

ПРИМЕНЕНИЕ ЛУЧЕВЫХ ДРЕНАЖЕЙ ДЛЯ ОСУШЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ В РАЗРЕЗЕ ТОЛЩ ГОРНЫХ ПОРОД

**А.А. Воронин¹,
Ю.В. Пономаренко²**

¹ Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет, Россия, 308015,
г. Белгород, ул. Победы 85

E-mail: alevmin@rambler.ru

² Всероссийский научно-
исследовательский институт по
осушению месторождений
полезных ископаемых,
защите инженерных сооружений
от обводнения, специальным
горным работам, геомеханике,
геофизике, гидротехнике, геологии и
маркшейдерскому делу,
Россия, 308007, г. Белгород,
ул. Б. Хмельницкого, 86

E-mail: viogem@mail.belgorod.ru

Рассмотрены основные расчетные схемы обводненных толщ горных пород. Приведено описание применения комбинированной многоярусной системы защиты от подтопления на примере дренажной системы дворца спорта «Космос» в г. Белгород. Выполнен анализ проблем осушения трещиноватого массива горных пород и обоснована система многоярусного лучевого дренажа с учетом функциональной зависимости водопроницаемости пород от вертикальной координаты.

Ключевые слова: слоистое строение обводненной толщи, трещиноватый массив, лучевые дренажные скважины, расчётные схемы обводненных толщ, многоярусный дренаж.

Введение

С освоением глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых и защитой подтопленных территорий все чаще возникают задачи по осушению породных массивов неоднородных в разрезе. Слоистое строение обводненной толщи или развитие трещиноватых пород характерны для большинства месторождений и подтопленных территорий.

При этом важно подчеркнуть, что для трещиноватого массива характерно интенсивное затухание его проницаемости с глубиной, которое описывается экспоненциальной функцией вертикальной координаты, имеющей вид [1]

$$\kappa(z) = \kappa_0 e^{-\beta z / m}, \quad (1)$$

где κ_0 – значение коэффициента фильтрации у кровли трещиноватого пласта ($z=0$), м/сут; e – основание натурального логарифма; m (или h) – мощность трещиноватых пород (или глубина грунтового потока), м; z – вертикальная координата, м; β – безразмерная постоянная, характеризующая интенсивность снижения коэффициента фильтрации пород по глубине.

При решении практических задач трещиноватую толщу часто представляют в виде трех или более слоев со средними значениями водопроницаемости. Разбивка трещиноватого массива на слои выполняется в соответствии известными в гидрогеологии правилами осреднения фильтрационных характеристик.

В соответствии с геолого-структурными особенностями дренируемых территорий для дальнейшего рассмотрения выделены следующие наиболее часто встречающиеся расчетные схемы:

- 1) двухслойный пласт, состоящий из основного хорошо проницаемого пласта, перекрытого слабопроницаемым слоем, например обводненными сутлинками, имеющими весьма широкое распространение на территории России (рис. 1);
- 2) схема двух или нескольких гидравлически независимых водоносных горизонтов, разделенных водоупорными слоями (рис. 2);
- 3) схема трещиноватого пласта с убывающей по глубине водопроницаемостью (рис. 3).

Значительные технические трудности всегда сопутствуют осушению водоносных толщ, содержащих два или более водоносных горизонта. В тех случаях, когда нижний горизонт характеризуется хорошей водопроницаемостью в сравнении с обводненными вышележащими пластами, целесообразно использовать комбинированную схему осушения, которая включает

лучевой дренаж в нижнем горизонте и систему водопоглощающих скважин на верхние горизонты.

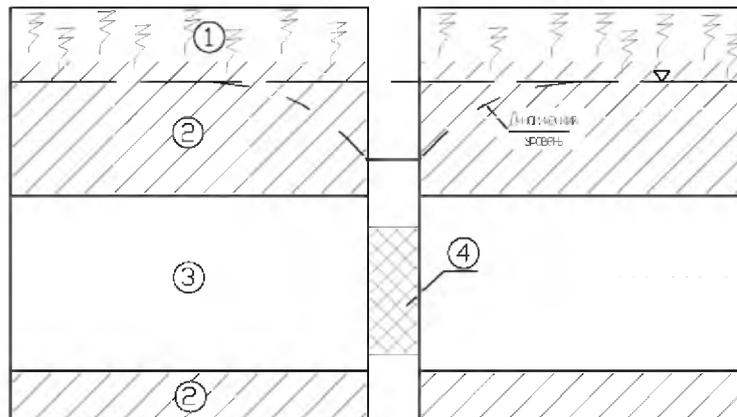


Рис. 1. Расчетная схема для двухслойной толщи обводненных пород:
1 – почвенно-растительный слой; 2 – породы с низкими фильтрационными свойствами;
3 – обводненные породы; 4 – водопонижающая скважина

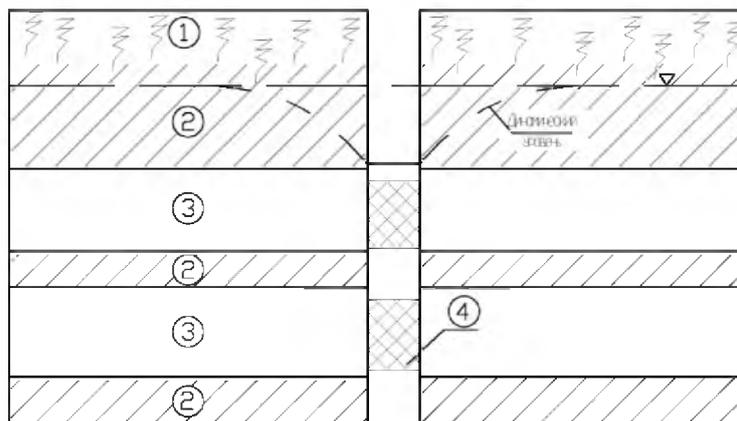


Рис. 2. Расчетная схема для многослойной толщи обводненных пород:
1 – почвенно-растительный слой; 2 – породы с низкими фильтрационными свойствами;
3 – обводненные породы; 4 – водопонижающая скважина

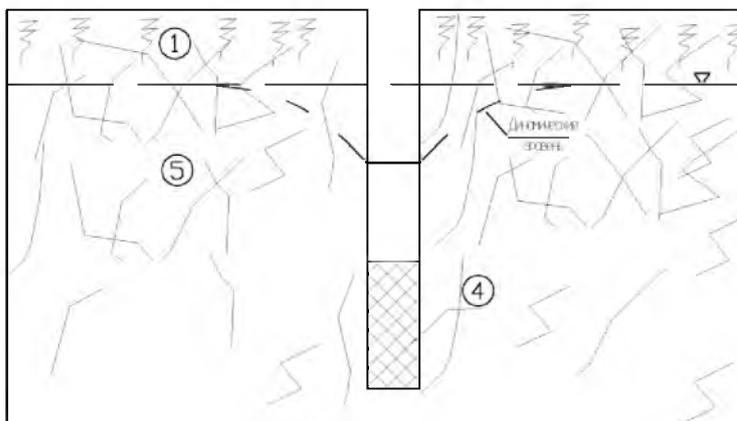


Рис. 3. Расчетная схема для трещиноватой толщи обводненных пород:
1 – почвенно-растительный слой; 4 – водопонижающая скважина; 5 – трещиноватые породы

Здесь следует подчеркнуть, что применение поглощающих скважин особенно перспективно при осушении водоносных слоев, ограниченных по мощности, в которых использование водопонижающих скважин практически не целесообразно. Следует также



иметь в виду, что при сооружении водопоглощающих скважин необходимо предъявлять высокие требования к конструкциям скважин и фильтров как в водопоглощающих пластах так и дренируемых водоносных горизонтах, что должно исключать обводнение отложений, расположенных между дренируемым и поглощающим горизонтами.

Помимо требований к фильтрам, успешное применение поглощающих скважин определяется рядом гидродинамических условий:

- 1) напор воды в поглощающем горизонте всегда должен быть ниже, чем в дренируемых, что необходимо для возникновения потока вод из дренируемых в поглощающие водоносные горизонты;
- 2) проводимость поглощающего горизонта должна быть больше суммы проводимостей дренируемых слоев, то есть

$$K_{II}m_{II} > K_1m_1 + K_2m_2 + \dots + K_nm_n, \tag{2}$$

где K_{II} и m_{II} – коэффициенты фильтрации и мощность поглощающего горизонта; K_1, K_2, K_n и m_1, m_2, m_n – соответственно коэффициенты фильтрации и мощности дренируемых слоев.

Первое ограничение, то есть существование необходимой разности напоров, на практике сравнительно легко может быть преодолено путем предварительного ввода в эксплуатацию лучевого дренажа в поглощающем горизонте, или посредством его усилия дополнительными водопонижающими скважинами.

При проведении фильтрационных расчетов принимается, что расходы дренируемого Q_1 и поглощающего Q_2 горизонтов приблизительно равны между собой. Также полагается, что коэффициенты пьезопроводности (уровнепроводности) дренируемого и поглощающего пласта примерно равновелико $a_1 \approx a_2 = a$; $S_1 + S_2 = H_{1e} - H_{2e} = y_0$.

При этих условиях понижение напора (уровня вод) в дренируемом горизонте 1 определяется по формуле:

$$S_1 = \frac{v_2 y_0}{(1+v_2)} \times \frac{E_i(-u)}{\ln 2.25 f_0}, \tag{3}$$

а повышение уровня воды в поглощающем горизонте по формуле:

$$S_2 = \frac{y_0}{(1+v_2)} \times \frac{E_i(-u)}{\ln 2.25 f_0}, \tag{4}$$

в которых $v_2 = T_2 / T_1$; $u = r^2 / 4at$; $f_0 = at / r_0^2$; $T_1 = k_1 m_1$; $T_2 = k_2 m_2$; r_0 – приведенный радиус скважины, м.

Количество воды, вытекающей из горизонта 1 и поглощаемой горизонтом 2, вычисляется по формуле:

$$Q_1 = Q_2 = \frac{2\pi T_0 y_0}{(1+v_2)} \times G(f_0) \approx \frac{2\pi T_0 y_0}{(1+v_2)} \times \frac{1}{2.25 f_0} \tag{5}$$

Таблицы значений функций $E_i(-u)$ и $G(f_0)$ приведены в Справочнике [2].

В качестве примера успешного применения комбинированной многоярусной системы защиты от подтопления ниже приводится описание дренажной системы дворца спорта (ДС) «Космос» в г. Белгороде (рис. 4).

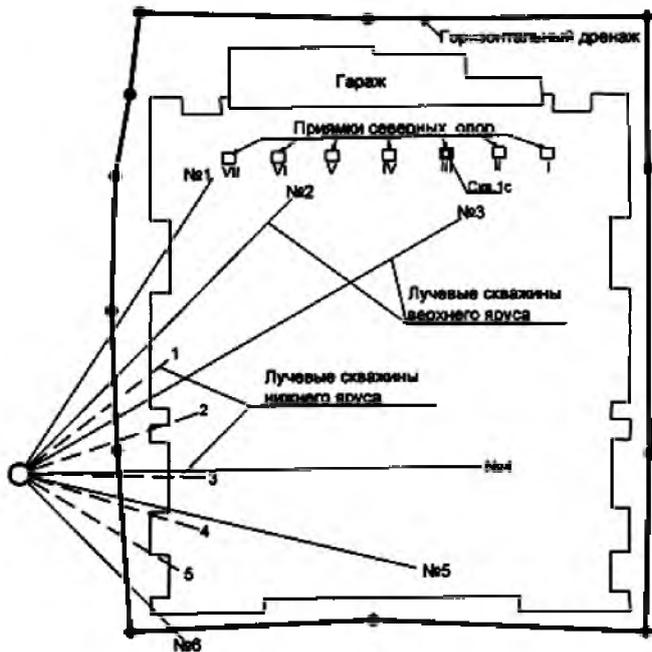


Рис. 4. Схема дренажа ДС «Космос»

ДС «Космос» расположен в южном микрорайоне г. Белгорода на водораздельном пространстве. В геологическом строении верхней части разреза принимают участие палеоген-неогеновые и четвертичные



отложения, представленные глинами с прослоями мелкозернистых и пылеватых песков. Кровля глин залегает на глубине 4.5–10.4 м. Прослой песков мощностью до 4 м встречены на глубине 5.7–10.0 м. Неогеновые и четвертичные отложения представлены суглинками, перекрытыми растительным слоем. Мощность четвертичных отложений составляет 1.2–3.7 м. Палеоген-неогеновые и четвертичные образования обводнены.

Водонасыщенные грунты характеризуются низкими значениями водопроницаемости. Коэффициенты фильтрации суглинков лежат в пределах от 0.017 до 0.25 м/сут, для песков он изменяется от 0.1 до 1.5 м/сут.

До начала строительства ДС уровни воды находились на глубинах 5.2–8.0 м. В период эксплуатации дворца уровни вод повысились на 3–4 м, образовав под зданием купол растекания.

Масштабы сооружения, сложность гидрогеологических условий и особенности питания грунтовых вод в период эксплуатации дворца предопределили трудности решения задачи по защите здания от подтопления.

При проектировании дворца спорта проектировщики для защиты от подтопления заложили контурный траншейный дренаж закрытого типа. После завершения строительства и ввода в эксплуатацию объекта, стало очевидным, что выполненная система дренажа не обеспечивает сколько-нибудь заметного снижения уровня вод. К причинам сложившегося положения специалисты отнесли наличие внутренних источников инфильтрационного питания грунтовых вод за счет перелива оборотной воды из емкостей для ее сбора, дождевых и талых вод с огромной площади кровли дворца, конденсации влаги на холодильном оборудовании, тепловлагопереноса под ледовым полем, таяния льда при зачистке катка и других утечек из водонесущих коммуникаций. В результате здание дворца оказалось полностью подтопленным, при этом наибольшую угрозу представляло подтопление главных опор шатровой конструкции дворца. Тогда было принято решение о сооружении двухъярусного лучевого дренажа, расположенного с западной стороны здания.

Гидродинамическое обоснование двухъярусной системы выполнялось по известной методике с использованием компьютерной технологии численного моделирования.

Фактически был пройден ствол диаметром 4 м в свету, 6 лучевых скважин первого яруса в суглинках и 5 скважин второго нижнего яруса в палеогеновых песках. Скважины первого яруса были заложены на глубине от 6.73 м до 6.88 м, длиной от 70 до 100 м.

Скважины второго яруса были сооружены на глубине от 9.62 м до 9.67 м длиной около 50 м, сброс дренажных вод осуществлялся в городскую ливневую канализацию.

По данным режимных наблюдений за изменением уровня грунтовых вод под влиянием работы лучевого дренажа было установлено, что его дренажное действие положительно сказалось в западной части здания. Восточная и северная части дворца и в первую очередь прямки арочных опор оказались не осушенными. Причинами отмеченного являлись весьма низкая водопроницаемость несущих суглинков (в среднем 0.062 м/сут) и активная восполняемость грунтовых вод за счет техногенных факторов. Очевидно, условия инфильтрационного питания грунтовых вод на площади дворца не были учтены в полной мере. В этой ситуации ФГУП ВИОГЕМ предложил усилить дренажную систему посредством сооружения у арочных опор водопоглощающих скважин для сброса вод, содержащихся в суглинках и песчаных подушках под прямыми опорами в палеоген-неогеновые пески.

Опытные работы были проведены в прямой наиболее обводненной опоре №3.

Бурение водопоглощающей скважины диаметром 127 мм осуществлялось из подвального помещения непосредственно через бетонное дно прямой, песчаную подушку и обводненные суглинки. Скважина заглублялась в водоносные пески на 1 м, после чего оборудовалась фильтрами на верхний и нижний водоносные горизонты. Общая глубина водопоглощающей скважины составила 4 м. Установке фильтров предшествовали довольно объемные гидравлические испытания семи образцов фильтров, которые оценивались по их устойчивости при работе в агрессивных водах и способности предотвращения суффозионного выноса. По результатам выполненных исследований для установки водопоглощающих скважин были рекомендованы пластмассовые конструкции с волокнисто-пористой оболочкой.

Сооружение скважины позволило осушить прямку опоры №3 и снизить уровень воды в суглинках до безопасного положения. В целом за 1.5 года эксплуатации дренажной системы уровень грунтовых вод был понижен на 0.7–1.3 м.

Пожалуй, наиболее сложно решается задача осушения трещиноватого массива горных пород. Проблема состоит в том, что применение дренажных устройств вертикального типа, вскрывающих полную мощность трещиноватого пласта, не позволяет осушить нижнюю, менее проницаемую часть пласта, в одинаковых временных темпах. В этих условиях всегда



наблюдается существенное отставание снижения уровней в нижней зоне пласта. Очевидно, чтобы получить одинаковые размеры осушенных зон на всех глубинах одновременно, необходимо применять многоярусные лучевые дренажи. С этой целью трещиноватый массив представляют в виде слоистой толщи, включающей, обычно, три однородных слоя со средней проницаемостью. Выделение слоев производят в соответствии с требованиями осреднения проницаемости пород в разрезе, то есть соотношения проницаемости на верхней и нижней границах каждого слоя не должны превышать 10 [3].

Средневзвешенное значение коэффициента фильтрации по пласту определяется интегралом:

$$K_{cp} = \frac{1}{m} \int_0^m k(z) dz \quad (6)$$

Поскольку изменение проницаемости трещиноватых пород с глубиной описывается экспоненциальной функцией вида (1)

$$K_{cp} = \frac{K_0}{\beta} (1 - e^{-\beta}) \quad (7)$$

Среднее значение коэффициента фильтрации для каждой из выделенных зон рассчитывается по формуле:

$$K_{cp} = \frac{1}{c-b} \int_b^c k(z) dz \quad (8)$$

В (8) обозначены:

b – координата кровли выделенного слоя;

c – координата почвы слоя, соответственно мощность выделенного слоя будет равна

$$m_i = c_i - b_i, \quad (9)$$

где i – номер слоя $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Положение кровли (b_i) и почвы (c_i) выделенных слоев назначаются в соответствии с кривой $K(z)$. При этом параметры лучевых дренажей, длина лучевых скважин и их количество, размещаемых в каждом слое, определяются по предлагаемой ниже методике, учитывающей фильтрационные особенности трещиноватого массива.

В общем случае размеры в плане осушенной зоны трещиноватого пласта определяются длиной лучевых скважин l и радиусом их влияния $R(t)$, то есть радиус осушенного участка пласта на момент времени t будет равен $l+R(t)$ [4],

$$\text{где } R(t) = 1.5 \sqrt{at} \quad (10)$$

Для напорного пласта

$$a = \frac{k(z)}{\beta^*} \quad (11)$$

$$\beta^* = n \beta_{ж} + \beta_c, \quad (12)$$

для безнапорного потока

$$a_y = \frac{k(z) h_{cp}}{\mu}, \quad (13)$$

n – трещинная пористость горных пород;

$\beta_{ж}$ – коэффициент сжимаемости жидкости;

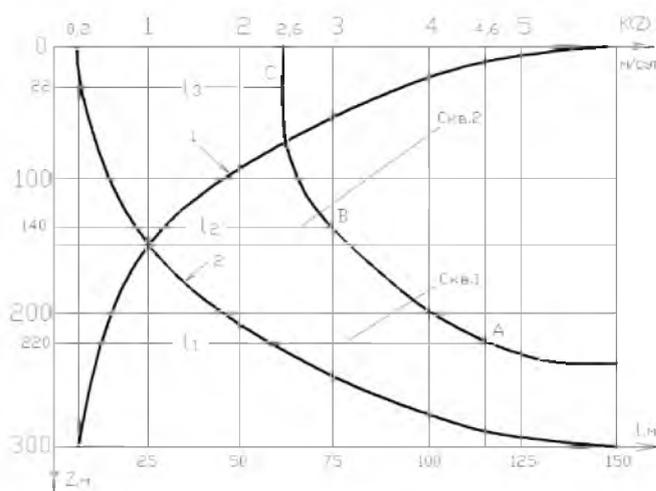
β_c – коэффициент объемной упругости среды (горной породы);

h_{cp} – среднее значение глубины грунтового потока;

μ – коэффициент водоотдачи.

Из (11)–(13) следует, что $R(t)$ является функцией вертикальной координаты, то есть коэффициента фильтрации выделенных слоев. Последнее означает, что радиус влияния $R(t)$ в верхней части трещиноватого пласта будет иметь максимальные значения и минимальные у почвы пласта – в нижнем выделенном нами слое.

В работе [4] показано, что с уменьшением по глубине водопроницаемости пород длину лучевых дренажных скважин следует увеличивать, в то время как в верхней наиболее проницаемой зоне для достижения такого же дренажного эффекта потребуется сооружение лучевых скважин меньшей длины. Поэтому для достижения равновеликих осушенных зон по глубине необходимо длину лучевых скважин назначать с учетом функциональной зависимости водопроницаемости пород от вертикальной координаты. Для этого, учитывая обратно



пропорциональную связь длины лучевых скважин с коэффициентом фильтрации $k(z)$, кривую 1, описывающую изменение водопроницаемости в разрезе пласта надлежит обернуть на 180° вокруг горизонтальной оси, проведенной через середину пласта, точку $z = m / 2$ и получить кривую 2 (рис. 5).

Рис. 5. Кривая для определения длины лучевых скважин

В первую очередь устанавливают длину лучевой скважины в самом нижнем слое пласта, где дренажные скважины должны иметь максимальную протяженность, которая в большинстве случаев определяется технической возможностью имеющегося бурового оборудования.

Для назначения длины лучевых скважин на верхних ярусах, кривую 2 перемещают вдоль горизонтальной оси ($z = m / 2$) параллельно самой себе, до пересечения с первой скважиной в точке А (забой). В этом случае длина лучевых скважин выше расположенных ярусов ограничивается перемещенной кривой 2 (точки В и С на рис. 5)

Радиусы влияния скважин в каждом слое вычисляются по формуле (10). Дренажные скважины для получения максимального снижения уровней вод закладываются у подошвы дренируемых слоев.

Дальнейший расчет лучевого дренажа для каждого слоя выполняется в следующем порядке.

По соотношению (9) находят мощности выделенных слоев:

$$m_1 = c_1 - b_1 = c_1 - 0;$$

$$m_2 = c_2 - b_2 \quad (b_2 = c_1);$$

$$m_3 = c_3 - b_3 \quad (b_3 = c_2).$$

Средневзвешенные значения коэффициентов фильтрации пород каждого слоя вычисляют по формуле (8).

Дебит лучевого дренажа по каждому слою рассчитывают по формуле «большого колодца»:

$$Q = \frac{2\pi T S}{\ln \frac{R+r}{r}} \tag{14}$$

где T – проводимость выделенного водоносного слоя ($k_i m_i$);

S – понижение уровня вод над дренажной;

r – приведенный радиус «большого колодца», равный $r = \sqrt{\frac{F}{\pi}}$,

F – площадь, ограниченная крайними лучевыми скважинами и линиями, соединяющими их забои;

r – радиус питания, равный $r = \sqrt{\frac{T}{a}}$.

При проведении фильтрационных расчетов каждую лучевую скважину разбивают на 5 равных отрезков длиной Δl_i с заменой каждого из них эквивалентной вертикальной скважиной, располагаемой в середине отрезка.

Затем вычисляют дебит каждой эквивалентной скважины с учетом, что приток воды на один метр длины лучевой скважины с удалением от ее устья увеличивается по линейному закону, то есть:

$$Q_1 = 0.1 \times 2q \Delta l_i;$$

$$Q_2 = 0.3 \times 2q \Delta l_i;$$

$$Q_3 = 0.5 \times 2q \Delta l_i;$$



$$Q_4 = 0.7 \times 2q\Delta l_i;$$

$$Q_5 = 0.9 \times 2q\Delta l_i;$$

где q – дебит, приходящийся на 1 м длины скважины.

После выполнения этих операций вычисление понижения уровня грунтовых вод в любой произвольной точке слоя вычисляется по зависимости:

$$S = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^5 Q_i W_i(u_i, \frac{\rho_{i_2}}{B_i}) \quad (15)$$

где $u_i = r^2 / 4at$;

ρ_i – расстояние от вертикальной скважины до произвольной точки пласта;

B_i – радиус влияния дренажа;

$W(u, \rho_i, B)$ – табулированная функция [1].

В силу принятых общеизвестных допущений о гидродинамической независимости выделенных слоев, о приведенном радиусе «большого колодца» и др., изложенная методика расчета лучевого дренажа является приближенной, но приемлемой для проведения практических расчетов.

В рассматриваемом случае эффективно также применение полого-восстающих лучевых скважин пересекающих мощность выделенного интервала.

В рассматриваемом случае с некоторым приближением получим

$$l_1 + R(t)_1 = l_2 + R(t)_2 = l_3 + R(t)_3 = l_i + R(t)_i, \quad (16)$$

то есть размеры осушенных зон в плане в каждом выделенном слое трещиноватого пласта окажутся практически близкими.

Положительные результаты исследования эффективности лучевых дренажей в различных пластовых условиях позволяют определить параметры комплексных дренажных систем, включающих лучевые дренажи, обеспечить необходимый уровень и равномерность осушения слоистых и трещиноватых массивов горных пород.

Гидродинамическое обоснование систем многоярусных лучевых дренажей в связи с известными математическими трудностями рекомендуется выполнять методами математического моделирования.

Список литературы

1. Гоголева Н.П., Пономаренко Ю.В. Закономерности изменения фильтрационных свойств трещиноватых пород по глубине // Советская геология. – 1971. – №12. – С. 104–107.
2. Болотских Н.С., Кузькин В.С., Пономаренко Ю.В. Справочник по осушению горных пород. – М.: Недра, 1984. – 576 с.
3. Основы гидрогеологических расчетов / Ф.М. Бочеввер, И.В. Гармонов, А.В. Лебедев, В.М. Шестаков. – М.: Недра, 1965. – 307 с.
4. Шелкачев В.Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 215 с.

APPLICATION OF RADIAL DRAINAGES TO DRAIN HETEROGENEOUS ROCK MASS

A.A. Voronin¹, U.V Ponomarenko²

¹ Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

E-mail: alevmin@rambler.ru

² OAO VIOGEM, B. 86 Khmel'nitsky St, Belgorod, 308007, Russia

E-mail: viogem@mail.belgorod.ru

The basic calculation schemes of watered strata of rocks were considered. The description of using combined multi-tier system of protection against flooding on the example of the drainage system of the Palace of Sports "Kosmos" in Belgorod was given. The analysis of the problems of drainage of crumbling rock mass was made and the many-tier system of radial drainholes, taking into account the functional dependence of the water permeability of rocks on the vertical coordinate, was justified.

Key words: layered structure of watered strata, crumbling rock mass, radial drainholes, calculation schemes of watered strata, many-tier drainage.