

А. Б. Ситников

ХАРАКТЕРНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИИ В ГРУНТАХ

Розглянуті основні закономірності спільного врахування нелінійного за параметрами вологопереносу у ненасичених та фільтрації в насичених водою ґрунтах на основі численних прогнозних розв'язків при стаціонарній та несталому одномірному, профільному та віссиметричному рухах з урахуванням різного роду граничних умов, різних початкових умов, внутрішніх джерел вологозмін, а також конфігурації об'єкта вивчення. Виявлені цікаві особливості прогнозних змін витрат вологи, так званої висоти височування, усмоктуючих тисків, об'ємних вологовмістів. По суті, імітувалась дія різного виду водозбірних та наливних споруд у різних типових природно-техногенних умовах.

Demonstrates the main regularities with the consideration of non-linear to the parameters moisture transfer into soils undersaturated by water and filtration in saturated ones of different types based on the numerous projected solutions under stationary process and instable one-dimensional, profile, and axisymmetric movement with the different types of the boundary conditions, the different initial conditions, intrinsic sources of moisture changes as well as the configuration of the object studied. The interesting peculiarities of the projected changes of moisture consumption as seepage height, suction pressure, and volumetric moisture content are revealed. In fact the activities of different kinds of water intake and water filling structures into the various typical natural — anthropogenic conditions are simulated.

В предыдущих статьях "Геологического журнала" [4, 6] нами были освещены методические основы и особенности математического моделирования на цифровых машинах, точнее, решение прогнозных задач по одновременному учету стационарного и неустановившегося нелинейного влагопереноса и фильтрации в неоднородных ненасыщенно-насыщенных почвогрунтах при наличии одно-, двухмерного и осесимметричного движения, а также начальных и граничных условий I, II и III родов. Целенаправленным решением многочисленных задач обоснованы расчетные явные итерационные формулы, их устойчивость и вычисленная сходимость к принятому конечноразностному решению при заданном количестве итерационных действий. Особое внимание уделено учету трех видов граничных условий III рода, предусматривающих одновременный учет I рода (функции Φ) и II рода — удельного расхода (q), которые позволяют определить так называемую высоту высачивания с учетом испарения или конденсации влаги на вертикальной или наклонной границах грунт — воздух, а также оценить влияние отдельных частей изучаемой среды со сложным характером движения с помощью ме-

тогда так называемых дополнительных сопротивлений, основанного на известных аналитическом или эмпирическом функциональном описаниях этих частей. Принцип дополнительных сопротивлений широко внедрил в гидрогеологию В. М. Шестаков [7].

Классическая гидрогеология в большинстве случаев при прогнозной оценке водного состояния грунтов пользуется законом Дарси и предпосылкой Дюпюи [1—3, 5—7], предусматривающей для так называемой безнапорной фильтрации грунтовых вод первого от поверхности водоносного горизонта отсутствие вертикальной фильтрации и влагопереноса в ненасыщенных грунтах. Многочисленные существующие формулы расчета расходов и прогнозных уровней грунтовых вод, основанные на этих предпосылках, когда толщина водного слоя совпадает с уровнем подземных вод, являются достаточно надежными в региональных исследованиях, при которых длина фильтрующего объекта составляет от одного до трех его толщин, точнее, по гидрогеологической терминологии мощности безнапорного горизонта. В то же время вблизи зоны разгрузки грунтовых вод обязательно надо доказывать правомочность указанных предпосылок, применяемых расчетных исходных

© А. Б. Ситников, 2010

параметров (коэффициентов водоотдачи и уровнепроводности), а также роли высот высачивания. При этом линейный закон фильтрации Дарси может быть нарушен не только нелинейностью исходных параметров, а также нелинейностью градиента напорной функции, определяющей фильтрацию, но и в результате временной и скоростной инерционностей, проявлением разного вида вязкостей водной среды, наконец, явлениями турбулентности [5].

Напомним, что было выполнено около 400 прогнозных задач с характерными, в частности реальными для Украины, параметрами исследуемого (10x10x1 м) объекта (его конфигурацией, расходными статьями, начальными и граничными условиями, нелинейными параметрами влагопереноса разных типов грунтов: песков, глин, суглинков). Результаты решений отражены в таблицах и специальных графиках прогнозных значений расходов, гидрофизических функций, всасывающих давлений, объемных влагосодержаний. Несомненно, их значения для удобства записи округлялись, хотя вычисления предусматривали точность до 7 значащих цифр после запятой.

Удалось, наряду с важными методическими выводами [6], выявить ряд интересных закономерностей нелинейного влагопереноса в ненасыщенно-насыщенных грунтах приповерхностной зоны аэрации, подтвердив эффективность рекомендуемого математического моделирования для решения современных проблемных научно-производственных вопросов.

Прежде всего это относится к недостаточно изученной **высоте высачивания**, которую, как и другие прогнозные характеристики, можно определять с любой заданной точностью, согласовывая с достоверностью исходных для прогнозирования данных. Под достоверностью понимаем соблюдение некоторых принципиальных признаков: однозначная физико-химическая суть, детерминизм (100%-ная вероятность), компетентный объем (время), контролируемость вычислительных операций либо известная погрешность опытных определений или функциональных зависимостей. Несомненно, в стационаре при уменьшении одинакового пространственного шага методическая точность соответствующего

конечноразностного решения увеличивается. Поэтому расчетная сетка 10x10 по сравнению с сеткой 20x20 при уменьшенном в 2 раза шаге более точна.

Есть смысл кратко упомянуть об известных ранее выполненных исследованиях. Высоту высачивания рассматривали как результат специфического вытекания воды из грунта при фильтрации на вертикальной стенке воздух — грунт. Логически приняв в виде граничного условия в местах вытока напорную функцию, равной координате z , а выше высоты высачивания расход влаги, равным нулю, П. Я. Полубаринова-Кочина [3] рассчитала ее в случае стационара для квадратной перемычки единичного сечения. Она составила около 2,7 для квадратной перемычки (7x7 м). Наши исследования на аналоговой вычислительной машине с таким же шагом расчетной сетки дали значения 3,5 м при наличии не только фильтрации, но и нелинейного влагопереноса в недонасыщенном влагой грунте [5]. Кроме того, мы провели определенные натурные исследования, замерив всасывающее давление в зоне предполагаемого высачивания на грунтовых стенках опытных шурфов и канав. Оказалось, что визуально наблюдаемая поверхностная смоченная зона повсеместно характеризовалась отрицательными поровыми всасывающими давлениями, а наблюдаемая смоченность обычно объяснялась оптическим эффектом. Только небольшую, обычно не свыше десятка сантиметров нижнюю часть можно было признать

зоной высачивания, где $\frac{P_{вс}}{\gamma_p} \approx 0$. Кстати, изо-

ляция указанной зоны смачивания вследствие испарения солнечного воздействия резко ее увеличивала, что указывало на возможность испарения (конденсации), а неравенство влагообмена имело нулевое значение. Интересно, что при вытоке воды на стенке грунт — воздух наблюдался эффект выпуклой капли, препятствующий этому вытоку, т. е. всасывающее давление должно быть несколько большим, чем нуль. Возникла необходимость переосмысления наблюдаемых эффектов. Тем более у специалистов по осушению карьеров для добычи полезных ископаемых появилась потребность в оценке влажности грунтов при их

транспортировке, так как даже незначительное увеличение их влажности приводило к удорожанию автомобильного вывоза грунтов из карьера. Все ранее сказанное потребовало уделить высоте высачивания особое внимание при осуществляемом математическом моделировании влагопереноса и фильтрации.

Итак, оказалось, что тип грунтов (пески, суглинки, глины), точнее, их обобщенные нелинейные коэффициенты влагопереноса с учетом фильтрации, а также начальные условия при установившемся движении ($t = \infty$) не оказывают воздействия на высоту высачивания при одинаковом размере и граничном условии I рода на противоположной границе изучаемого грунтового объекта. Для квадратной переемычки (10x10 м), граничном условии 10,0 м на правой границе профильной задачи при стационаре эта высота высачивания составляет 3,95 (сетка 40x40) и 4,18 м (сетка 20x20), а одинаковые суммарные входящие и выходящие из системы расходы равны для испытуемых песков 26,2, для суглинков 2,57, для глин 0,053 м³/м·сут (табл. 1).

Особенно значительно увеличилась при стационаре и во времени до 8,0 м высота высачивания на наклонной (угол 45°) левой границе переемычки "грунт — воздух" (табл. 2). Менее значительные изменения высоты высачивания отмечались при ее математическом моделировании с учетом реальных испарения и конденсации (например, равны $\pm 10^{-3}$ м), т. е. при $q \neq 0$ и при $\Phi = z + 0,1$ м, где 0,1 — возможная менисковая сила (давление) капли, сдерживающей вытекание воды при полном насыщении грунтов.

Несомненно, на разные моменты времени и начальные условия расходы и высоты высачивания значительно отличаются, так как проявляется воздействие особенностей нелинейного объемного влагосодержания, свойственных разного типа грунтам.

Изменяются высоты высачивания и расходы влаги также в неоднородной по параметрам толще грунтов вследствие влияния внутренних источников влагоизменения, а также воздействия разного рода граничных условий и конфигурации исследуемого объекта. Обычно роль этих характеристик можно предугадать логическим путем. Хотя в реальных условиях из-за их разнообразия

и бессистемности проявления следует решать конкретные прогнозные задачи.

Безусловно, высота высачивания обусловлена сложностью движения влаги в приграничной зоне разгрузки, например в случае осесимметричного влагопереноса и фильтрации. Мы выполнили около 50 прогнозных решений, имитируя работу совершенной вертикальной водозаборной и наливной скважин с учетом начальных условий полного насыщения грунта и разноудаленной границы I рода на 0,1; 1; 10; 50 сут и при стационаре, а также разных радиусах скважин и шурфов $r_{\text{СКВ}} = 0,1; 0,5; 1,0; 2,0$ м. В настоящей статье ограничимся лишь выборочными результатами решения, в частности прогнозными суммарными расходами и высотой высачивания при стационаре (рис.1). Как видим, высоты высачивания резко увеличились до 8,0 м при водоотборе. При этом при наливке в скважину, в которой поддерживался уровень 10,0 м, на условной границе грунт — воздух на расстоянии 10,0 м от скважины высота высачивания в суглинках при стационаре составляла около 2,0 м при суммарном расходе примерно 37,7 м³/сут. Приведенные на рис.1 суммарные прогнозные расходы можно сравнить при малых $r_{\text{СКВ}}$ с рассчитанными по формуле Дюпюи-Форхгеймера [2]:

$$\sum Q = \pi \cdot K_{\phi} \cdot \frac{h^2 - h_0^2}{\ln \frac{R}{r_{\text{СКВ}}}},$$

где K_{ϕ} — коэффициент фильтрации; R — радиус влияния, м; h, h_0 — соответственно уровень на границе и в скважине (в нашем случае $h_0 = 0$).

Отметим, что эта формула не учитывает нелинейного влагопереноса и применяется для расчета стационарных фильтрационных расходов в случае безнапорного горизонта. Кстати, сравним подобным образом (точнее,

по
$$\sum Q = -K_{\phi} \cdot \frac{h^2 - h_0^2}{2} \cdot \Delta y \text{ при } \Delta y = 1,0 \text{ м}$$

ранее приведенные прогнозные стационарные расходы, полученные при решении профильной задачи для песков, суглинков и глин. Соответственно они составят 25,0; 2,5; 0,05 м³/м·сут, практически не отличаясь от получаемых с учетом влагопереноса. Из-

Таблица 1. Прогнозные объемные влагосодержания, расходы на границах, высота высачивания при стационарном влагопереносе и фильтрации

$Q = \Delta z \cdot \Delta y \cdot q$, м ³ /сут	x, m z, m		0,00	0,50	1,50	2,50	3,50	4,50	5,50	6,50	7,50	8,50	9,50	10,00	$Q = \Delta z \cdot \Delta y \cdot q$, м ³ /сут
	0,000	9,50	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,20	0,30	0,34	0,34	
0,000	8,50	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,21	0,31	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	1,890
0,000	7,50	0,03	0,03	0,04	0,12	0,30	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	2,115
0,000	6,50	0,05	0,05	0,22	0,32	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	2,332
0,000	5,50	0,29	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	2,535
-0,444	4,50	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	2,721
-3,097	3,50	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	2,883
-4,927	2,50	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	3,014
-7,041	1,50	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	3,107
-10,803	0,50	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	3,154
-	0,00	-	-	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	-
$\Sigma Q = -26,3$, м ³ /сут															$\Sigma Q = -26,2$, м ³ /сут

Примечание. Исходная информация: песок; формула 2.1 [4]; $\Delta x = \Delta z = 1,0$ м; сетка 10x10; $\Phi_{\text{нач}} = 10,0$ м; непроницаемые верхняя и нижняя границы; на левой границе нулевой уровень воды, на правой — 10,0 м.

ложенное подтверждает правомочность применения классических гидрогеологических формул.

Приведенные ранее выявленные закономерности о высотах высачивания и расходах воды в основном относились к идеализированным гидрогеологическим задачам: однородной среде, стационару, совершенным по вскрытию грунтов нулевым граничным условиям I рода, имитирующим открытые совершенные горизонтальные или вертикальные дрены при отсутствии внутренних источников влагоизменения и пр. Мы же выполнили серию прогнозных задач с учетом разнообразия реальных природно-техногенных характеристик, изменяющихся в пространстве и времени, в том числе имитируя закрытые, несовершенные дрены, точечные коммуникационные потери воды, удаленные граничные условия и т. д. Из-за невозможности картографического представления всех прогнозных результатов в рассматриваемой статье приведем для наглядности лишь выборочные показательные (табл. 1—4, рис. 2). Кратко остановимся только на наиболее научно интересных результатах, особенно в случае **проявления граничных условий I и II родов в недонасыщенных водой грунтах**, а также **влияния удаленных этих граничных условий**, в частности с целью решения прогнозных задач регионального назначения.

Представим, что в насыщенной среде находится небольшого размера точечный источник питания, вода из которого под некоторым напором инфильтруется в ненасыщенные грунты. Возникают вопросы: как влияет размер этого источника и каким образом осуществляется влагоперенос? Чтобы учесть сложность движения влаги у такого источника, нами применяется принцип "дополнительного сопротивления", рассчитываемого для внутренних граничных точек согласно известным аналитическим формулам с учетом применяемых пространственных расчетных шагов. Так, учитывая дополнительным сопротивлением радиальное движение воды в пределах расчетного блока с $\Delta x = \Delta z$ при разных граничных условиях I рода ($\Phi_{\text{гран}} \geq z$), мы спрогнозируем фильтрационные потери и особенности влагопереноса в двухмерной постановке превали-

Т а б л и ц а 2. Прогнозные гидрофизические функции, приведенные всасывающие давления, расходы на границах, изолиния $P_{вс} = 0$, высота высачивания при профильном влагопереносе и фильтрации с уклоном левой границы при стационаре

$Q = \Delta z \cdot \Delta y \cdot q$, м ³ /сут	x, m z, m		0,00	0,50	1,50	2,50	3,50	4,50	5,50	6,50	7,50	8,50	9,50	10,00	$Q = \Delta z \cdot \Delta y \cdot q$, м ³ /сут
	0,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,269 -0,731	9,527 -0,473	9,834 -0,166	
-0,075	↖	-	-	-	-	-	-	-	8,500 0,000	8,649 0,149	9,057 0,558	9,433 0,933	9,809 1,309	9,999 1,499	-0,095
-0,165	-	-	-	-	-	-	-	7,500 0,000	7,830 0,330	8,388 0,888	8,881 1,381	9,337 1,837	9,779 2,279	9,999 2,499	-0,110
-0,227	-	-	-	-	-	-	6,500 0,000	6,955 0,455	7,602 1,102	8,194 1,694	8,740 2,240	9,254 2,754	9,752 3,252	9,999 3,499	-0,124
-0,278	-	-	-	-	-	5,500 0,000	6,056 0,556	6,764 1,264	7,427 1,927	8,047 2,547	8,630 3,130	9,188 3,688	9,730 4,230	9,999 4,499	-0,135
-0,324	-	-	-	-	4,500 0,000	5,148 0,648	5,904 1,404	6,619 2,119	7,295 2,795	7,936 3,436	8,547 4,047	9,136 4,936	9,713 5,213	9,999 5,499	-0,143
-0,373	-	↗	-	3,500 0,000	4,245 0,745	5,041 1,540	5,794 2,294	6,512 3,012	7,198 3,698	7,854 4,354	8,485 4,985	9,098 5,598	9,700 6,200	9,999 6,499	-0,149
-0,198	-	-	3,000 0,500	3,396 0,896	4,196 1,696	4,972 2,472	5,720 3,220	6,439 3,939	7,130 4,630	7,797 5,297	8,442 5,942	9,071 6,571	9,691 7,191	9,999 7,499	-0,154
-0,195	-	-	3,000 1,500	3,390 1,890	4,169 2,669	4,932 3,432	5,675 4,175	6,393 4,893	7,088 5,588	7,760 6,260	8,414 6,914	9,054 7,554	9,685 8,185	9,999 8,499	-0,157
-0,193	-	-	3,000 2,500	3,387 2,887	4,156 3,656	4,914 4,414	5,653 5,153	6,371 5,871	7,067 6,567	7,743 7,243	8,401 7,901	9,046 8,546	9,682 9,182	9,999 9,499	-0,158
-	-	0,00	-	3,387 3,387	4,156 4,156	4,914 4,914	5,653 5,653	6,371 6,371	7,067 7,067	7,743 7,743	8,401 8,401	9,046 9,046	9,682 9,682	-	-
$\Sigma Q = 1,30$, м ³ /сут	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$\Sigma Q = 1,30$, м ³ /сут

Примечание. Исходная информация: суглинок; формула 2.3 [4]; уклон 45°; нижняя и верхняя границы — непроницаемый контур; на левой границе уровень воды 3,0 м; $\Delta z = \Delta x = 1,0$ м; сетка 10x10; $\Phi_{нач} = 0,0$ м; $t = \infty$; итераций 5000.

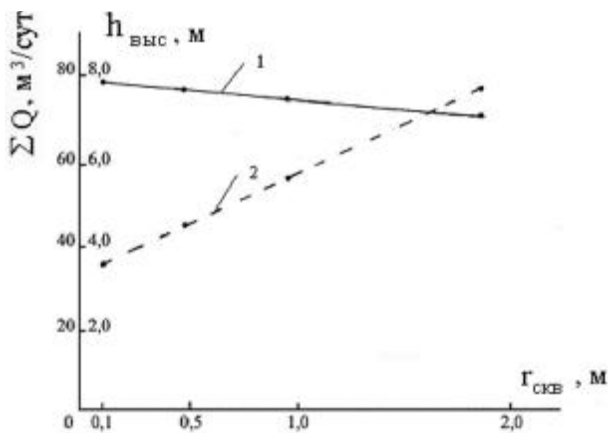


Рис. 1. Зависимость прогнозных высот высачивания (1) и расходов совершенного водосборного сооружения (2) от его радиуса при стационарных осесимметричных влагопереносе и фильтрации в насыщенно-ненасыщенных суглинках

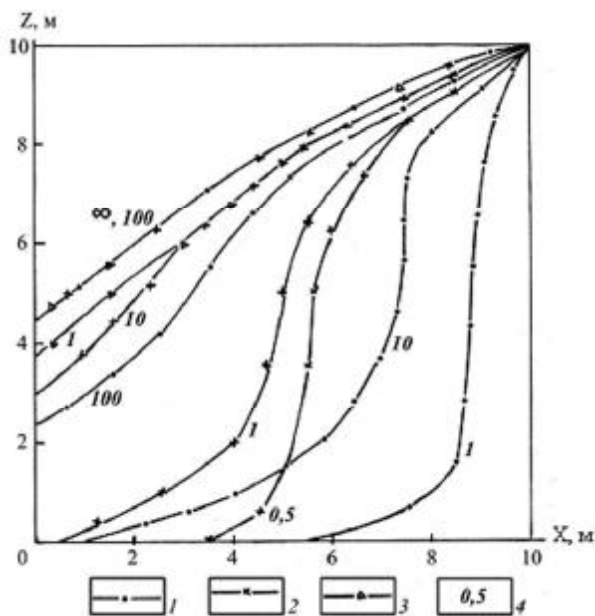


Рис. 2. Прогнозные нулевые изолинии всасывающих давлений на разные времена при нулевых начальных условиях ($\Phi_p = 0$) и расчетной квадратной сетке (10x10 м)

1 — глина; 2 — суглинок; 3 — песок; 4 — прогнозное время

рующего нисходящего движения, определив по результатам прогнозов изолинии гидрофизической функции и ортогональные к ним линии тока. Интересно, что постепенно увеличивающаяся зона локального насыщения грунтов в общем случае стабилизируется во времени, сохраняя свою локальность на фоне окружающих ненасыщенных грунтов. Для подтверждения возможности такого характера влагопереноса мы выполнили серию прогнозных одномер-

ных по вертикали задач, в частности с разными граничными условиями III рода на верхней границе и нулевой гидрофизической функцией на нижней.

Учетом на правой границе исследуемого профильного и осесимметричного движения воды нам удалось граничным условием III рода перенести границу изучаемого объекта с $\Phi_{\text{гран}} = 10,0$ м на расстояние 50,0 м и более (вместо 10,0 м), допустив, что преобладающая над влагопереносом фильтрация там подчиняется, в частности, ранее указанному уравнению Дюпюи. Последнее позволило в первом приближении рассчитать необходимые дополнительные сопро-

тивления $F_{\text{доп}} = \frac{10,0 \cdot \ln(0,1 \cdot R)}{K_{\phi}}$, сут. На левой

границе имитировалось совершенное граничное условие I рода (0; 1,0; 3,5 м) и III рода (с z и $q = 0$). Так, для осесимметричной профильной задачи с $r_{\text{скв}} = 0,5$ м для суглинков, $\Delta z = \Delta r = 1,0$ м, сетка 10x10 м, $\Phi_{\text{нач}} = 10,0$ м на $t = \infty$ при $F_{\text{доп}} = 32,8$ сут (удаление границы до 50,0 м) высота высачивания уменьшилась до 7,0 м, расход — до 39,9 ÷ 43,7 м³/сут.

Заканчивая изложение статьи, остановлюсь на необходимости учета влагопереноса совместно с фильтрацией. Для этого попытаюсь определить погрешности прогнозных значений высот высачивания и расходов воды путем сравнения полученных нами решений (принимаемых за условно истинные) с классическими формулами, принятыми в гидрогеологии и не учитывающими влагоперенос, например формулы Дюпюи и решение П. Я. Полубариновой-Кочиной [3]. Заведомо значительные погрешности (даже свыше 100%) ожидаются при неустановившихся процессах, так как, строго говоря, традиционные прогнозные формулы требуют соблюдения постоянства для конкретных грунтов так называемых коэффициентов водоотдачи (водонасыщения), а в действительности этот коэффициент должен изменяться во времени согласно применяемой нелинейной зависимости объемного влагосодержания от прогнозируемого всасывающего давления. Для неустановившихся процессов требуются серьезные проработки и специальные математические эксперименты, которым должна быть посвящена отдельная статья. В то же время, приближаясь к стационару, ошибки за

Таблица 3. Прогнозные гидrofизические функции, приведенные всасывающие давления, расходы на границах, изолиния $R_{вс} = 0$, высота высачивания при профиленом влагопереносе и филътрации на 1 сут

$Q = \Delta z \cdot \Delta y \cdot q$, м ³ /сут	$\frac{x, m}{z, m}$	0,00	0,50	1,50	2,50	3,50	4,50	5,50	6,50	7,50	8,50	9,50	10,00	$Q = \Delta z \cdot \Delta y \cdot q$, м ³ /сут
0,000	10,00	-	3,945	4,151	4,185	3,970	4,050	4,213	4,409	5,008	6,664	9,546	-	-
0,000	9,50	3,945	-6,055	-5,849	-5,815	-6,030	-5,950	-5,787	-5,591	-4,992	-3,336	-0,454	-	-
0,000	8,50	-5,555	3,945	4,151	4,185	3,970	4,050	4,213	4,409	5,008	6,664	9,546	9,990	-0,444
0,000	7,50	-5,555	-5,555	-5,349	-5,315	-5,530	-5,450	-5,287	-5,091	-4,492	-2,836	0,046	0,490	-
0,000	6,50	3,087	3,087	3,190	3,117	3,142	3,155	3,485	4,004	5,509	8,255	9,266	9,990	-0,724
0,000	5,50	-5,413	-5,413	-5,310	-5,383	-5,358	-5,345	-5,015	-4,496	-2,991	-0,245	0,766	1,490	-
0,000	4,50	2,118	2,118	2,168	2,169	2,177	2,331	2,723	3,136	6,939	7,861	9,108	9,990	-0,882
0,000	3,50	-5,382	-5,382	-5,332	-5,331	-5,323	-5,169	-4,777	-4,364	-0,561	0,361	1,608	2,490	-
0,000	2,50	1,072	1,072	1,135	1,174	1,326	1,648	2,009	3,660	6,592	7,535	8,993	9,990	-0,997
0,000	1,50	-5,428	-5,428	-5,365	-5,326	-5,174	-4,852	-4,491	-2,840	0,092	1,035	2,493	3,490	-
0,000	0,50	0,322	0,322	0,395	0,500	0,690	1,002	2,015	5,180	6,058	7,254	8,903	9,990	-1,087
0,000	0,00	-5,178	-5,178	-5,105	-5,000	-4,810	-4,498	-3,485	-0,320	0,558	1,754	3,403	4,490	-
0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,031	2,627	4,912	5,767	7,078	8,848	9,990	-1,142
0,000	0,000	-4,499	-4,499	-4,449	-4,499	-4,496	-4,469	-1,873	0,412	1,267	2,578	4,348	5,490	-
0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,007	0,415	1,124	3,639	4,494	5,577	7,006	8,838	9,990	-1,152
0,000	0,000	-3,500	-3,500	-3,499	-3,493	-3,085	-2,376	0,139	0,994	2,077	3,506	5,338	6,490	-
0,000	0,016	0,016	0,016	0,118	0,346	1,718	2,585	3,394	4,366	5,563	7,048	8,875	9,990	-1,115
0,000	-2,484	-2,484	-2,484	-2,382	-2,154	-0,782	0,085	0,894	1,866	3,063	4,548	6,375	7,490	-
0,000	0,152	0,152	0,152	0,923	1,424	1,882	2,588	3,441	4,472	5,716	7,208	8,969	9,990	-1,021
0,000	-1,378	-1,378	-1,348	-0,577	-0,076	0,382	1,088	1,941	2,972	4,216	5,708	7,469	8,490	-
-0,077	$\begin{matrix} \uparrow \\ h_{вс} \\ \downarrow \end{matrix}$ 0,5	0,653	0,653	1,019	1,487	2,032	2,739	3,609	4,662	5,919	7,397	9,082	9,990	-0,908
-	0,0	0,153	0,153	0,519	0,987	1,532	2,239	3,109	4,162	5,419	6,897	8,581	9,490	-
-	0,00	0,653	0,653	1,019	1,487	2,032	2,739	3,609	4,662	5,919	7,397	9,082	-	-
$\Sigma Q = -0,077$ м ³ /сут		0,653	0,653	1,019	1,487	2,032	2,739	3,699	4,662	5,919	7,397	9,082	-	$\Sigma Q = -4,74$ м ³ /сут

Примечание. Исходная информация: суглинок; формула 2.3 [4]; нижняя и верхняя границы — непроницаемый контур, $\Delta z = 1,0$ м; сетка 10x10; $\Phi_{нет} = 0,0$ м; левая граница — открытая вертикальная стенка грунт — воздух; правая граница — уровень воды 10,0 м.

Таблица 4. Прогнозные гидрофизические функции, приведенные всасывающие давления, расходы на границах, изолиния $P_{вс} = 0$, высота высачивания при осесимметричном влапереносе и фильтрации на 10 сут

$Q = \Delta z \cdot \Delta y \cdot q$, м ³ /сут	$\frac{x, м}{z, м}$	0,50	1,50	2,50	3,50	4,50	5,50	6,50	7,50	8,50	9,50	10,50	11,50	$Q = \Delta z \cdot \Delta y \cdot q$, м ³ /сут
-	11,00	-	9,29	9,42	9,19	9,31	9,39	9,57	9,70	9,82	9,90	9,97	-	-
-0,000	10,00	9,29	-1,71	-1,58	-1,81	-1,69	-1,61	-1,43	-1,30	-1,18	-1,10	-1,05	-	0,905
-0,000	9,00	-0,71	-0,71	-0,58	-0,81	-0,69	-0,61	-0,43	-0,30	-0,18	-1,10	-0,03	-0,00	2,732
0,549	8,00	8,46	8,46	8,65	8,95	9,08	9,29	9,44	9,60	9,72	9,83	9,92	10,00	4,222
2,459	7,00	-0,54	-0,54	-0,35	-0,05	0,08	0,29	0,44	0,60	0,72	0,83	0,92	1,00	5,470
3,952	6,00	8,00	8,17	8,52	8,73	8,98	9,15	9,35	9,49	9,63	9,75	9,88	10,00	7,231
5,517	5,00	0,00	0,17	0,92	0,73	0,98	1,15	1,35	1,49	1,63	1,75	1,88	2,00	1,426
7,178	4,00	7,00	7,78	8,20	8,56	8,80	9,05	9,22	9,40	9,54	9,68	9,82	9,97	1,129
7,826	3,00	0,00	0,78	1,20	1,56	1,80	2,05	2,22	2,40	2,54	2,68	2,82	2,97	1,295
7,419	2,00	6,00	7,26	7,91	8,32	8,66	8,90	9,12	9,28	9,44	9,58	9,73	9,94	1,399
7,268	1,00	0,00	1,26	1,91	2,32	2,66	2,90	3,12	3,28	3,44	3,58	3,73	3,94	1,451
-	0,00	5,00	6,76	7,58	8,12	8,49	8,78	9,00	9,19	9,33	9,46	9,55	9,60	-
$\Sigma Q = -42,17$, м ³ /сут		0,00	1,76	2,58	3,12	3,49	3,78	4,00	4,19	4,33	4,46	4,55	4,60	$\Sigma Q = -27,26$, м ³ /сут
		$h_{вас}$	4,00	6,28	7,31	7,92	8,66	8,91	9,09	9,24	9,35	9,43	9,46	
			2,28	3,31	3,92	4,35	4,66	4,91	5,09	5,24	5,35	5,43	5,46	
			5,99	7,10	7,78	8,23	8,57	8,82	9,02	9,16	9,28	9,35	9,39	
			2,99	4,10	4,78	5,23	5,57	5,82	6,02	6,16	6,28	6,35	6,39	
			3,50	6,99	7,68	8,16	8,50	8,77	8,96	9,11	9,22	9,30	9,34	
			1,50	4,99	5,68	6,16	6,50	6,77	6,96	7,11	7,22	7,30	7,34	
			3,50	5,81	6,93	7,63	8,47	8,74	8,94	9,09	9,20	9,27	9,31	
			2,50	4,81	5,93	6,63	7,47	7,74	7,94	8,09	8,20	8,27	8,31	
			-	5,81	6,93	7,63	8,47	8,74	8,94	9,09	9,20	9,27	-	
			5,81	6,93	7,63	8,12	8,47	8,74	8,84	9,09	9,20	9,27	-	

Примечание. Исходная информация: суглинок; $\Phi_{глет} = 10,0$ м; сетка 10x10; итераций 5000; нижняя и верхняя границы — непроницаемый контур.

счет неучета влагопереноса резко снижаются и сравнительно просто могут быть оценены нами. Заметим, что для рассматриваемой квадратной в разрезе единичной перемычке грунтов (10x10 м) в случае нулевых начальных условий, совершенной вертикальной левой границе грунт — воздух с нулевым уровнем воды, а также правого граничного условия, равного 10,0 м, со стороны которого насыщаются грунты, стационар практически наступает за несколько суток для песков, в пределах 10—50 сут для суглинков и за свыше 50—100 сут для глин. Очевидно, что при учете влагопереноса определяемые высоты высачивания и расходы воды должны быть несколько завышенными.

Итак, для всех типов грунтов при стационаре погрешность (σ) определим согласно формуле

$$\sigma = \frac{(x_0 - x)}{x_0} \cdot 100\%,$$

где x_0 , x — соответственно определяемые нами с учетом влагопереноса и фильтрации и рассчитанные по формулам без влагопереноса.

Нетрудно убедиться, что погрешность в определении высоты высачивания для профильной задачи составит с учетом решений с $\Delta x = \Delta z = 1,0; 0,5; 0,25; 0,125$ м на разных расчетных сетках

$$\sigma = \frac{[(3,95 \div 5,0) - 3,86]}{(3,95 \div 5,0)} \cdot 100\% = (2 \div 23)\%,$$

где 3,86 м — высота высачивания по П. Я. Полубариновой-Кочиной, [3], приведенная к высоте перемычки 10,0 м вместо 7,0 м.

Прогнозные расходы с учетом профильного влагопереноса, вероятно, будут боль-

шими на 4,2% для песков, на 2,7% для суглинков, на 5,7% для глин; расходы с учетом осесимметричного влагопереноса и фильтрации для суглинков увеличиваются на 6,28% при $r_{\text{СКВ}} = 0,1$ м.

Следует также обратить внимание, что приведенные ошибки указывают, с одной стороны, на незначительность роли учета влагопереноса в идеальных стационарных процессах, а с другой — принципиально могут быть обусловлены также погрешностями применяемого конечноразностного неявного итерационного метода решений.

1. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Теория движения жидкостей в недеформируемой пористой среде. — М.: Гостехиздат, 1953. — 292 с
2. Бэр Я., Заславски Д., Ирней С. Физико-математические основы фильтрации воды. — М.: Мир, 1971. — 452 с.
3. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. — М.: Гостехиздат, 1952. — 676 с.
4. Ситников А. Б., Водолазкий В. И. Особенности решения типовых прогнозных задач двухмерного нелинейного влагопереноса в грунтах // Геол. журн. — 2009. — № 4. — С. 92—98.
5. Ситников А. Б. Динамика воды в ненасыщенных и насыщенных грунтах зоны аэрации. — Киев: Наук. думка, 1978. — 155 с.
6. Ситников А. Б. Рекомендованная методика математического моделирования нелинейного влагопереноса в ненасыщенно-насыщенных грунтах // Геол. журн. — 2009. — № 2. — С. 77—85.
7. Шестаков В. М. Динамика подземных вод. — М.: Изд-во МГУ, 1973. — 327 с.

Ин-т геол. наук НАН Украины,
Киев
E-mail: geoj@bigmir.net

Статья поступила
16.06.09