поток влаги в монолите регулируется путем создания в камере 4 разрежения, обеспечивающего поддержание в контрольных тензиометрах 6 давления синхронно показаниям рабочих тензиометров.

Отводы 2 и 3 соединяют камеру отрицательного давления с системой управления, которая размещается в шурфе. Система действует в условиях разрежения и состоит из вакуумного насоса, регулирующей емкости, измерительного сосуда, в который поступает влага из камеры, и соединительных трубок с зажимами.

Направление движения влаги в монолите может быть как восходящим, так и нисходящим. Объем воды, прошедшей через керамическую пластину, характеризует величину естественного расхода влаги.

В процессе наблюдений фиксируются поступление воды на поверхность земли (осадки и поливы), а также объемы воды, вытекающей через камеру из монолита или поступающей в него. Использование информации о величине высоты всасывания по показаниям контрольных

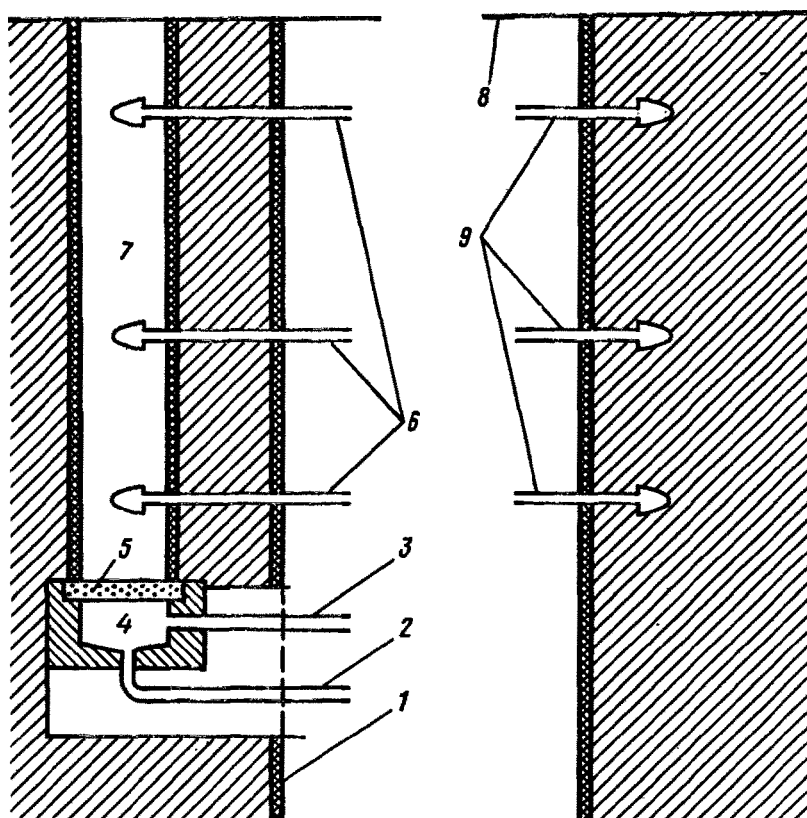


Рис. 84. Схема устройства балансометра-потокомера:

1 — гидроизоляция; 2 — отвод для приема и подачи порового раствора; 3 — отвод к вакуумному насосу; 4 — камера отрицательного давления; 5 — полупроницаемая керамическая пластина; 6 — зонды контрольных тензиометров; 7 — монолит с гидроизоляционным покрытием; 8 — поверхность земли; 9 — зонды рабочих тензиометров

тензиометров при наличии основной гидрофизической характеристики грунтов $\theta = f(h_B)$ позволяет оценить изменение запасов влаги в монолите балансометра.

Все данные, необходимые для составления замкнутого водного баланса активной зоны, полученные экспериментально, позволяют оценить для определенных периодов времени величину нисходящего (инфильтрационные потери) или восходящего (суммарное испарение) расхода из активной зоны.

Процессы формирования водного режима почв и грунтов часто изучаются при неполной информации об их параметрах и количественных показателях. Поэтому расчетная схема реальных процессов с точки зрения ее адекватности объекту всегда носит некоторую и, как правило, значительную неопределенность. Следовательно, в этих условиях точное предсказание фильтрационных процессов невозможно.

При заметной хаотичности порового пространства, влияющей на движение поровой влаги, случайном механизме генезиса и эволюции почв и грунтов, а также недостаточности информации требуется применение специального аппарата, который при анализе процессов переноса влаги учитывал бы специфичность изменчивости изучаемых объектов в пространстве и во времени. Совершенно естественно использовать для этой цели концепции и методы теории вероятностей, теории случайных функций и математическую статистику.

Прежде всего, вероятностно-статистическая интерпретация позволяет применять эффективные методы описания нерегулярных структур с помощью характеристик, учитывающих наиболее важную информацию о полях изменчивости (например, функции распределения, моменты, спектры и т. п.). Однако статистическая интерпретация ставит совсем нетривиальные задачи по определению как характеристик пористых сред, так и условий, под влиянием которых происходят процессы влагопереноса и фильтрации.

Формулировка задач гидродинамики в стохастических пористых средах является естественным обобщением обычных задач, в которых параметры, характеризующие свойства пористой среды, считаются случайными величинами или функциями координат. Поскольку искомые поля — случайные, следует сосредоточить усилия на нахождении их важнейших характеристик: моментных функций (в частности, среднее поле и автокорреляционную функцию), спектральных представлений, взаимных корреляций искомых и заданных полей и т. д.

Эта задача является более общей, чем соответствующая задача в детерминистической постановке. Стохастическую фильтрационную задачу можно представить эквивалентной множеству детерминированных задач, каждая из которых соответствует какому-либо из членов бесконечной совокупности реализаций задаваемого случайного поля. Иными словами, при сохранении формального сходства с детерминированной задачей стохастическая задача связана с использованием качественно иной информации о заданных и искоемых полях.

*Раздел написан совместно с Е.А. Древиным.

Для оценки пространственных закономерностей изменения водного режима грунтов можно использовать два основных пути. Первый основан на том, что изучаемому явлению (параметру, характеристике) предоставляется статус случайной величины. Второй путь — рассматривать данное явление в качестве реализации случайного процесса, а его параметры и характеристики — как случайные функции. Второй путь предпочтителен при наличии корреляции значений изучаемой характеристики (параметра) водного режима. Именно наличие или отсутствие такой корреляции дает возможность выбрать пути и методы дальнейшей обработки имеющихся данных. Поскольку речь идет о пространственных закономерностях, наличие корреляции значений определяется путем построения функций пространственного сходства — автокорреляционной функции $\rho(\vec{h})$ и (или) вариограммы $\gamma(\vec{h})$. Обе эти функции зависят от относительного расстояния между точками опробования в данном направлении. Первая функция выявляет корреляцию самих значений изучаемой пространственной переменной, а вторая — определяет зависимость вариации ее значений от относительного расстояния между точками опробования. Иными словами, вариограмма показывает, как в среднем зависят значения характеристики (параметра) от расстояния в заданном направлении или в заданной области пространства.

В направлении \vec{h} автокорреляционная функция оценивается с помощью выражения

$$\rho(\vec{h}) = \frac{\text{cov} [z(x_j + h) \ z(x_j)]}{\sqrt{\text{var} [z(x_j + h)] \ \text{var} [z(x_j)]}}$$

а в одномерном случае — с помощью выражения

$$\rho(\vec{h}) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-h} (z_i + h - \bar{z})(z_i - \bar{z})}{\frac{1}{N-1} \sum (z_i - \bar{z})^2}$$

где $z(x_j)$ — значение характеристики (параметра) в точке i ; $z(x_j + h)$ — значение характеристики (параметра) в точке $x_j + h$, отстоящей от точки x_j на расстояние \vec{h} в заданном направлении; N — число точек опробования; $(N - h)$ — число пар точек, по которым рассчитывается автокорреляционная функция; \bar{z} — среднее значение характеристики (параметра).

Определение вариограммы в общем случае основывается на тройном интеграле

$$\gamma(\vec{h}) = \frac{1}{V} \int_V [z(x_j + \vec{h}) - z(x)]^2 dx,$$

вычисленном по всему исследуемому пространству V . На практике этот интеграл оценивается по выборочным данным с помощью выражения

$$\gamma(\vec{h}) = \frac{1}{(N-h)} \sum_{i=1}^{(N-h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2.$$

В условиях отсутствия тренда вариограмма имеет тесную связь с автокоррелограммой

$$\gamma(\vec{h}) = \text{var} [z(x)] = 1 - \rho(\vec{h}).$$

Исследование закономерностей пространственной изменчивости с помощью теории случайных функций и пространственных переменных осуществляется путем вариограммного анализа и крайгинга [32]. Термин "крайгинг" был введен для обозначения метода наилучшего линейного несмещенного оценивания неизвестной точки (или нахождения лучшего взвешенного скользящего среднего) в условиях коррелированности значений $z_j(x)$.

Смысл крайгинга состоит в том, что каждой точке опробования приписывается такой вес, при котором получаемая оценка неизвестного значения обладает минимальной дисперсией. По сравнению с обычными методами интерполяции и тренд-анализа крайгинг обладает преимуществом, так как он принимает во внимание: 1) число и конфигурацию всех точек наблюдения; 2) положение точек опробования внутри изучаемой области; 3) пространственную изменчивость исследуемой переменной через использование вариограммы.

Результирующая крайгинг-система в условиях выполнения гипотезы о стационарности приращений пространственной переменной записывается в виде

$$\begin{cases} \sum a_j \sigma_{x_j x_j} + \mu = \sigma_{x_0} x_j; \\ \sum a_j = 1; \quad i = 1, \dots, n, \end{cases}$$

или в терминах вариограммного анализа:

$$\begin{cases} \sum a_j \bar{\gamma}_{ij} + \mu = \bar{\gamma}_{0i}; \\ \sum a_j = 1. \end{cases}$$

где a_j — коэффициент крайгинг-системы; σ_{xx} — дисперсия крайгинга; μ — множитель Лагранжа; x_0, x_i, x_j — координаты точек опробования.

Рассмотрим ряд задач, которые можно решить с помощью крайгинга.

В первую очередь, крайгинг — это инструмент точной интерполяции, он может быть использован для построения поверхности уровня грунто-

вых вод, пьезометрической поверхности, а также для картирования различных параметров, характеризующих состояние гидрогеологических систем. Крайгинг может применяться при оценке средних значений пространственной переменной, причем они оцениваются с учетом пространственной изменчивости изучаемого параметра в пределах области (блока).

Крайгинг следует применять также при оптимизации планов опробования, в том числе при планировании режимных наблюдательных сетей. Здесь используется одно из свойств крайгинга: он зависит не только от пространственной изменчивости изучаемого параметра, но и от конфигурации точек опробования и не зависит от значений, принимаемых пространственной переменной. При оптимизации плана опробования дополнительные точки размещают в области максимальной дисперсии крайгинга. Например, при оценке средних значений дополнительные точки располагаются так, чтобы оценка дисперсии для среднего значения была минимальной при данном плане опробования.

При оценке пространственной изменчивости изучаемого явления (характеристики, параметра) можно воспользоваться анализом его тренд-поверхностей, построение которых основано на методе наименьших квадратов (МНК).

Изучаемое явление рассматривается как сумма детерминированной компоненты $\sum a_{\theta} f^{\theta}(x)$ и погрешности $\epsilon(x)$, которая имеет нулевое ожидание, постоянную дисперсию и не коррелирована сама с собой:

$$z(x) = \sum_{\theta=1}^k a_{\theta} f^{\theta}(x) + \epsilon(x),$$

где k — наилучший порядок тренд-поверхности.

Такая модель рассматривает каждое значение z_j как случайную величину, распределение которой зависит от неслучайных параметров — координат. Соответственно принимается, что значения z_j не коррелированы между собой, обладают конечной дисперсией и имеют средние значения $m(x)$, определяемые выражением

$$E[z(x)] = m(x) = \sum_{\theta=1}^k a_{\theta} f^{\theta}(x).$$

Если все приведенные выше предположения выполняются, то МНК даст наилучшую линейную несмещенную оценку.

При анализе поверхностей тренда возможны два основных случая.

1. На данной территории не выявляется тренда изучаемого параметра. Тогда в качестве модели можно принять выражение $z_j = \bar{z} + l_j$, где z_j — измеренное значение; \bar{z} — математическое ожидание; l_j — случайная компонента.

В этих условиях для определения необходимого числа точек опробования (наблюдения) можно воспользоваться зависимостью, выведенной для нормально распределенной случайной величины

$$n = \frac{t_{\alpha/2, n-1}^2 S_N^2}{C^2},$$

где t — критерий Стьюдента для уровня значимости α и $n - 1$ степеней свободы; N — объем выборки данных; S_N^2 — оценка дисперсии выборки; C — погрешность определения среднего значения выборки.

Кроме того, для установления объемов исследований можно использовать так называемый последовательный метод, который заключается в корректировке дисперсии выборки S_N^2 после включения в нее каждого дополнительного наблюдения (см. гл. 2).

В качестве примера можно сослаться на приведенные ниже данные по исследованию пространственной изменчивости величины всасывающего давления влаги в корнеобитаемом слое грунтов на орошаемых землях совхоза им. XXV съезда КПСС Киевской области.

Анализ распределения значений всасывающего давления не выявил тренда на наблюдательных площадках. В этих условиях для определения необходимого числа точек наблюдения с целью получения среднего значения всасывающего давления с 10 %-ной точностью была использована модифицированная формула.

2. На данной территории выявлен тренд изучаемого параметра. В этом случае поиск оптимальной тренд-поверхности проводится с помощью МНК. Основное требование для применения аппарата тренд-анализа — равномерное распределение точек наблюдения по исследуемой территории. При их планировании это требование можно удовлетворить, используя метод "ближайшего соседа" в совокупности с назначением координат точек опробования случайным методом (например, с помощью генератора или таблиц случайных чисел).

В качестве примера рассмотрим пространственную изменчивость всасывающего давления влаги на опытных участках Киевского государственного университета в Крымской и Киевской областях.

ГЛАВА 6

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОДНОГО РЕЖИМА ПОЧВ В СВЯЗИ С ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПРИ ОРОШЕНИИ*

Применение гидрофизического метода позволяет повысить достоверность оценки водного режима почв и грунтов в связи с его регулированием при орошении. На землях совхоза "Семисотка" Крымской

* Глава написана совместно с Е.А. Древниним.

области наблюдательная площадка была оборудована на участке орошения люцерны дождевальным установкой "Фрегат". Почвы участка исследований — темно-каштановые, суглинистые.

Замеры всасывающего давления влаги производились с помощью почвенных тензиометров, установленных на глубине 0,3 м на расстоянии 20 м друг от друга по двум диаметрам орошаемого круга, которые были ориентированы с севера на юг и с запада на восток. Всего было установлено 20 тензиометров (по 10 на каждом диаметре). Вариограммы всасывающих давлений рассчитывались по выборкам данных в соответствующих направлениях. На рис. 65 представлены их графики на различные моменты вегетационного периода. Поведение вариограмм характеризуется значительным разнообразием, что не дает возможности сделать вывод о какой-либо общей закономерности процесса распределения влаги в изучаемых направлениях. Но можно отметить, что в некоторые моменты времени (см. рис. 65, *д, е, и*) вариограммы разных направлений имеют сходный характер и их можно считать изотропными. Значительный интерес представляет поведение вариограммы вблизи нуля. Если при $h \rightarrow 0$ вариограмма также стремится к нулю, как в случаях *а, г, д, е, ж* (см. рис. 65), то она обладает регулярностью и непрерывностью в нуле, что свидетельствует о коррелированности значений изучаемой переменной. Если же при $h \rightarrow 0$ вариограмма не стремится к нулю, но ее поведение остается регулярным, как в случае *з* (см. рис. 65), то говорят о наличии "эффекта самородков", который указывает на присутствие случайной компоненты в процессе перераспределения влаги. Если вариограмма имеет пилообразную форму, как в случаях *б, г, з* (см. рис. 65), без каких-либо тенденций к изменению в сторону увеличения или уменьшения, то изучаемую переменную лучше рассматривать в качестве случайной величины.

В последние годы для назначения сроков и норм поливов все шире используют различного рода информационно-советующие системы.

В частности, начиная с 1981 г. задание норм и сроков поливов в Обуховском районе Киевской области осуществляется с помощью ЭВМ на основании программ, разработанных в институтах УкрНИИГиМ и Укргипроводхоз. В качестве начальной информации в программе задаются данные о влагонасыщенности грунтов на начальный период вегетации с дифференциацией по полям орошения, а также видам сельскохозяйственных культур и некоторая дополнительная информация. Выходами из программы являются влажность поливных и неполивных земель, фаза развития растения, поливная норма, номер и сроки полива. Эффективность использования такой системы задания поливов трудно проверить, потому что отсутствует массовая информация об истинном влагосодержании в корнеобитаемом слое и изменении положения УГВ под влиянием орошения, а следовательно, нельзя подсчитать потери оросительных вод на инфильтрацию.

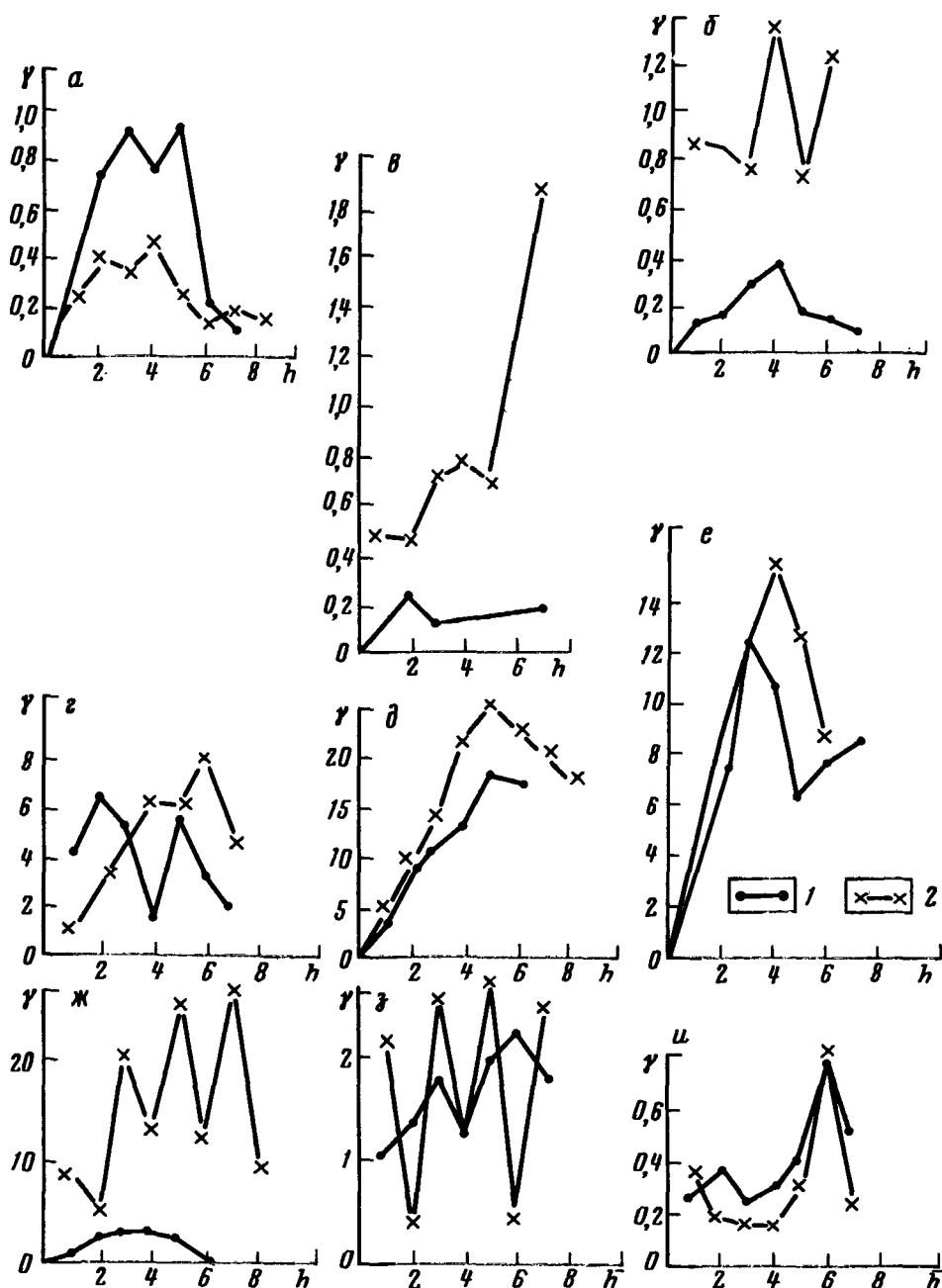


Рис. 65. Вариограммы всасывающего давления влаги на участке орошения люцерны дождевальной установкой "Фрегат" (совхоз "Семисотка" Крымской области);

а — 15 июня; б — 25 июля; в — 25 июля; г — 5 августа; д — 15 августа; е — 25 августа; ж — 10 сентября; з — 15 сентября; и — 25 сентября. 1 — направление север — юг; 2 — направление запад — восток

С целью практического внедрения методики и изучения режима всасывающего давления влаги в корнеобитаемой зоне в течение вегетационного периода на орошаемых землях совхоза им XXV съезда КПСС Киевской области было оборудовано две наблюдательные площадки.

Первая площадка располагалась на поле, где произрастала люцерна третьего года и работала дождевальная установка "Фрегат". В пределах поля по равномерной сетке с шагом около 40 м было установлено 15 почвенных тензиометров на глубину 0,45 м. Схема размещения датчиков была выбрана по соображениям равномерного охвата наблюдениями всей территории орошаемого круга. Наблюдения на этом участке проводились летом 1985 г.

Вторая наблюдательная площадка располагалась на поле, где выращивался клевер и работала дождевальная установка "Волжанка". На площадке было установлено 8 почвенных тензиометров с интервалом 20 м друг от друга. Линия, на которой располагались тензиометры, была ориентирована перпендикулярно к движению дождевальной установки. Глубина опробования была той же (0,45 м). Такое размещение датчиков было выбрано для изучения неравномерности полива вдоль плеча установки. Наблюдения на этой площадке охватили август 1985 г.

Орошаемый массив находится в пределах северо-западной окраины Киевского плато и представляет собой платообразную лёссовую равнину, расчлененную сетью балок и оврагов. По природным условиям территория орошаемого массива относится к лесостепной зоне.

С поверхности отложения представлены в основном лёссовыми супесями, изредка без видимого контакта, переходящими в легкие лёссовые суглинки. Эти две разности почти не отличаются друг от друга. Характерная черта их — единый генезис, но они различаются содержанием глинистых частиц. Лёссовые породы палево-желтые, иногда, в местах оголения, серовато-желто-коричневые. В суглинках ярко выражены макропористость и просадочность от замачивания при нагрузке (по СНиП II-12-74, второй тип просадочности). Мощность облессованных грунтов на изучаемой территории 6—10 м.

Первый от дневной поверхности водоносный горизонт находится в лёссовых породах, а также в нерасчлененных моренных и флювиогляциальных отложениях. Водоупором для него служат пестрые и красно-бурые глины. Разгрузка горизонта происходит в балки и реки Стутна и Красная. Колебания уровня грунтовых вод (амплитуда 0,4—0,6 м) согласуются с режимом выпадения атмосферных осадков. Мощность водоносного горизонта составляет 10—15 м. Воды гидрокарбонатные кальциево-магниевого, иногда сульфатного, кальциево-магниевого. Минерализация вод 0,5 г/л (иногда до 0,7 г/л), в отдельных пунктах воды ультрапресные. На участке орошения глубина залегания уровня грунтовых вод в основном изменяется от 5 до 8 м.

В блюдцеобразных понижениях наблюдается переувлажнение поверхности почвы. Средние значения коэффициента фильтрации для лёссовых супесей 0,7 м/сут, а для лёссовых легких суглинков 0,4 м/сут.

На территории массива преобладают типичные и типичные выщелоченные черноземы, а также лугово-черноземные почвы (на лессе). Мощность гумусовых горизонтов достигает 100 см, переходный к породе горизонт достигает глубины 140 см. Линия вскипания карбонатов находится на глубине 50–100 см. По механическому составу почвы легко-суглинистые, однородные.

Обычно в течение вегетационного периода многолетних трав назначается четыре полива с нормой примерно $350 \text{ м}^3/\text{га}$. Осенью задается влагозарядный полив с нормой $600 \text{ м}^3/\text{га}$.

На рис. 66 приведены графики изменения всасывающего давления влаги в почве в пределах корнеобитаемого слоя на первой наблюдательной

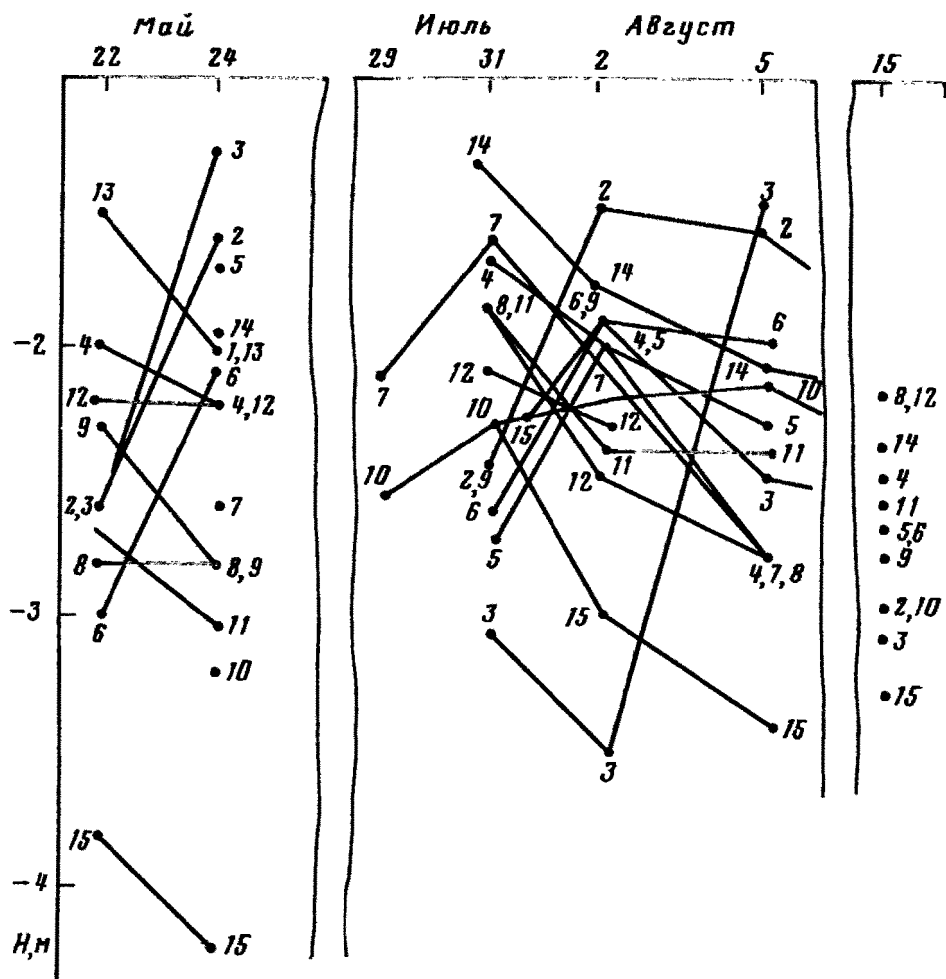


Рис. 66. Изменение всасывающего давления влаги в почве на участке орошения люцерны дождевальной установкой "Фрегат" (совхоз им. XXV съезда КПСС Киевской области).

Цифры у кривых — номера тензиометров

площадке. На первый взгляд, картина несколько хаотичная. Тем не менее в ней есть элементы закономерности, связанной с радиальностью действия установки "Фрегат". Например, в период с 22 по 24 мая в зоне увлажнения находились тензиометры 2, 3 и 6, а в зоне иссушения тензиометры 4, 9, 11, 13 и 15. По показаниям тензиометров 8 и 12 никаких изменений в содержании влаги в корнеобитаемой зоне не происходило. В период с 31 июля по 2 августа в зоне увлажнения находились тензиометры 2, 5, 6, 9 и 10, а в зоне иссушения — 3, 4, 7, 8, 11, 12, 14 и 15. Со 2 по 5 августа на всей территории поля отмечается иссушение корнеобитаемого слоя, ввиду отсутствия полива (в зону движения "Фрегата" попал тензиометр 3; скачок всасывающего давления в точке его заложения связан с потерей воды из установки).

В целом, можно отметить, что по данным замеров всасывающего давления влаги на первой наблюдательной площадке влажность корнеобитаемого слоя довольно высокая. Известно, что для многолетних кормовых трав нижняя граница значений всасывающего давления влаги, при которых возможна нормальная вегетация растений, менее —50 кПа. Режим орошения и погодные условия способствовали тому, что значения всасывающего давления редко опускались ниже —30 кПа. Следовательно, в корнеобитаемом слое в период вегетации люцерны влажность была на более высоком уровне, чем требовалось исходя из соображений экономичности орошения.

На рис. 67 приведены графики изменения всасывающего давления влаги в пределах корнеобитаемого слоя на второй наблюдательной площадке. Режим всасывающего давления здесь менее сложен, чем на первой площадке. Четко прослеживается характерная для одновременно увлажняемых территорий синхронность реакции датчиков на поливы (всплески 5 и 28 августа) и в период иссушения с 15 по 26 и с 28 по 31 августа. На этой площадке отмечены более низкие значения всасывающего давления, чем на первой площадке, что связано с особенностями фронтального полива установкой "Волжанка" и большими размерами поля, на котором размещалась наблюдательная площадка. Тем не менее минимальные отмеченные значения всасывающего давления влаги не перешли границы —37 кПа, что также свидетельствует о некотором переувлажнении корнеобитаемой зоны.

Статистическая обработка данных с применением параметрических методов статистики проводилась в такой последовательности: 1) оценка "сомнительных" значений с помощью *t*-критерия проверки резко выделяющихся наблюдений; 2) расчет среднего значения и стандартного отклонения, оценка стандартной погрешности среднего значения, точности определения среднего значения и коэффициента вариации для каждой выборки; 3) проверка нормального характера распределения значений всасывающего давления влаги путем использования совместного крите-

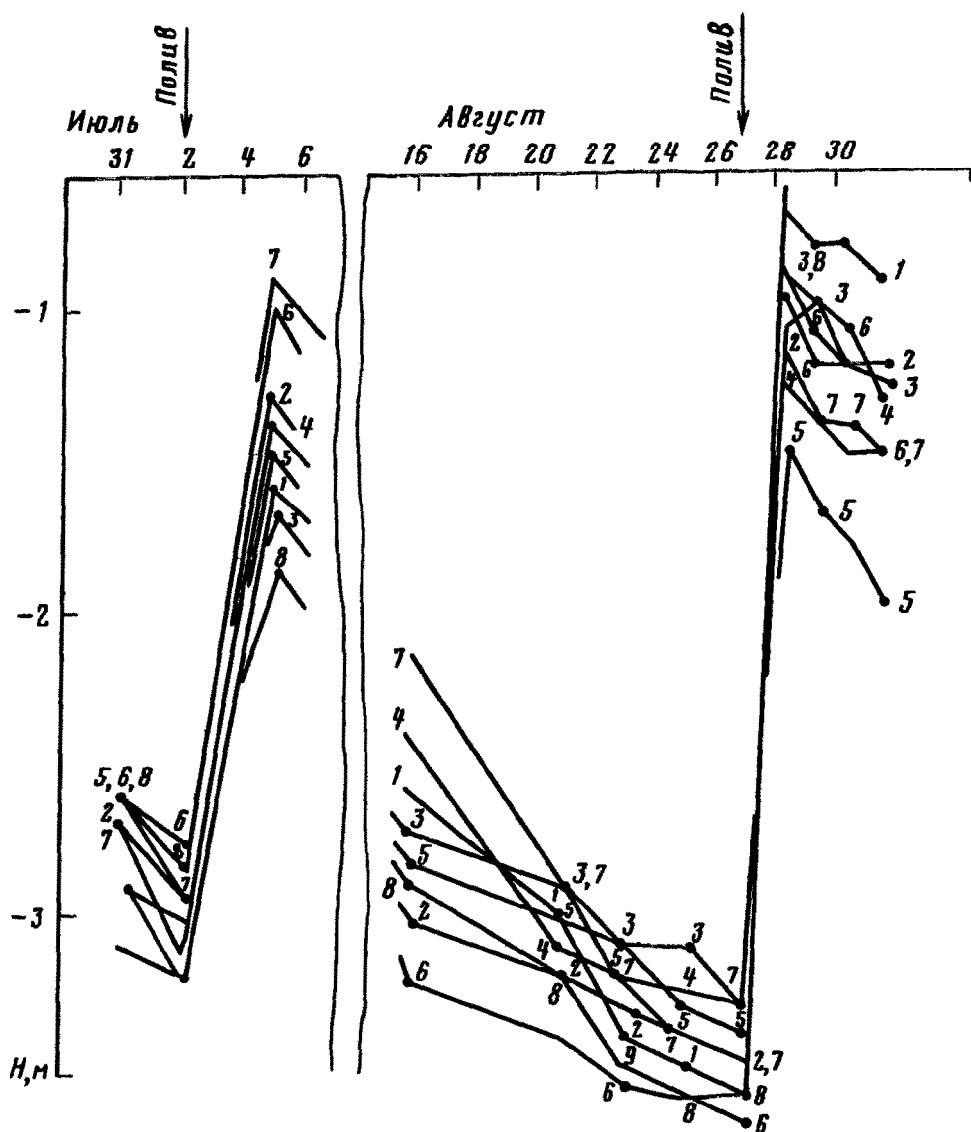


Рис. 67. Изменение всасывающего давления влаги в почве на участке орошения клевера дождевальной установкой "Волжанка" (совхоз им. XXV съезда КПСС Киевской области).

Цифры у кривых — номера тензиометров

рия среднего линейного отклонения значений выборки и коэффициента асимметрии выборки; 4) определение числа точек наблюдений, необходимого для достижения заданной точности среднего значения. Расчетные формулы приведены в работе [23], а результаты расчетов — в табл. 6.

Таблица 6. Статистические оценки данных (совхоз им. XXV съезда КПСС, Киевская область)

Дата	n	\bar{p} , м	S	$S_{\bar{p}}$	$S_{\bar{p}}$, %	CV , %	α	n	A	Число точек наблюдений
<i>Первая площадка</i>										
22.05*	10	-2,55	0,619	0,20	7,7	24,2	1,06	-0,287		20
24.05*	14	-2,25	0,559	0,15	6,7	24,2	0,95	-0,138		20
31.07*	13	-2,19	0,479	0,13	6,1	21,9	0,95	-0,108		15
2.08	13	-2,24	0,53	0,15	6,6	23,7	1,05	-0,97		18
5.08	13	-2,34	0,526	0,15	6,3	22,6	0,98	-0,29		16
15.08	12	-2,71	0,35	0,10	3,7	12,9	0,97	-0,03		5
<i>Вторая площадка</i>										
31.07	8	-2,76	0,184	0,065	2,4	6,7	0,9	-0,6		2
2.08*	8	-2,98	0,173	0,061	2,1	5,8	0,89	-0,08		2
5.08	8	-1,41	0,34	0,12	8,5	24	0,97	0,19		21
15.08	8	-2,71	0,348	0,12	4,5	12,8	0,99	0,34		6
20.08	8	-3,09	0,172	0,06	2,0	5,6	0,94	-0,46		1
22.08	8	-3,29	0,174	0,062	1,8	5,3	0,9	-0,25		1
24.08	8	-3,39	0,181	0,064	1,9	5,3	0,96	0,22		1
26.08	8	-3,49	0,146	0,052	1,5	4,2	0,94	+0,057		1
28.08*	8	-1,08	0,254	0,09	8,4	23,7	0,95	-0,198		20
29.08	8	-1,20	0,288	0,10	8,5	24,0	0,96	-0,31		21
30.08	8	-1,37	0,317	0,11	8,2	23,1	1,06	-0,57		19

* Дни поливов

В ходе формирования водного режима вариация значений всасывающего давления влаги в условиях поливов значительно выше, чем в межполивной период. Например, на первой наблюдательной площадке после поливов коэффициенты вариации выборок всасывающего давления влаги имеют значения порядка 21–24 %. То же отмечается и для второй наблюдательной площадки 5 августа. В остальное время значения коэффициентов вариации выборок изменяются в пределах 4–7 %.

Было установлено, что распределение значений всасывающего давления влаги в полевых условиях на одной глубине и в один момент времени с 90 %-ной доверительной вероятностью может быть описано нормальным распределением. Поэтому можно считать, что без какой-либо потери информативности в целом режим всасывающего давления на одной глубине допустимо характеризовать оценочными параметрами нормального распределения — выборочным средним значением и стандартным от-

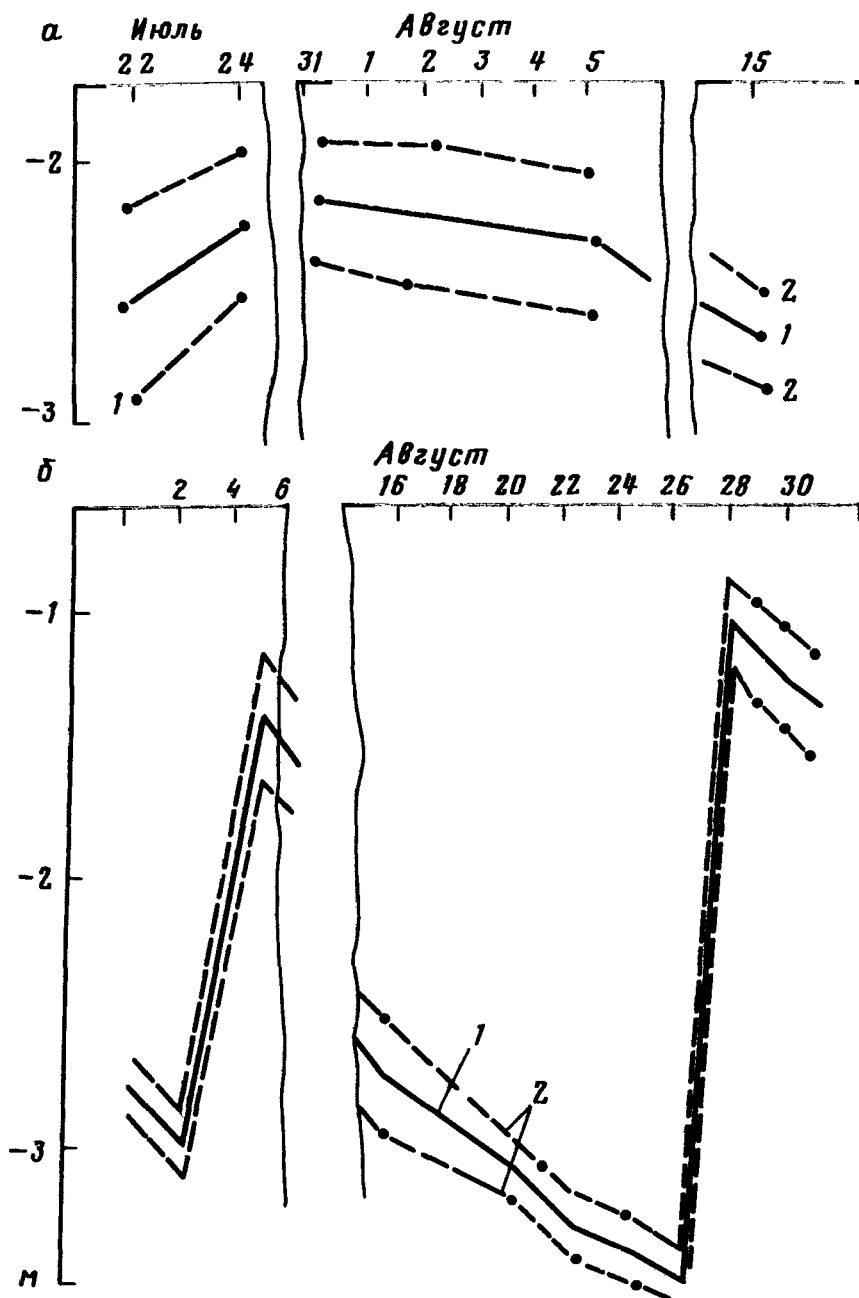


Рис. 68. Графики изменения средних значений (1) всасывающего давления влаги и их 90 %-ных доверительных пределов (2) на участках орошения дождевальными установками "Фрегат" (а) и "Волжанка" (б)

клонением, полученным по результатам сбора информации со всех точек наблюдений. Следовательно, графики всасывающего давления влаги, приведенные на рис. 66 и 67, можно заменить графиками их средних

значений с указанием доверительных пределов для средних значений на принятом уровне значимости. На рис. 68 приведены графики для данных, полученных на первой и второй наблюдательных площадках (принятый уровень значимости 10 %).

Исходя из нормального закона распределения значений всасывающего давления влаги рассчитывалось число точек наблюдений, необходимое для оценки среднего значения выборок с относительной погрешностью 10 %. Установлено, что для достижения заданной точности оценки этого параметра в условиях наблюдательных площадок требуется 15–20 точек. Следует также отметить, что точность определения средних значений выборок изменялась в пределах 2,5–8,5 %.

Проведенный с помощью критерия Бартлетта анализ оценок выборочных дисперсий показал, что для обеих площадок равенство дисперсий на уровне 10 %-ной значимости сохраняется на весь период наблюдений. Для выявления какой-либо регулярности в процессе перераспределения влаги на одной глубине корнеобитаемого слоя в условиях орошения, по данным наблюдений на первой площадке, были построены вариограммы всасывающего давления влаги. Из графиков вариограмм видно, что только в одном случае (рис. 69, в) отмечается определенная тенденция в вариации значений всасывающего давления влаги в зависимости от расстояния между точками наблюдения.

Хаотический характер остальных вариограмм позволяет сделать вывод, что случайные компоненты процесса влагопереноса преобладают и поэтому всасывающее давление влаги лучше всего рассматривать в качестве случайной величины. С этой предпосылкой собранные данные были проанализированы для выявления наличия тренда всасывающего давления влаги в пределах всего орошаемого поля (первая площадка) и линейного ряда тензиометров (вторая площадка). Расчеты проводились с применением программного калькулятора БЗ-34, ограниченность программной памяти которого не позволяет строить поверхности тренда более высокого порядка, чем линейная. Существенность тренда оценивалась по двум показателям — проценту изменчивости, которая учитывается линейной поверхностью, и F -критерию Фишера для соответствующего уровня значимости. Из общих рекомендаций по применению тренд-анализа следует, что если процент изменчивости, учитываемой тренд-поверхностью, превышает 90 %, а значение F -критерия в несколько раз выше критического его значения для принятого уровня значимости, то это свидетельствует о существенности тренда данного порядка.

Результаты тренд-анализа данных по первой площадке приведены в табл. 7, из которой видно, что в четырех случаях значения F -критерия не превышают его критического значения, а в двух случаях превышение очень незначительно. Процент изменчивости, учитываемый линейной поверхностью, также не дает оснований считать существенным линейный тренд всасывающего давления влаги в пределах исследуемого поля. Очевидно, следует использовать тренд-поверхность более высоких по-

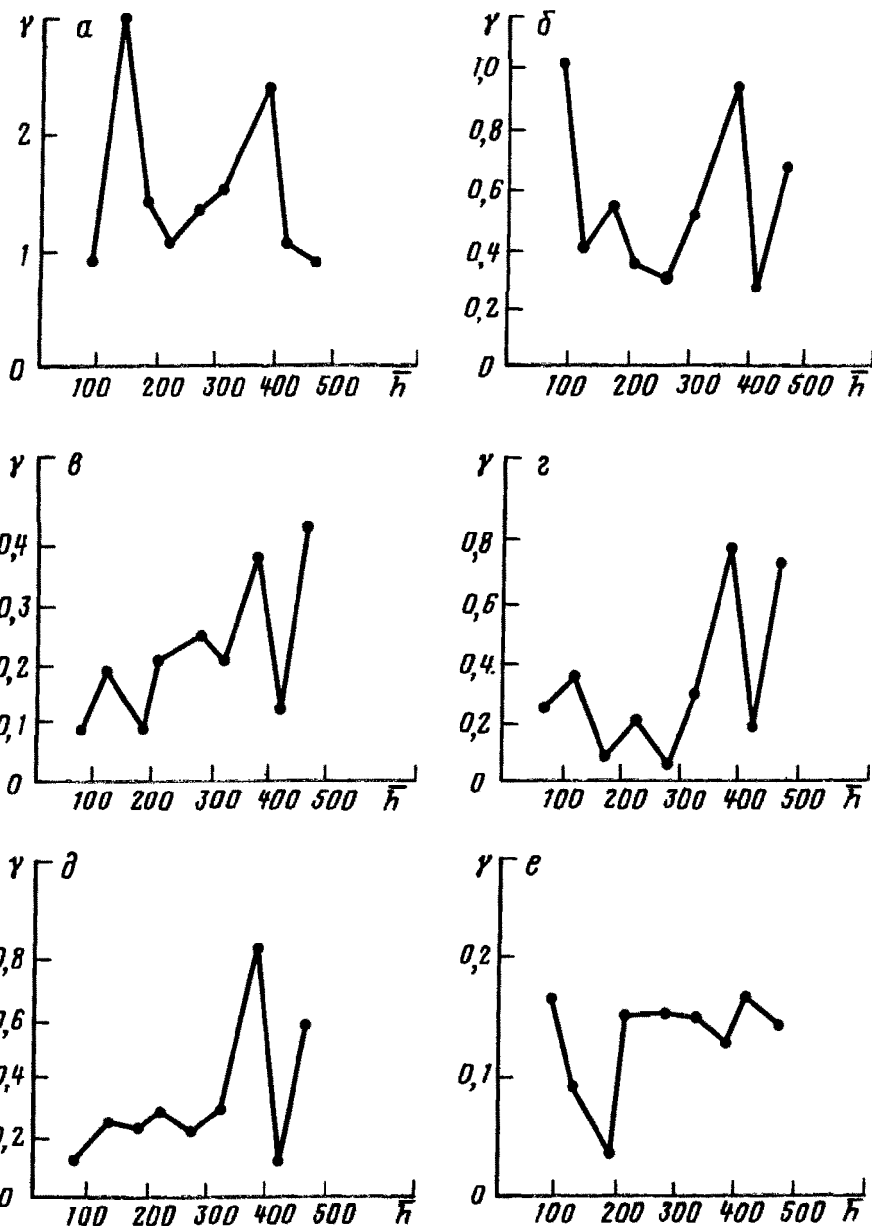


Рис. 69. Вариограммы всасывающего давления влаги на участке орошения люцерны дождевальной установкой "Фрегат" (совхоз им. XXV съезда КПСС Киевской области, 1985 г.):

а — 22 мая; б — 24 мая; в — 31 июля; г — 2 августа; д — 5 августа; е — 15 августа

Таблица 7. Результаты критериальной проверки существенности линейного тренда всасывающего давления влаги p в суглинистых почвах при орошении (Киевская область, 1985 г.)

Дата	Изменчивость p , %	Значение F -критерия	
		расчетное	критическое на уровне значимости 0,1
22.05	16,5	$\frac{0,69}{-}$	$\frac{3,26}{-}$
24.05	17,8	$\frac{1,19}{-}$	$\frac{2,86}{-}$
31.07	40,7	$\frac{3,42}{2,64}$	$\frac{2,94}{3,78}$
2.08	24,2	$\frac{1,59}{4,06}$	$\frac{2,94}{3,78}$
5.08	37,5	$\frac{2,99}{0,16}$	$\frac{2,94}{3,78}$
15.08	17,8	$\frac{0,97}{0,01}$	$\frac{3,00}{3,78}$

Примачание. В числителе приведены данные по первой (дождевальная установка "Фрегат"), а в знаменателе — по второй (дождевальная установка "Волжанка") наблюдательным площадкам.

рядков, что позволит установить места локальных флуктуаций всасывающего давления. Однако для практических целей получения результат можно интерпретировать стационарным характером пространственной изменчивости всасывающего давления и в качестве ее модели принять уравнение

$$p_i = \bar{p} + e_i, \quad (25)$$

где p_i — измеренное значение всасывающего давления влаги; \bar{p} — его математическое ожидание; e_i — случайная компонента.

Результаты тренд-анализа данных, собранных на второй наблюдательной площадке, приведены в табл. 7. Во всех случаях, кроме второго, значения F -критерия не превышают его критического значения. Только 2.08.1985 г. в результате действия каких-то факторов сложились условия, приведшие к возникновению тренда всасывающего давления в пре-

делах площадки. Для этого случая в качестве модели можно принять уравнение

$$p_j = \alpha_0 + \alpha_1 x + e_j, \quad (26)$$

где α_0 и α_1 — коэффициенты; x — координата точки. В остальных случаях в качестве модели следует принимать уравнение (25).

Таким образом, в результате проведенных работ и последующей обработки полученных данных можно утверждать, что на изученных опытных площадках имело место некоторое избыточное увлажнение корнеобитаемого слоя. Результатами этого могут быть быстрый подъем уровня грунтовых вод, подтопление и последующее снижение плодородия земель. Переувлажнение корнеобитаемого слоя было вызвано завышением оросительной и поливных норм, а также избытком атмосферных осадков летом 1985 г. Статистическая обработка данных свидетельствует, что всасывающее давление влаги следует рассматривать в качестве нормально распределенной величины (на уровне значимости 10 %). Для оперативного контроля водного режима корнеобитаемого слоя и оценки средних значений всасывающего давления влаги в пределах орошаемого поля с 10 %-ной точностью необходимо 15–20 точек наблюдений*, оборудованных почвенными тензиометрами. Это позволит на основе постоянно получаемой информации обоснованно назначать поливные нормы и время поливов. Тренд-анализом установлено, что в большинстве случаев всасывающее давление влаги в пределах наблюдательных площадок, расположенных на орошаемых полях, обладает стационарным характером пространственной изменчивости.

ГЛАВА 7

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА РАЗНЫХ ОБЪЕКТАХ

В гл. 2 описаны гидрофизические приборы, способы их установки и эксплуатации, рассмотрены рекомендации по применению гидрофизических наблюдений на орошаемых территориях. Однако гидрофизический метод наблюдений может быть успешно использован и на других объектах, на которых получаемая с его помощью информация позво-

* Число точек наблюдений для получения результатов с такой же точностью различно в разных природных условиях, например на юге Украины оно должно составлять 8–10 [23].

ляет обеспечить высокий, научно обоснованный, уровень проектирования и эксплуатации.

Необходимо подчеркнуть, что традиционную режимную сеть наблюдательных скважин на всех объектах целесообразно оборудовать пневматическими уровнемерами для измерения уровня грунтовых вод и глубинными пробоотборниками для отбора проб грунтовых вод и порового раствора. Применение их значительно упростит проведение наблюдений, сделает их более дешевыми (при более высокой информативности) главным образом за счет отказа от использования дорогих и дефицитных обсадных труб.

Установка почвенных и глубинных тензиометров и измерение всасывающего давления дает возможность получить информацию о динамике влаги в зоне аэрации, что невозможно при применении традиционных методов режимных наблюдений. Этим, собственно, и обусловлена эффективность использования гидрофизического метода наблюдений на разных объектах. Приступая к краткому изложению условий применения гидрофизического метода, заметим, что здесь не рассматриваются вопросы обработки данных наблюдений и интерпретации полученной информации, поскольку они в общем виде освещены ранее.

НАБЛЮДЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Водоснабжение, основанное на использовании грунтовых вод неглубокого залегания, широко применяется для обеспечения питьевой водой населенных пунктов, а также для снабжения технологической водой промышленных предприятий с "мокрым" циклом, для орошения земель и в других целях.

По гидрогеологическим условиям водозаборные сооружения разделяются на две группы: 1) инфильтрационные, располагающиеся в области питания водоносных горизонтов; 2) фильтрационные, которые размещаются в областях стока. Отдельно рассматриваются водозаборы, работающие в условиях искусственного восполнения запасов подземных вод, а также и в других особых гидрогеологических условиях, предназначенные для захвата грунтовых вод в линзах пресных вод. Если предполагается, что водозаборы будут использовать грунтовые воды неглубокого залегания, то при проведении гидрогеологических исследований велико значение режимных наблюдений, которые должны выявить условия питания и циркуляции грунтовых вод, в частности, долю площадного (инфильтрационного) питания. Большое значение приобретают также режимные наблюдения, выполняемые в процессе строительства и эксплуатации водозаборов.

Участки водозаборных сооружений следует рассматривать как природные опытные полигоны, где гидрогеолог по данным натурных исследований и анализа собранных материалов должен решать теоретические

и прикладные задачи, связанные с выбором рациональных условий эксплуатации водозаборов и защиты их от внешних загрязнений, с уточнением размеров и условий эксплуатации зон санитарной охраны водозаборов.

При организации режимных наблюдений важно правильно разместить сеть наблюдательных выработок. При решении этого вопроса следует учитывать: 1) граничные условия потока, в частности расположение контуров питания и стока водоносной системы (в том числе и возможное их изменение при эксплуатации водозабора), распределение величины площадного (инфильтрационного) питания в плане, а также расположение естественных и искусственных очагов загрязнения грунтовых вод; 2) фильтрационную неоднородность продуктивного водоносного горизонта; 3) сложность гидродинамических и гидрохимических условий потока в плане.

В различных правилах и инструкциях рассмотрены методы и способы проведения работ по изучению режима подземных вод при эксплуатации водозаборов. Основные методические принципы и многочисленные примеры приведены в монографиях [23—25].

Следует отметить, что при создании инфильтрационных береговых водозаборов режимная сеть размещается по одному-двум поперечникам, расположенным перпендикулярно к реке, и дополняется скважинами, размещенными в зонах санитарной охраны водозабора и по створу каптажных сооружений. Примерно такая же наблюдательная сеть и на системах искусственного восполнения подземных вод открытого типа с инфильтрационными бассейнами. При работе нескольких взаимодействующих фильтрационных водозаборов образуется сложная гидродинамическая сетка, которая еще более осложняется при наличии очагов промышленного загрязнения грунтовых вод.

Примеры сложных гидродинамических сеток фильтрации грунтовых вод в районах промышленных предприятий при действии нескольких водозаборов, приведены в работе [5]. Понятно, что в данном случае наблюдательная сеть должна быть разветвленной и сложной, и ее размещение требует специальной проработки.

При использовании гидрофизического метода наблюдений понятие "наблюдательная скважина" следует заменить термином "наблюдательная точка", который можно трактовать в более широком смысле. В зависимости от конкретных условий и требований наблюдательные точки следует оборудовать приборами для измерения уровня грунтовых вод, устройствами для отбора проб воды и разместить необходимое число тензиометров для замеров всасывающего давления в зоне аэрации (см. гл. 2). Именно такое понимание термина "наблюдательная точка" принято при последующем изложении.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ЗОНАХ ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ БАССЕЙНОВ

Гидрофизические наблюдения особенно эффективны в зонах инфильтрационных бассейнов, где они позволяют получить объективные данные о динамике влаги в процессе инфильтрации. В результате мы получаем не только количественную характеристику инфильтрационных расходов влаги по площади и глубине, но и конкретные данные о соотношении зон квазинасыщенного и ненасыщенного состояния грунтов ниже дна бассейна, о положении поверхности грунтовых вод, мощности кольматационной корки и слоя заиления, скорости инфильтрации, фильтрационных параметрах пород зоны аэрации и заиленного слоя и, что очень важно, об изменении этих характеристик во времени. Оперативный контроль в полевых условиях позволяет обоснованно принимать решения по регулированию режима.

Для проведения гидрофизических наблюдений целесообразно оборудовать не менее двух наблюдательных створов под прямым углом к длинной оси инфильтрационного бассейна и разместить наблюдательные точки в пределах бассейна и с двух сторон от него. На каждой точке ниже дна бассейна на разных глубинах (в соответствии с мощностью зоны аэрации) устанавливаются зонды тензиометров для измерения всасывающего давления. Для получения правильных показаний необходимо тщательно изолировать выводные трубки тензиометров под дном бассейна. Можно также установить зонды тензиометров в наклонные скважины, пробуренные под дном бассейна на разных глубинах из шурфов, размещенных вне бассейна.

По результатам измерения давления строят гидродинамические сетки фильтрации (ортогональные линии тока и линии равных напоров), на которых представлены гидродинамические элементы потока. Анализ серии таких сеток, соответствующих разным этапам развития инфильтрационного процесса, в сочетании с данными о состоянии грунтов позволяет решать задачи по управлению режимом эксплуатации инфильтрационных бассейнов.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В РАЙОНАХ ЛИНЗ ПРЕСНЫХ ВОД

Как известно, линзы пресных вод, пригодные для оборудования на них водозаборов, формируются в условиях аридного климата при наличии инфильтрационного питания (подтакрыные, лиманные, подпесчаные, островные и др.) или при линейном контуре питания (вдоль рек и каналов).

На линзах первого типа основная задача гидрофизических наблюдений заключается в выяснении условий их формирования. В этом случае при размещении тензиометров по площади необходимо учитывать разли-

чия в строении зоны аэрации в плане и разрезе, с тем, чтобы охватить наблюдениями типичные варианты геологического строения. Можно использовать устройства для экспериментального определения элементов водного баланса в зоне аэрации, в частности — величины расхода восходящего и нисходящего потоков влаги, которые устанавливаются прямыми замерами испарения с поверхности линзы и инфильтрационного питания. Применение устройств для отбора проб порового раствора позволяет регулярно производить массовое опробование подземных вод и систематически контролировать минерализацию раствора.

Обработка полученной информации позволит выбрать оптимальный тип водозабора, а на действующих системах — регулировать их эксплуатацию. Наблюдения на подканальных линзах рассмотрены ниже.

НАБЛЮДЕНИЯ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

Гидротехнические сооружения отличаются большим разнообразием типов и имеют различное назначение. Все они связаны с регулированием потока поверхностных вод и в определенной степени влияют на грунтовые воды. Именно поэтому гидрофизические наблюдения следует проводить в основном на эксплуатируемых гидротехнических сооружениях. Здесь мы рассмотрим методику проведения гидрофизических наблюдений на таких гидротехнических сооружениях, где их применение наиболее эффективно и необходимо.

Наблюдения на каналах

Каналы обычно подразделяются по назначению, режиму действия, конструкции и размерам. Они могут быть заложены в выемке, насыпи или полунасыпи-полувыемке. При эксплуатации канала всегда происходит фильтрация воды через его стенки и дно. Если уровень воды в канале превышает поверхность грунтовых вод, то в результате фильтрации воды из канала образуется вытянутый вдоль канала купол грунтовых вод, а на окружающих территориях в результате его растекания отмечается подъем УГВ. Если же уровень воды в канале располагается ниже естественной поверхности грунтовых вод, то канал дренирует грунтовые воды.

При поддержании постоянного уровня воды в канале поверхность грунтовых вод вблизи него стабилизируется и колеблется только вследствие изменения величин инфильтрационного питания или испарения. При колебаниях уровня воды в канале УГВ изменяется с некоторым запаздыванием во времени. Особенно резкие изменения режима грунтовых вод и водного режима зоны аэрации происходят при периодическом опорожнении и наполнении канала, которые сопровождаются растеканием, сработкой купола и его возобновлением. Поэтому особенно

тщательно наблюдения следует производить на ирригационных каналах периодического действия.

Основные задачи наблюдений — оценка фильтрационных потерь из канала, определение величин инфильтрационного питания и суммарного испарения, характеристика уровня режима грунтовых вод и водного режима в зоне канала. Все эти задачи можно решить с помощью гидрофизического метода.

Для установки гидрофизических приборов разбуриваются створы, перпендикулярные к трассе канала. Створы располагаются по трассе канала с учетом геоморфологических элементов, геологического строения, типов сечения канала и его крепления. Наблюдательные точки в пределах каждого створа размещаются по оси канала, в пределах его дна и откосов и на необходимое расстояние в стороны от канала. В каждой наблюдательной точке по глубине зоны аэрации устанавливаются тензиометры, пневматические уровнемеры и глубинные пробоотборники.

На каналах периодического действия зонды тензиометров следует закладывать на всю мощность образующегося подканального купола, чтобы изучать процессы его формирования и рассасывания в динамике. В каналах с облицовкой рекомендуется устанавливать зонды в наклонные скважины, пробуренные непосредственно под одеждой канала.

Во всех случаях, когда канал располагается в насыпи или полунасыпи-полувыемке, зонды следует размещать таким образом, чтобы была возможность следить за участками высачивания фильтрующихся вод на откосы. При расположении канала на косогоре, на речных террасах или при пересечении трассой канала оврагов, логов, закарстованных участков необходимо оборудовать дополнительные точки наблюдений для получения информации о возможных нарушениях устойчивости сечения канала или об образовании оползней в приканальной зоне.

Особенно важно правильно разместить зонды тензиометров при прокладке каналов в загипсованных грунтах, подверженных выщелачиванию или карстованию. Опыт проведения гидрофизических наблюдений в таких условиях пока недостаточен.

В каналах с земляным руслом, т. е. без крепления, целесообразно производить прямое измерение фильтрационных потерь. Для этого в ложе канала (на дне и на боковых стенках) устанавливают фильтромеры — металлические стаканы без дна, задавливаемые в грунт, устройством для измерения расхода воды.

Особые требования к наблюдениям предъявляются при расположении водозаборов вдоль канала. В этом случае наблюдательные створы следует продлить до пересечения с зоной каптажных сооружений, поскольку целью наблюдений будет изучение условий работы системы "канал — водозабор".

Методика гидрофизических наблюдений определяется назначением водозаборного сооружения. Если оно представляет собой приканальный дренаж, созданный для перехвата фильтрационного потока со сто-

роны канала и защиты территории от подпора грунтовых вод, то основное внимание следует уделить получению информации, позволяющей управлять работой дренажа, в частности, — выяснению роли суммарного испарения на участке между каналом и дренажом, определению эксплуатационных характеристик и параметров дренажа, а также выбору мер по снижению фильтрационных потерь из канала.

Если водозабор сооружается в аридных условиях для получения питьевой воды из подканальной линзы пресных вод, исследования сводятся к оценке условий возобновления запасов пресных вод устойчивости или увеличения его производительности.

Наблюдения в зоне водоемов периодического действия

К водоемам периодического действия относят водохранилища, используемые для аккумуляции поверхностных вод, многочисленные водорегулирующие сооружения промышленных и горнообогатительных предприятий (отстойники, хвосто- и шламохранилища, охладители), верховые бассейны гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС). Важный элемент сооружений этих типов — дамбы обвалования, обеспечивающие поддержание уровней воды, превышающих окружающую территорию. В таких дамбах целесообразно размещать аппаратуру для проведения гидрофизических наблюдений. Поскольку в шламо- и хвостохранилищах уровень воды постоянно повышается, приходится периодически увеличивать высоту дамб или емкостей, в которых периодически сбрасываются запасы. Наиболее характерны в этом отношении верховые бассейны ГАЭС, в которых по специальному графику ежесуточно производится полная сброска уровня, а затем заполнение водой до проектной отметки.

Изучение в таких дамбах и на прилегающей территории режима снижения и повышения УГВ, влагопереноса в зоне аэрации, а также выявление закономерностей этих процессов позволят более обоснованно проектировать сооружения. Информация, получаемая при наблюдениях, послужит основанием для оптимизации управления режимом работы таких сооружений.

Гидрофизические наблюдения на описанных объектах следует проводить по створам, оборудованным по радиусам (от дамб), которые намечаются в соответствии с рельефом поверхности, геологическим строением, типом сооружений и режимом их действия.

На створах оборудуется необходимое число наблюдательных точек с тензиометрами, пневматическими уровнемерами и пробоотборниками, а также с установками для прямого определения восходящего и нисходящего расходов влаги.

Если в водоеме находятся минерализованные или загрязненные стоки, следует обратить особое внимание на размещение глубинных пробоотборников, которые должны быть расположены на разных глу-

бинах в соответствии с предполагаемым изменением границ загрязнения грунтовых вод. В этих случаях створы рекомендуется продлить в направлении объектов, опасных с точки зрения загрязнения их токсичными стоками. Более подробные сведения о методике таких наблюдений приведены ниже.

Наблюдения на территориях горнодобывающих и горнообогачительных предприятий

На территориях горнодобывающих предприятий находится комплекс сооружений различного назначения. Кроме карьеров и шахт, разрабатывающих полезное ископаемое, здесь обычно размещаются водохранилища, водозаборы подземных вод и очистные сооружения, жилые поселки, промышленные предприятия. При разработке железных руд и других ископаемых, требующих обогащения, добавляются сооружения горнообогачительного назначения: гидрозолоотвалы, хвосто- и шламохранилища и др.

Воздействие этих сооружений на геологическую среду весьма существенно и различно. Наибольшее влияние оказывают карьеры и шахты. Откачка подземных вод при разработке месторождений приводит к перестройке водного режима, полному истощению водоносных горизонтов в зоне горных выработок и образованию мощных депрессионных воронок. О масштабах таких изменений можно судить по тому, что уже сейчас уголь и руды открытым способом добывают с глубин 400–500 м, а шахтным способом — с глубин до 2000 м; в ближайшем будущем эти глубины будут превышены.

В результате фильтрационных потерь из водохранилищ и хранилищ жидких отходов происходит подпор грунтовых вод, а вследствие разнонаправленных воздействий на территории горных разработок формируются разветвленные потоки грунтовых вод.

Техногенные воздействия способствуют развитию биохимических и физико-химических процессов в откачиваемых и технологических водах, в результате чего подземные воды загрязняются, возрастает их минерализация. Если на территории расположены химические, бумагоделательные или пищевые предприятия, то в грунтовые воды могут попадать токсичные загрязнители. Нередко происходят загрязнение поверхностных вод, заболачивание и засоление территорий, развиваются процессы карстообразования, образуются оползни и обвалы, а на застроенных территориях — самоподтопление.

В целом в районах с горнорудным производством под влиянием техногенных воздействий складывается сложная гидрогеологическая и инженерно-геологическая обстановка. Естественно, что для ее изучения и обоснования эффективных мероприятий по охране геологической среды необходимо проведение режимных наблюдений.

Современные представления о природе гидрогеологических процессов позволяют утверждать, что влияние техногенных факторов на гидрохимические и гидродинамические условия фильтрации воды непосредственно сказывается в зоне аэрации и в первом от поверхности водоносном горизонте, и лишь опосредствованно — в напорных водоносных горизонтах. В то же время, при строительстве и эксплуатации горных выработок, главным образом разрезов и карьеров, вскрываются и дренируются глубокие водоносные горизонты, усиливается их влияние на грунтовые воды, а в пределах выемок напорные воды становятся безнапорными — все это осложняет проведение осушительных мероприятий. В этих условиях режимные наблюдения обычно направлены на выработку рекомендаций: 1) по управлению процессами осушения месторождения и обеспечению оптимальных гидрогеологических условий его разработки; 2) по управлению ресурсами и качеством подземных вод в районе и защите их от истощения и загрязнения.

Наблюдения при строительстве и эксплуатации карьеров

Одновременно со вскрытием месторождения разрезом (или стволами шахт) начинаются режимные наблюдения с помощью специально оборудованной региональной сети скважин. В каждом отдельном случае необходимо решить вопрос о целесообразности оборудования этих скважин пневматическими уровнемерами и глубинными пробоотборниками.

Весьма полезную информацию о гидрогеологических процессах, развивающихся непосредственно в выемках разрезов и карьеров, дают локальные системы наблюдательных скважин, размещенных непосредственно на уступах и откосах карьеров. При таких локальных наблюдениях следует размещать на створах или по площади тензиометры и другие устройства.

Локальные наблюдательные створы обычно располагают на рабочих (вскрышных) откосах карьеров и на откосах внутренних отвалов. Тензиометрические наблюдения на откосах дают информацию о степени осушенности пород и об участке высачивания грунтовых вод на откосе, позволяют установить необходимость проведения дополнительных мероприятий по дренированию откоса для предохранения его от развития фильтрационных деформаций и оползней.

Наблюдения в выработанном пространстве и в основании внутренних отвалов дают информацию о восстановлении напоров подземных вод после ликвидации дренажных устройств при отработке полезного ископаемого и увлажнении отвальных пород в результате инфильтрации осадков. Руководствуясь этими данными, можно решить вопрос о необходимости дренажа в основании отвалов.

Известно, что разработка и транспорт влажной горной массы гораздо сложнее, чем сухой, сложнее и использование влажных горючих ископаемых (например, бурого угля). При помощи почвенных тензиометров легко контролировать влажность пород в массиве. Наконец, информация о водном режиме отработанных карьеров необходима для решения вопросов об их использовании в качестве водоемов, для промышленного строительства и земледелия на основе рекультивации почвы; такая информация необходима также для решения вопроса охраны подземных вод от загрязнения.

Во всех перечисленных случаях гидрофизические наблюдения кратковременны или проводятся эпизодически. При простоте и мобильности соответствующих технических средств они являются эффективным средством управления эксплуатацией основных сооружений горного предприятия.

Наблюдения за процессами загрязнения грунтовых вод

При разработке полезных ископаемых нередко происходит загрязнение грунтовых и поверхностных вод, меняется гидрохимия природных систем. Следует подчеркнуть, что механизм миграции и трансформации первичных загрязнителей в системе "горные породы — вода" изучен недостаточно, поэтому соответствующим наблюдениям необходимо уделять большое внимание.

Источниками загрязнений служат хвосто- и шламохранилища, в которые поступает вода с высокой минерализацией, и нередко с токсичными соединениями, что обусловлено ее длительным контактом с горными породами при "мокром" обогащении ископаемого и других технологических процессах.

Гидрогеологические наблюдения с позиций охраны водоносных комплексов от загрязнения должны выполнять две функции: 1) контрольную, связанную с обнаружением источников загрязнения и оперативным прекращением распространения загрязнений; 2) экспериментальную, сводящуюся к изучению процессов миграции загрязнителей.

При размещении наблюдательной сети следует обратить особое внимание на зоны, примыкающие к участкам потенциального загрязнения. Тензиометры и пневматические уровнемеры здесь следует устанавливать так, чтобы выявить места наиболее интенсивных утечек из водоема; наблюдательные точки надо оборудовать на створах, проходящих по дну и откосам водоема. Для прямого определения инфильтрационного расхода на отдельных участках бассейна применяют инфильтромеры различных конструкций. Используя результаты измерения напоров вблизи береговой линии бассейна, можно построить карты гидроизогипс, которые дадут гидродинамическую картину, позволяющую

уточнить расположение наблюдательных точек в направлении разгрузки грунтового потока.

Если источник загрязнения одновременно является и мощным источником фильтрационного потока, то смешение загрязненных и пластовых вод происходит вблизи фронта вытеснения, а сам процесс резко нестационарен. Изучение такого источника требует детального временного прослеживания по выделенным основным направлениям — лучам, отходящим от источника загрязнения и замыкающимся на охраняемых объектах. Если расход естественного фильтрационного потока заметно превышает интенсивность инфильтрации из источника загрязнения, то наблюдательные точки целесообразно располагать по сеткам [14, 16].

Изучение процессов формирования ореолов загрязнения требует строгого гидрогеохимического контроля, в том числе отбора проб воды глубинными пробоотборниками для химического анализа.

НАБЛЮДЕНИЯ НА ЗАСТРОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

На застроенных территориях развивается особый водный режим — самоподтопление. Иногда подтопление обусловлено воздействием естественных процессов, например интенсивным развитием размыва и отложения минеральных частиц в балках, речных долинах или руслах рек, в результате чего могут значительно ухудшаться условия разгрузки грунтовых вод и подпор распространяется на значительные территории. Однако главная причина, вызывающая самоподтопление — техногенное воздействие, которое определяется типами и особенностями размещения на территории жилых, коммунальных, промышленных и других сооружений.

В городах самоподтопление обусловлено уменьшением испарения на застроенных и асфальтированных площадях, фильтрационными потерями на увлажняемых внутриквартальных участках (газоны, парки и др.), нарушением условий поверхностного стока атмосферных вод при инженерных планировках, утечками из водопроводных и других водонесущих сетей, из рекреационных водоемов. Резко ухудшает обстановку наличие вблизи застроенной территории гидрохимических сооружений, предприятий с “мокрым” технологическим процессом (ТЭЦ, молокозаводы, мясокомбинаты, гаражи и др.). Особенно опасны промышленные предприятия с хранилищами отходов, складами горючих и химических веществ, так как кроме фильтрационных потерь на их территории может происходить и химическое загрязнение.

Эксплуатация энергетических объектов (ТЭЦ, ТЭС), а также предприятий коммунального хозяйства (бани, прачечные) иногда приводит к тепловому загрязнению грунтовых вод. Изменение теплового режима в пределах промышленных зданий, площадь которых может достигать

десятков гектаров, способствует образованию в зоне аэрации особого теплового режима, в результате под зданиями (и асфальтированными площадями) накапливается влага за счет переноса и конденсации.

В пределах сельских населенных пунктов появляются дополнительные источники инфильтрационных потерь, поскольку создание централизованного водоснабжения не всегда сопровождается прокладкой канализационной сети, ливневые и сточные воды сбрасываются через поглощающие скважины и ямы в грунтовые водоносные горизонты, производятся поливы приусадебных участков, эксплуатация молокозаводов, скотоводческих ферм и других подобных объектов.

Барражный эффект на трассах коллекторов и трубопроводов, заглупление подземных частей некоторых сооружений ниже уровня грунтовых вод и засыпка оврагов также способствуют развитию подпора грунтовых вод.

Таким образом, на застроенных территориях формируются сложные гидрогеологические процессы, называемые самоподтоплением, закономерности которого изучены пока недостаточно, поэтому имеются все основания для проведения здесь гидрофизических наблюдений.

Наблюдательные точки целесообразно располагать по нескольким региональным профилям, ориентированным по длинной оси населенного пункта и нормально к ней, оснащая их всеми описанными выше приборами. Система региональных профилей должна проходить через депрессионные воронки и купола грунтовых вод, формирующиеся под влиянием водозаборов. Для изучения источников подтопления и загрязнения, не попавших на региональные профили, создаются дополнительные локальные створы в соответствии с приведенными ранее рекомендациями.

На створах, приуроченных к возможным источникам теплового загрязнения грунтовых вод или зоны аэрации, следует наряду с гидрофизическими наблюдениями проводить измерения температуры [33]. Информация о наличии температурных градиентов по вертикальной и горизонтальным координатам позволит судить о реальности перемещения тепловых потоков, о предполагаемых фазовых переходах влаги и оценить роль температурных градиентов в горизонтальных перемещениях в жидком и парообразном состояниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов С.Ф. Борьба с засолением орошаемых земель. М., Колос, 1978.
2. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Основы моделирования и первичная обработка данных. М., Финансы и статистика, 1983.
3. Бадоев В.В. Основные этапы развития и современные представления об инфильтрации из шурфов. — Сов. геология, 1975, № 4, с. 80—88.
4. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М., Наука, 1983.
5. Бочеввер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е. Защита подземных вод от загрязнения. М., Недра, 1979.
6. Буряков В.Я. Изучение проницаемости песчано-глинистых отложений в зоне аэрации. Автореф. канд. дис., 1978.
7. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород / Под ред. Н.Н. Веригина — М., Недра, 1977.
8. Глобус А.М. Экспериментальная гидрофизика почв. Л., Гидрометеоздат, 1969.
9. Давид М. Геостатические методы при оценке запасов руд. Л., Недра, 1980.
10. Дзекунов Н.Е., Солопенко В.М., Файбишенко Б.А. К обоснованию методики определения гидрофизических параметров в пористых средах. — Докл. АН УССР, сер. А., 1984, № 7, с. 36—40.
11. Изотермическое передвижение влаги в зоне аэрации / Под ред. С.Ф. Аверьянова — Л., Гидрометеоздат, 1972.
12. Кац Д.М., Шестаков В.М. Мелиоративная гидрогеология. М., Изд-во МГУ, 1981.
13. Метод контроля и прогноза водного режима орошаемых земель. Информационный листок о научно-техническом достижении № 83-162. Киевское отд. УкрНИИНТИ, 1983.
14. Методические рекомендации по гидрогеологическим исследованиям и прогнозам для контроля за охраной подземных вод / Сост. В.М. Гольдберг — М., 1980, (ВСЕГИНГЕО).
15. Методические указания по статистической обработке экспериментальных данных в мелиорации и почвоведении. Л., 1977, (СевНИИГиМ).
16. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Ушаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах (опыт гидрогеологических исследований). Л., Недра, 1980.
17. Муромцев Н.А. Использование тензиометров в гидрофизике почв. Л., Гидрометеоздат, 1979.
18. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Энерго- и массообмен в системе растение — почва — воздух. Л., Гидрометеоздат, 1976.
19. Основы гидрогеологических расчетов / Ф.М. Бочеввер, И.В. Гармонов, А.В. Лебедев, В.М. Шестаков — М., Недра, 1969.
20. Основные закономерности процесса увлажнения грунтов зоны аэрации новоорошаемых земель по данным гидрофизических наблюдений / И.Е. Жернов, Н.Н. Муромцев, Н.Е. Дзекунов и др. — Гидрогеологические и инженерно-геологические изыскания для мелиоративного строительства, 1976, вып. 18, с. 55—68.
21. Опытнo-фильтрационные работы / Под ред. В.М. Шестакова и Д.М. Башкатова. — М., Недра, 1974.
22. Пашковский И.С. Методы определения инфильтрационного питания по расчетам влагопереноса в зоне аэрации. М., Изд-во МГУ, 1973.
23. Плотников Н.И. Эксплуатационная разведка подземных вод. М., Недра, 1979.
24. Плотников Н.А. Проектирование систем искусственного восполнения подземных вод для водоснабжения. М., Стройиздат, 1983.

25. *Поиски, разведка, оценка запасов и эксплуатация линз пресных вод* / В.Д. Бабушкин, И.С. Глазунов, В.М. Гольдберг и др. — М., Недра, 1969.
26. *Родс А.А.* Основы учения о почвенной влаге. Т. I. Гидрометеорологическое издательство, 1965.
27. *Ситников А.Б.* Динамика воды в наанасыщенных и насыщенных грунтах зоны езации. Киев. Наук. думка, 1978.
28. *Судницын И.И.* Движение почвенной влаги и водопотребление растений. М., Изд-во МГУ, 1979.
29. *Устрицев О.Г.* Исследования фильтрационных характеристик необходимых горных пород нагнетанием воздуха в скважины при инженерных изысканиях для гидротехнического строительства. Автореф. канд. дис, 1972.
30. *Файбишенко Б.А.* Водно-солевой режим грунтов при орошении. М., Колос, 1986.
31. *Файбишенко Б.А.* Влияние заземленного воздуха на водопроницаемость грунтов (Теория и эксперимент). — Водные ресурсы, 1984, с. 48—60.
32. *Фрид Ж.* Загрязнение подземных вод. М., Недра, 1981.
33. *Фролов Н.М.* Гидрогеотермия. М., Недра, 1976.
34. *Шестаков В.М., Пашковский И.С., Соффер А.М.* Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. М., Недра, 1982.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Физико-математические основы исследований водного режима в ненасыщенно-насыщенных грунтах.	6
Глава 2. Методы полевых исследований	13
Состав и особенности наблюдений.	13
Гидрофизические приборы и измерения.	14
Измерение всасывающего давления влаги сборными почвенными и глубинными тензиометрами.	16
Контроль всасывающего давления в почвенном слое	19
Измерение уровня грунтовых вод пневматическим уровнемером	21
Отбор проб порового раствора глубинным пробоотборником	22
Монтаж и установка приборов	23
Почвенные тензиометры.	23
Глубинные тензиометры.	24
Уровнемеры и пробоотборники	28
Оценка точности и информативности наблюдений	28
Достоверность измерения всасывающего давления влаги почвенными и глубинными тензиометрами	28
Особенности формирования водного режима грунтов зоны аэрации в условиях орошения (Керченский п-ов)	36
Принципы организации режимно-балансовых наблюдений	49
Глава 3. Определение коэффициента фильтрации исходно ненасыщенных грунтов	58
Методы определения водопроницаемости неводоносных грунтов	58
Налив воды в шурфы и кольца.	58
Налив воды в котлован	62
Налив (нагнетание) воды в скважины	64
Налив воды на слабопроницаемый слой	65
Нагнетение воздуха в скважины	66
Геотермические методы	66
Лабораторные методы определения фильтрационных параметров	67
Экспериментальные исследования фильтрации в исходно ненасыщенных грунтах	68
Методика экспериментальных исследований	68
Влияние свойств воды на процесс фильтрации	70
Влияние эффективной пористости на водопроницаемость грунта.	77
Влияние заземленного воздуха	81
Специальные опыты по определению коэффициента фильтрации на монолитах грунта	88
Влияние вакуумирования монолита.	89
Влияние нестационарности фильтрации.	90
Определение коэффициента фильтрации с учетом гистерезиса	91
Требования к методике проведения испытаний и обоснование расчетной схемы	91
Определение коэффициента фильтрации в полевых условиях на больших монолитах	92
Определение коэффициента фильтрации в лабораторных условиях экспрессным методом	94
Глава 4. Определение гидрофизических параметров грунта	97
Эмпирические и полуэмпирические зависимости коэффициента влагопере-	

носа и влажности от всасывающего давления влаги	98
Экспериментальные методы определения гидрофизических параметров	100
Методы определения гидрофизических параметров грунтов с учетом гистерезиса	107
Экспериментальное обоснование рекомендуемых методов определения гидрофизических параметров грунтов	113
Применение данных о зависимости между влажностью и всасывающим давлением влаги для оценки естественной неоднородности грунтов.	133
Глава 5. Обработка результатов наблюдений и расчеты элементов водного баланса грунтов зоны аэрации	139
Расчеты единичного расхода (скорости) потока влаги в зоне аэрации	140
Расчеты влажности грунтов и запасов влаги.	141
Экспериментальные определения единичного расхода потока влаги в зоне аэрации и инфильтрационного питания.	142
Экспериментальное определение элементов водного баланса	144
Анализ изменения водного режима грунтов с применением вероятностно-статистических методов	146
Глава 6. Применение гидрофизического метода для оценки водного режима почв в связи с его регулированием при орошении	150
Глава 7. Методика проведения гидрофизических наблюдений на различных объектах	162
Наблюдения на объектах водоснабжения	163
Специальные наблюдения в зонах инфильтрационных бассейнов	165
Специальные наблюдения в районах линз пресных вод	165
Наблюдения на гидротехнических сооружениях	166
Наблюдения на каналах	166
Наблюдения в зоне водоамов периодического действия	168
Наблюдения на территориях горнодобывающих и горнообогатительных предприятий	169
Наблюдения при строительстве и эксплуатации карьеров.	170
Наблюдения за процессами загрязнения грунтовых вод	171
Наблюдения на застроенных территориях	172
Список литературы	174