

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФОРМУЛ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОМЕЖУТКА ВЫСАЧИВАНИЯ

П. Н. Костюкович

Определение промежутка высачивания у стенок дрен (скважин, галлерей, горных выработок и т. д.) имеет большое практическое и теоретическое значение. В последние годы ему уделяется особое внимание у нас и за рубежом [1—21], но до настоящего времени нет практически приемлемых решений.

Подход к решению этого вопроса пока определяется тем, как исследователи понимают теорию Дюпюи и его известные формулы и с физической стороны представляют процесс образования промежутка высачивания.

Одни исследователи в формулах Дюпюи принимают высоту столба жидкости внутри скважины h_c , другие — по внешней стенке скважины h_0 , а третьи считают, что при расчете дебита необходимо использовать величину h_c , а при расчете депрессионной кривой учитывать промежуток высачивания Δh и брать величину h_0 . Последняя точка зрения получила всеобщее распространение в современной теории фильтрации. В результате практически все существующие формулы определения промежутка высачивания выведены из утверждения, что в формулах Дюпюи учитывается величина понижения уровня S_c (или пониженного напора h_c) внутри дрен (рис. 1). Остановимся на этом вопросе.

Как известно, при прочих равных условиях давление жидкости P на горизонтальную плоскость находится в прямой зависимости от величины проницаемости среды и является максимальным в среде без пор, где жидкость занимает все пространство. В тех же условиях при резком изменении проницаемости сред на их контакте резко изменяется и величина давления, а следовательно, и величина напора $H = \frac{P}{\gamma} + z$ (z — высота положения рассматриваемой плоскости, γ — объемный вес жидкости). Это свидетельствует о том, что на границе сред с различной проницаемостью напорная функция терпит разрыв и не является гармонической. Очевидно, напорная функция непрерывна только в пределах среды однородной по проницаемости и только в этих пределах имеет непрерывную производную и может быть дифференцируема. Этим же свойством обладает и потенциал $\Phi = kH$, в котором, кроме того, на границе двух сред изменяется и коэффициент фильтрации.

Таким образом, дифференцировать напорные функции можно только в пределах пористой среды, т. е. до внешних стенок дрен, внутри которых среда не имеет пор, коэффициент фильтрации стремится к бесконечности, а напорная функция терпит максимальный разрыв. Поэтому при интегрировании дифференциальных уравнений теории фильтрации за граничные условия в частном случае следует брать значения напорной функции по внешним стенкам дрен, а не внутри их, как это принято в настоящее время.

Следовательно, в формулах Дюпюи необходимо учитывать величину понижения уровня S_0 (или пониженного напора h_0) по внешним стенкам дрен, а не внутри их. Это сразу исключает ряд противоречий, приписываемых теории Дюпюи. Одно из них заключалось в том, что при $h_c = 0$ расход потока Q максимален $Q_{\max}$, хотя, по Дарси, в этом случае $Q = 0$. При появлении в формулах Дюпюи h_0 противоречия исключаются, так как при $h_c = 0$ $Q = Q_{\max}$ и $h_0 = h_{0\min} = \Delta h_{\max}$. Второе противоречие кроется в противопоставлении дебита кривой депрессии. Однако расход фильтрационного потока определяется формой кривой депрессии. При учете в формуле Дюпюи S_0 или h_0 это противоречие также отпадает.

Существование разрыва напорной функции у стенок возмущающих грунтовых дрен обуславливает разрыв этой функции и в артезианских дренах, где его можно назвать пьезометрическим разрывом ΔS . Очевидно,

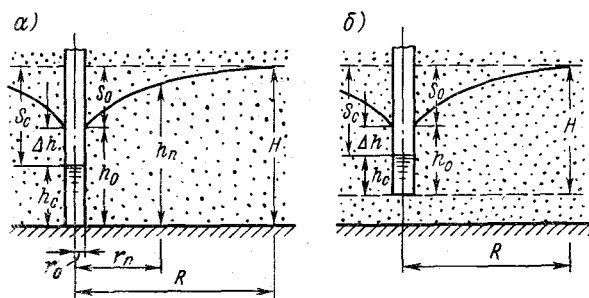


Рис. 1. Схема для определения промежутка высачивания. а — совершенная дрена; б — несовершенная дрена с незатопленным фильтром и закрытым дном.

пьезометрический разрыв ΔS будет находиться в прямолинейной зависимости от величины S_c , так как зависимость Δh (или ΔS) = $f(S_c)$ аналогична зависимости $Q = f(S_c)$. Это подтверждается, например, в грунтовых совершенных скважинах, для которых зависимости $\Delta h = f(S_c)$ и $Q = f(S_c)$ в общем случае аналогичны и являются параболическими, хотя и обладают некоторыми особенностями. Одна из особенностей заключается в том, что при $S_c \geq 0,7 H$ величина дебита возрастает незначительно, а при $S_c \geq 0,9 H$ практически не изменяется, в то время как промежуток высачивания Δh , наоборот, в этом случае возрастает интенсивно. Вторая особенность, по данным экспериментов в фильтрационных лотках, заключается в том, что в промежутке $0 < S_c \leq 0,6 H$ зависимости $Q = f(S_c)$ и $\Delta h = f(S_c)$ практически прямолинейны. Поэтому следует ожидать, что и зависимость $\Delta S = f(S_c)$ будет также характеризоваться своими особенностями, вытекающими из условий напорной фильтрации.

Существование разрыва напорной функции у внешних стенок возмущающих дрен позволяет представить процесс образования промежутка высачивания как наложение на величину разрыва напорной функции (естественного разрыва) величины искусственного разрыва напора, образующегося в результате отбора жидкости из дрены и вытекающего отсюда влияния на разрыв уровней гидравлического сопротивления и гидродинамического несовершенства дрены.

Используя эти выводы, дадим сравнительную оценку наиболее известным формулам по определению промежутка высачивания у одиночных совершенных скважин. Предварительно отметим, что формула

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - h_c^2)}{\ln \frac{R}{r_c}} \quad (1)$$

выведена И. Козени [21]. Формула же Дюпюи имеет вид

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (2)$$

В этих формулах:

k — коэффициент фильтрации (различный в формулах И. Козени и Дюпюи);
 H — первоначальная мощность потока;
 R — радиус влияния;
 r_c — внутренний радиус скважины;
 r_0 — внешний радиус скважины.

Известно, что максимальный дебит скважины дает при полном снижении уровня в ней. При этом величина промежутка высачивания также достигает своего максимума и подчиняется зависимости

$$\Delta h_{\max} \geq \frac{H}{2}. \quad (3)$$

В идеальном случае, как впервые доказал И. Козени [20] и подтвердил И. С. Лазаревич [13], при работе скважины в круговом пласте с неподвижным контуром питания величина $\Delta h_{\max} = \frac{H}{2}$. В действительности же скважины (или дрены вообще) обладают гидравлическим сопротивлением, обусловленным, в частности, наличием фильтров различной конструкции и скважности. Кроме того, они гидродинамически несовершенны, что способствует увеличению или уменьшению величины Δh . Чем больше величина понижения уровня внутри их, тем больше напор, вызывающий движение жидкости через фильтр. Очевидно, при прочих равных условиях, количество жидкости, поступающее в скважину, будет больше там, где больше отверстий в фильтре. Следовательно, при равных h_c , r_c , k , H и R дебит скважин будет определяться гидравлическим сопротивлением фильтра. Это значит, по этим параметрам, т. е. по формуле (1), невозможно определить дебит скважины, кривую депрессии и параметры пласта.

Таким образом, при прочих равных условиях, величины h_c будут различны при одинаковом дебите скважин, если различны гидравлические сопротивления их фильтров. Но так как при этом величины расходов потоков равны, то, естественно, будут равны и величины h_0 , хотя величины h_c не равны. Следовательно, если сопротивления фильтров различны, то при прочих равных условиях будут различны и величины промежутков высачивания.

Итак, без учета гидравлического сопротивления скважины невозможно определить величину h_c для получения заданного дебита скважины и, наоборот, невозможно определить дебит скважины и промежуток высачивания при заданных h_c и параметрах пласта и потока.

Из очевидного положения о равенстве дебита скважины расходу потока следует, что при равных r_0 , h_0 , k , H и R дебит скважин будет один и тот же независимо от величин их сопротивления (а, следовательно, и от величин h_c), так как расход осесимметричного потока во всех случаях один и тот же и определяется формулой Дюпюи. Отсюда, в свою очередь, вытекает, что при равных r_0 , h_0 , k , H и R дебит совершенных и несовершенных скважин одинаков, хотя величины h_c могут быть различными. Поскольку несовершенные скважины обладают большим сопротивлением, чем совершенные, то, очевидно, при прочих равных условиях величины Δh и h_c у них будут соответственно больше и меньше, чем у совершенных. Следовательно, реальный дебит скважины, определяемый с учетом величины S_c или h_c , определится, когда захватная способность скважины будет не меньше проектируемого теоретического дебита, определяемого с учетом S_0 или h_0 . Для этого необходимо в расчете реального (фактического) дебита скважин сочетать определение захватной способности и теоретического дебита скважины в тех же гидрогеологических условиях.

Задача определения фактического дебита скважин с изложенных выше позиций в настоящей статье ставится впервые и не имеет ни теоретического, ни эмпирического решений, которые можно было бы применить

на практике. Существующие формулы по определению промежутка высачивания выведены из положений, вытекающих из формулы (1) И. Козени. Большая часть формул [3, 4, 9, 13—19] не учитывает сопротивление фильтра и поэтому не решает поставленной задачи. Меньшая часть формул [1, 9, 19], хотя в какой-то степени и учитывает сопротивление фильтра, однако исключает ряд важных параметров пласта и потока, от которых существенно зависит промежуток высачивания (например, параметры k , H , R). Рассмотрим, например, формулу С. К. Абрамова, наиболее часто рекомендуемую для практических расчетов [1]

$$\Delta h = 0,01 a \sqrt{\frac{QS_c}{kF}}, \quad (4)$$

где Q — дебит скважины;

S_c — величина понижения уровня внутри скважины;

k — коэффициент фильтрации пласта;

$F = 2\pi r_c (\Delta h + h_c)$ — рабочая площадь фильтра;

0,01 и a — эмпирические коэффициенты, учитывающие в неявном виде сопротивление фильтра.

Подставляя значение F в развернутом виде в формулу (4), находим

$$\Delta h^2 (\Delta h + h_c) = 0,0001 a^2 \frac{Q(H - h_c)}{2\pi k r_c}. \quad (5)$$

При анализе фактического материала [1], когда $h_c = 0$,

$$\Delta h_{\max} = 0,01 \sqrt[3]{a^2 \frac{Q_{\max} H}{2\pi k r_c}}, \quad (6)$$

что в лабораторных условиях дает неудовлетворительные результаты. Примерно те же упущения свойственны формуле И. Петерсена [9].

Итак, какой коэффициент следует принимать при $h_c > 0$, неизвестно.

П. А. Киселев [19], исходя из положений Г. Н. Каменского о том, что промежуток высачивания образуется в результате дополнительного сопротивления непосредственно прилегающей к фильтру пористой среды, а дополнительное сопротивление возникает в результате отклонения линий тока от горизонтальной плоскости, ввел понятие о приведенном потоке. В этом потоке мощность на контуре стока равна h_c , а в действительном потоке — величине h_0 . Применяя к этим потокам теорию Дюпюи и считая расходы потоков равными, П. А. Киселев получил формулу для определения промежутка высачивания у стенок скважин, не оборудованных фильтром,

$$\Delta h = \sqrt{h_c^2 + \frac{\ln\left(1 + \frac{d_{\max}}{r_c}\right) (H^2 - h_c^2)}{\ln \frac{R}{r_c}}} - h_c, \quad (7)$$

где $d_{\max}$ — максимальная величина отклонения эквипотенциали, выходящей у стенки скважины на высоте h_0 от вертикального положения по подошве пласта.

Согласно этой формуле, промежуток высачивания не зависит от коэффициента фильтрации пласта. В действительности же, наоборот, промежуток высачивания в значительной степени определяется проницаемостью пласта, т. е. формула (7) практически непригодна. Кроме того, поскольку $d_{\max} \approx H$ [17], то для обычно встречающихся на практике промежутков изменения r_c ($0,1 \leq r_c \leq 0,3$ м) и R ($10H \leq R \leq 100H$) получаем

$$0,5H \leq \Delta h_{\max} \leq 0,7H,$$

что довольно сомнительно для скважин, не оборудованных фильтром.

Выражая сопротивление фильтра через некоторый коэффициент фильтрации k_{ϕ}^* , отнесенный к окружающему фильтр пористому цилиндру с радиусом $r_c + d_{\max}$, П. А. Киселев записал [19]

$$\frac{\pi k_{\phi} (h_0^2 - h_c^2)}{\ln \frac{r_c + d_{\max}}{r_c}} = \frac{\pi k (H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r_c + d_{\max}}} \quad (8)$$

При решении этого равенства П. А. Киселев допустил ошибку и для определения промежутка высачивания при наличии фильтра Δh_{ϕ} получил формулу типа (7), не учитывающую k и k_{ϕ} . В действительности из равенства (8) получается

$$\Delta h_{\phi} = \sqrt{\frac{kH^2 \ln \frac{r_c + d_{\max}}{r_c} + k_{\phi} h_c^2 \ln \frac{r_c}{r_c + d_{\max}}}{k \ln \frac{r_c + d_{\max}}{r_c} + k_{\phi} \ln \frac{R}{r_c + d_{\max}}}} - h_c \quad (9)$$

При отсутствии фильтра, согласно П. А. Киселеву, $k = k_{\phi}$. Но тогда из формулы (9)

$$\Delta h = \sqrt{\frac{H^2 \ln \frac{r_c + d_{\max}}{r_c} + h_c^2 \ln \frac{r_c}{r_c + d_{\max}}}{\ln \frac{r_c + d_{\max}}{r_c} + \ln \frac{R}{r_c + d_{\max}}}} - h_c,$$

что противоречит формуле (7), которая также определяет величину Δh . Следовательно, формулы П. А. Киселева в такой же степени противоречивы, как и положенные в их основу допущения. В последующих работах, посвященных промежутку высачивания, вывод формул основан на ошибочных допущениях П. А. Киселева, которые берут свое начало еще в первой [20] и второй [21] теориях И. Козени.

Приводим основные формулы определения промежутка высачивания у совершенных одиночных скважин**:

Р. Эренбергера (1928 г.)

$$\Delta h = \frac{S_c^2}{2H}; \quad (10)$$

В. С. Оводова (1939 г.)

$$\Delta h = \frac{1}{2} S_c, \quad (11)$$

Ягера (1946 г.)

$$\Delta h_{\max} = \sqrt{r_c^2 + \frac{2Q_{\max}}{\pi^2 k}} - r_c; \quad (12)$$

приведенные ранее формулы (6) и (7) С. К. Абрамова (1947 г.)

$$\Delta h_{\max} = 0,01 \sqrt[3]{a^2 \frac{Q_{\max} H}{2\pi k r_c}}$$

и П. А. Киселева (1949 г.)

$$\Delta h = \sqrt{h_c^2 + \frac{\ln \left(1 + \frac{H}{r_c}\right) (H^2 - h_c^2)}{\ln \frac{R}{r_c}}} - h_c;$$

* Определение гидравлического сопротивления фильтров, выражаемого через коэффициент фильтрации, находится в начальной стадии изучения [6, 7].

** Формула М. М. Борели громоздка и аналогична формулам, не учитывающим сопротивления фильтра. В формуле П. А. Киселева вместо $d_{\max}$ равная ей величина H_3 .

И. А. Чарного (1951 г.)

$$\Delta h = H \left(\frac{1}{2} - \frac{h_c}{H} + \frac{A}{\pi^2} - \frac{1}{\pi} \sqrt{2 + \left(\frac{A}{\pi} \right)^2 - A} \right) \quad (13)$$

где

$$A = \frac{\pi^2 Q \left(\ln \frac{H}{\pi r_c} - 0,577 \right)}{4kH^2 \left(1 + \cos \frac{\pi h_c}{H} \right)};$$

В. И. Аравина (1951 г.)

$$\Delta h = H \left(0,78 - 0,96 \frac{h_c}{H} \right); \quad (14)$$

И. А. Чарного (1956 г.)

$$\Delta h = \frac{Q}{\pi k H} \ln \frac{H}{\pi r_c} + \frac{h_c^2}{H} - h_c; \quad (15)$$

И. Петерсена, С. Ровера, М. Альбертсона (1953 г.)

$$\Delta h = \frac{Q^2}{\pi r_c^2 g} \cdot \frac{\operatorname{ch} \left[5,65 \frac{\pi \eta}{r_c} (h_c + \Delta h) + 1 \right]}{\operatorname{ch} \left[5,65 \frac{\pi \eta}{r_c} (h_c + \Delta h) - 1 \right]}, \quad (16)$$

где η — скважность фильтра;

ε — коэффициент сжатия струи в отверстиях фильтра;

g — ускорение силы тяжести.

Ю. Г. Трофименкова (1956 г.)

$$\Delta h = \frac{4Q \sqrt{S_c}}{\eta_0 \pi^2 k (H + h_c) \sqrt{H}}, \quad (17)$$

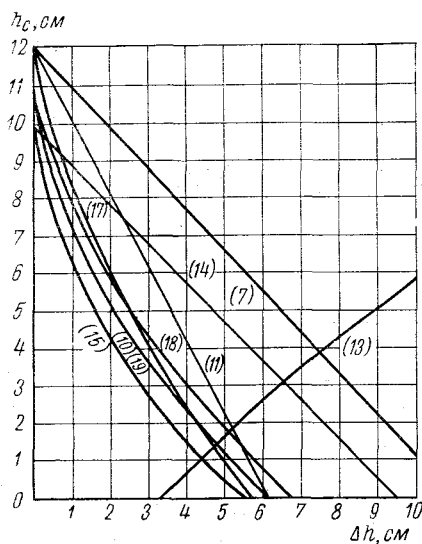
где η_0 — определяется по графику;

В. М. Шестакова (1959 г.)

$$\Delta h = \sqrt{\frac{Q}{k} \left[0,73 \lg \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\frac{Q}{k}} \right) - 0,51 \right] + h_c^2} - h_c; \quad (18)$$

И. С. Лазаревича (1961 г.)

$$\Delta h = \sqrt{\left(\frac{3H^2 - h_c^2}{2H} \right)^2 + 4H^2} - h_c^2 - \frac{2Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r_c} - \frac{3H^2 - h_c^2}{2H} - h_c. \quad (19)$$



По этим формулам рассчитан промежуток высачивания для опытов И. Козени [20] (рис. 2). Коэффициент фильтрации определен по формуле И. Козени (1), которую часто ошибочно приписывают Дююю, неправильно толкуя смысл теории Дююю и заменяя в формуле Дююю величину h_0 величиной h_c .

Расчет по формуле Дююю в данном случае невозможен, так как нет

Рис. 2. Зависимость Δh от h_c для опытов И. Козени, рассчитанная по формулам (7), (10), (11), (13) — (19).

$r_c = 1 \text{ см}; R = 21 \text{ см}; H = 12,2 \text{ см}$									
$h_c, \text{ см}$	11,6	11,0	10,4	8,4	6,2	4,7	4,0	0	
$Q, \text{ см}^3/\text{сек}$	5,3	9,1	11,3	15,8	18,2	22,2	22,8	22,8	
$k, \text{ см}/\text{сек}$	0,36	0,32	0,27	0,20	0,16	0,17	0,17	0,13	

замеров величин h_0 . По нашим лабораторным предварительным расчетам (при замере величин h_c и h_0), формула Дююи несравнимо более точна, чем формула И. Козени. В природных условиях, естественно, точность формулы (2) еще более возрастает, так как сопротивление фильтров скважин в природных условиях различно, обычно значительно и интенсивно возрастает во времени.

Как видно из рис. 2, величины k , подсчитанные по формуле (1), уменьшаются примерно в два раза. Во избежание ошибки в формулах (7) — (19) величина дебита заменена ее значением по формуле И. Козени, так как все формулы определения промежутка высачивания выведены, исходя из формулы (1) и, следовательно, с позиции второй теории И. Козени [21].

Формула (1) выведена из ряда неверных предпосылок. Главная из них [12] в том, что И. Козени дифференцировал напорную функцию внутри скважины, т. е. за точкой разрыва функции. Эта ошибка прочно вошла во все работы по теории фильтрации грунтовых и артезианских вод и нефти. Гидромеханики и гидрогеологи при интегрировании дифференциальных уравнений фильтрации и изменении напорной функции между крайними границами пористой среды за пределы изменения функции берут ее значения вне пористой среды, т. е. за границами разрыва, где эта функция уже не существует. С этой точки зрения теоретические решения М. Маскета, П. Я. Полубариновой-Кочиной, В. Н. Щелкачева, И. А. Чарного, Н. Н. Веригина и других исследователей подтверждают точность формулы (2).

Проанализируем результаты расчетов величины Δh по формулам (7) — (19).

Как видно из рис. 2, формулы (7), (11), (14) выражают прямую зависимость Δh от h_c , в действительности же существует обратная зависимость между этими величинами [2, 3, 4, 5, 11, 14].

Заметим, что при замене в формуле И. С. Лазаревича величины дебита ее значением по формуле И. Козени (когда h_c изменяется от 0 до H) радикал уменьшается от $2,06 H$ до $2,00 H$ и может быть принят равным $2H$. В этом случае зависимости Δh от h_c , рассчитанные по формулам (19) и (10), совпадают. Формула Эренбергера — Лазаревича также не учитывает ряда основных параметров (r_c , k , Q , R), от которых зависит величина промежутка высачивания. Формулы (7), (11), (14) имеют общий вид

$$\Delta h = \varphi(h_c, H). \quad (20)$$

Формулы (15), (17), (18) в общем дают одинаковые зависимости величины промежутков высачивания и имеют общий вид

$$\Delta h = \psi(h_c, H, r_c, Q, k). \quad (21)$$

Они не учитывают сопротивления фильтра и радиуса влияния R (в формуле (18), кроме того, отсутствует вторая величина из граничных условий потока — мощность потока на контуре питания H).

Несмотря на то, что формулы (20) и (21) совершенно различны, они дают результаты, близкие к результатам формулы Эренбергера — Лазаревича, а для малых значений h_c — формулы В. С. Оводова. Однако, по нашим данным, наиболее верный расчет промежутка высачивания дает формула И. А. Чарного [15].

Часто указывают на относительно хорошую сходимость лабораторных и расчетных данных по формулам типа (20) и (21). Это объясняется тем, что формулы (20) и (21) выведены в общем из одних и тех же рассмотренных выше ошибочных предпосылок и противоречивой формулы И. Козени, а лабораторные опыты практически проводят в одинаковых условиях (при неподвижном контуре питания и незначительных постоянных

во времени и примерно равных величинах сопротивления моделей фильтров).

Таким образом, существующие формулы определения промежутка высачивания находят (или могут найти) себе подтверждение главным образом в отдельных опытах и на определенной модели (например, на электролитической или песчаной и т. д.). В действительности, как известно, величина R возрастает с увеличением понижения уровня, сопротивление фильтров значительно, различно у каждой скважины и в различных гидрогеологических условиях, а также изменяется во времени. Поэтому формулы (7), (10), (11), (13)—(15), (17)—(19) не могут дать пригодных для практики результатов. Формулы (6), (12) и (16) были бы здесь исключением, если их привести к виду, пригодному для практики.

Таким образом, исследования П. А. Киселева, С. К. Абрамова, И. Петерсона и других указывают путь к решению поставленной задачи. Это решение, представляемое в неявном виде, может быть получено и из приведенного выше анализа существующих формул и параметров, от которых зависит величина промежутка высачивания. Действительно, если считать доказанным, что $\Delta h_{\max} = \frac{H}{2}$ и зависимость Δh от S_c является параболической, то существующие формулы можно представить обобщенно

$$\Delta h = \frac{S_c^\alpha}{2H^{\alpha-1}}, \quad (22)$$

где $\alpha = f(\eta, Q, k, r_c, R)$;

η — гидравлическое сопротивление фильтра.

Величина α , очевидно, постоянна для определенных конструкций фильтров и гидрогеологических условий. Поэтому формула (12) применима после предварительного экспериментального расчета коэффициента α в тех или иных условиях практики. Формула (22) является обобщенной: при $\alpha = 1$ она соответствует типу (20), при $\alpha = 2$ — типу (21).

На основе приведенных выводов нами получены новые формулы определения промежутка высачивания Δh , промежутка нависания ΔH (в грунтовых дренах с затопленным фильтром) и пьезометрического разрыва ΔS . Они достаточно обоснованы и более точны по сравнению с существующими.

При фиксированных значениях h_c . Безнапорная фильтрация:
в скважине

$$\Delta h = \sqrt{h_{\Pi}^2 \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{r_{\Pi}}{r_0}} - h_c; \quad (23)$$

в галлерее

$$\Delta h = \sqrt{h_{\Pi}^2 - \frac{q}{k} 2r_{\Pi}} - h_c; \quad (24)$$

напорная фильтрация:

в скважине

$$\Delta S = S_c - S_{\Pi} - \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{r_{\Pi}}{r_0}; \quad (25)$$

в галлерее

$$\Delta S = S_c - S_{\Pi} - \frac{q}{km} r_{\Pi}, \quad (26)$$

где q — единичный расход галлерей;

h_{Π} и S_{Π} — соответственно мощность потока и понижение уровня на расстоянии r_{Π} от оси скважины или стенки галлерей;

km — проводимость пласта.

Формулы (23) — (26) применимы как для совершенных и несовершенных дрен, так и для дрен с фильтрами или без них.

Когда скважина не оборудована фильтром или проницаемость фильтра не меньше проницаемости пласта (при проведении лабораторных опытов), формула (30) принимает вид

$$\Delta h = (1 - n) \left(\sqrt{\frac{H^2 \ln P + h_c^2 \ln \frac{R}{r_0}}{\ln P + \ln \frac{R}{r_0}}} - h_c \right), \quad (34)$$

где n — активная пористость пласта.

По формулам (20) и (24) можно также рассчитать промежуток высачивания у стенок несовершенных скважин с незатопленным фильтром и закрытым дном (т. е. при отсутствии донного притока). В этом случае величина H принимается равной расстоянию от статического уровня до нижней границы перфорированной колонны фильтра (рис. 1).

Аналогично выводятся формулы для промежутка нависания ΔH и пьезометрического разрыва ΔS (табл. 1).

Таблица 1

Выведенные формулы определения промежутка высачивания, промежутка нависания и пьезометрического разрыва

С фильтром $k_{\Phi} < k$	Без фильтра $k_{\Phi} \geq k$
Напорная фильтрация	
Артезианская совершенная, артезианская несовершенная с закрытым дном, грунтовая с затопленным фильтром и закрытым дном (рис. 4): галерея	
$\Delta S = \Delta H = (1 - n_{\Phi}) \frac{qh_0 S_0}{k_{\Phi} m R} =$ $= (1 - n_{\Phi}) \frac{qh_0 S_0^2}{k_{\Phi} R^2}$	$\Delta S = \Delta H = (1 - n) \frac{qh_0 S_0}{km R} =$ $= (1 - n) \frac{h_0 S_0^2}{R^2}$
скважина	
$\Delta S = \Delta H = (1 - n_{\Phi}) S_0 \times$ $\times \frac{k \ln \left(\frac{Qh_0}{2\pi k m r_0^2} + 1 \right)}{k_{\Phi} \ln \frac{R}{r_0}}$	$\Delta S = \Delta H = (1 - n) S_0 \times$ $\times \frac{\ln \left(\frac{Qh_0}{2\pi k m r_0^2} + 1 \right)}{\ln \frac{R}{r_0}}$
Безнапорная фильтрация	
Совершенная, несовершенная с незатопленным фильтром и закрытым дном (рис. 1): галерея	
$\Delta h = (1 - n_{\Phi}) \sqrt{\frac{qH^2 + k_{\Phi} h_c^2 R}{q + k_{\Phi} R}} - h_c$	$\Delta h = (1 - n) \sqrt{\frac{qH^2 + k h_c^2 R}{q - k R}} - h_c$
скважина	
$\Delta h = (1 - n_{\Phi}) \sqrt{\frac{kH^2 + k_{\Phi} h_c^2 \frac{\ln \frac{R}{r_0}}{\ln P}}{\frac{\ln \frac{R}{r_0}}{k + k_{\Phi} \frac{\ln \frac{R}{r_0}}{\ln P}}} - h_c}$	$\Delta h = (1 - n) \sqrt{\frac{H^2 + h_c^2 \frac{\ln \frac{R}{r_0}}{\ln P}}{\frac{\ln \frac{R}{r_0}}{\ln P} + 1}} - h_c$
$P = \frac{Q}{2\pi k r_0^2} + 1$	

Вывод формул определения промежутка нависания основан на факте, обнаруженном нами при лабораторных и полевых исследованиях: дрена с затопленным фильтром и закрытым дном работают как артезианские.

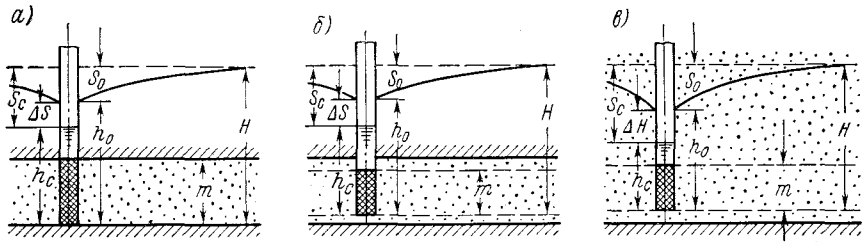


Рис. 4. Расчетные схемы для определения пьезометрического разрыва и промежутка нависания по формулам табл. 1: а — артезианская совершенная дрена; б — артезианская несовершенная дрена с закрытым дном; в — грунтовая несовершенная дрена с затопленным фильтром и закрытым дном.

Сравнение результатов расчета по существующим формулам и предлагаемым (табл. 2) свидетельствует о высокой точности формул (23) и (31) и, естественно, остальных, полученных тем же методом.

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных величин $\frac{\Delta h}{H}$

Номер опыта	$\frac{h_c}{H}$	$Q, \text{ см}^3/\text{сек}$	$\frac{\Delta h}{H}^*$ опытное (по Козени [20])	$\frac{\Delta h}{H}$, рассчитанное по формулам						По формулам	
				(10), (19)	(11)	(14)	(15)	(17)	(18)	(23)	(31)
2	0.83	354	0.04	0.01	0.08	-0.02	0.01	0.11	0.5	0.06	0.04
	0.67	622	0.09	0.06	0.17	0.14	0.06	0.28	0.9	0.13	0.11
	0.50	829	0.17	0.13	0.25	0.30	0.13	0.54	1.3	0.21	0.19
	0.32	1030	0.28	0.23	0.34	0.47	0.23	0.86	1.7	0.31	0.28
	0.17	1126	0.39	0.34	0.42	0.62	0.35	1.16	1.9	0.40	0.35
4	0.83	236	0.06	0.01	0.09	-0.02	0.06	0.10	0.5	0.07	0.06
	0.69	410	0.12	0.05	0.16	0.12	0.12	0.24	0.9	0.12	0.11
	0.53	582	0.20	0.11	0.24	0.27	0.22	0.48	1.3	0.18	0.18
	0.47	621	0.24	0.14	0.27	0.33	0.26	0.55	1.4	0.22	0.21

* Для апробирования формул (23) и (31) использованы опыты А. П. Коротева [11, 12], которые проведены в круглом фильтрационном лотке при $k=0,07 \text{ см/сек}$; $n=0,37$; $R=139 \text{ см}$; $H=118 \text{ см}$. Во втором опыте $r_c=10,45 \text{ см}$, в четвертом $r_c=3,45 \text{ см}$.

Выводы

1. Напорные функции непрерывны только в пределах области фильтрации, однородной по проницаемости. На границах между средами с различной проницаемостью и в какой-то части пласта, примыкающей к этим границам, они терпят разрыв. Поэтому при интегрировании дифференциальных уравнений теории фильтрации крайними пределами изменения напорной функции могут быть значения функции только в данной пористой среде вблизи области разрыва функции. В частности, в формулах Дюпюи, учитывающих крайние пределы изменения напора, эти пределы представляют собой значения напоров на внешних стенках дрена. Следовательно, формулы Дюпюи учитывают промежуток высачивания и пьезометрический разрыв и являются точными как при определении осесимметричного расхода потока (или теоретического дебита дрена), так и при расчете депрессионной поверхности.

2. В артезианских скважинах также существует пьезометрический разрыв ΔS между уровнем жидкости внутри и по внешней стенке скважины. Зависимость между ΔS и S_c прямолинейна и аналогична зависимости ΔH от S_c .

3. Определение промежутка высачивания, промежутка нависания и пьезометрического разрыва в природных условиях возможно только при одновременном учете сопротивления фильтра и его изменчивости во времени, параметров пласта, потока и скважины и граничных условий в пласте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов С. К. Гидрогеологические расчеты вертикальных дренажей при осушении угольных месторождений. Углетехиздат, 1955.
2. Абрамов С. К., Селюк Е. М. К вопросу о расчете участка выхода воды в береговые дрены. Тр. Лаб. инж. гидрогеол. ВОДГЕО, сб. 4, 1962.
3. Альтовский М. Е., Разин К. И. О разрыве уровня воды у грунтовых колодцев. Тр. Гидрогеол. лаборатории ВОДГЕО, сб. 1, 1941.
4. Аравин В. И. Приток грунтовых вод к водозаборным совершенным колодцам. Изв. ВНИИГ, т. 46, 1951.
5. Аравин В. И. Экспериментальные исследования осесимметричных грунтовых потоков методом вязкостной аналогии. В кн. «Новые методы измерений и приборы для гидравлических исследований». Изд-во АН СССР, 1961.
6. Беляков В. М. Лабораторные испытания гравийных фильтров в напорных условиях. «Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнич. сооружений», ВОДГЕО, сб. 4, 1964.
7. Бессонов Н. Д. Исследования явлений суффозии и кольматации в фильтрах блочного типа из пористых материалов. Тр. Лаб. инж. гидрогеол. ВОДГЕО, сб. 5, 1963.
8. Володько И. Ф. Зависимость дебита скважин от их диаметров и величины понижения. Водоснабжение и сантехника, 1936, № 5.
9. Гаврилко В. М. Фильтры водозаборных, водопонижительных и гидрогеологических скважин. Госстройиздат, 1961.
10. Гиринский Н. К. Определение коэффициента фильтрации. Гостеоллиздат, 1950.
11. Коротеев А. П. Зависимость дебита колодца от его радиуса. Разведка недр, № 1, 1938.
12. Кусакин И. П. Искусственное понижение уровня грунтовых вод. ОНТИ, 1935.
13. Лазаревич И. С. Безнапорное движение жидкости к одиночной скважине (перемычке). ВИНТИ, 1961.
14. Трофименков Ю. Г. Расчет водозаборных скважин с учетом промежутка высачивания. Сб. «Опыт искусственного понижения уровня грунтовых вод». Госэнергоиздат, 1956.
15. Чарный И. А. О величине промежутка высачивания при безнапорной фильтрации. ДАН СССР, т. 80, № 1, 1951.
16. Чарный И. А. Расчет промежутка высачивания при безнапорном притоке к совершенным и несовершенным скважинам. Тр. МНИ им. Губкина, т. 14, 1956.
17. Шестаков В. М. Определение участка высачивания потока в скважину. Изв. ОТН АН СССР, № 1, 1959.
18. Шестаков В. М. Сб. «Вопросы фильтрационного расчета совершенных и несовершенных скважин». Тр. Лаборатории инж. гидрогеологии ВОДГЕО, сб. 3, 1960.
19. Кислялёв П. А. Уравнение безнапорного притока к скважине с учетом промежутка высачивания. Вестн АН БССР, N 2, 1949.
20. Kozeny J. Wasserkraft u. Wasserwirtschaft, H. 8—10, 1927.
21. Kozeny J. Wasserkraft u. Wasserwirtschaft, H. 8—10, 1933.