

## ХАРАКТЕРИСТИКА ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ГРУНТАХ

*Кумеев Сергей Сергеевич*, доктор геолого-минералогических наук, профессор

Калмыцкий государственный университет  
358000, Российская Федерация, Республика Калмыкия, г. Элиста, ул. Сусеева, 4  
E-mail: pgs-kgu@yandex.ru

*Дорджиев Анатолий Григорьевич*, кандидат технических наук, доцент

Калмыцкий государственный университет  
358000, Российская Федерация, Республика Калмыкия, г. Элиста, ул. Сусеева, 4  
E-mail: pgs-kgu@yandex.ru

*Сангаджиев Мерген Максимович*, доцент, кандидат геолого-минералогических наук

Калмыцкий государственный университет  
358000, Российская Федерация, Республика Калмыкия, г. Элиста, ул. Сусеева, 4  
E-mail: pgs-kgu@yandex.ru

*Дорджиев Анатолий Анатольевич*, ассистент

Калмыцкий государственный университет  
358000, Российская Федерация, Республика Калмыкия, г. Элиста, ул. Сусеева, 4  
E-mail: pgs-kgu@yandex.ru

Современный процесс урбанизация территорий коренным образом изменяет естественный водный режим поверхностных и подземных вод. В большинстве случаев происходит увеличения инфильтрационного питания подземных вод, приводящие к подтоплению застроенных территорий. Процесс подтопления можно разделить на три стадии: это увеличение влажности грунтов зоны аэрации, большой подъем подземных вод до критических отметок и подъем подземных вод выше критических отметок. В работе рассмотрены вопросы фильтрации жидкости в слабопроницаемых грунтах и влагоперенос в зоне неполного насыщения. Описана проницаемость глинистых пород и рассмотрены теоретические современные вопросы их определения. Представленные рассматриваемые вопросы влагопереноса в ненасыщенной зоне от разных факторов. Дана полная характеристика лессовых просадочных грунтов в связи с перспективами роста объемов водохозяйственного строительства и подтоплением застроенных территории города Элиста, Республики Калмыкия. Представлены лабораторные и полевые работы, методы определения водонепроницаемых лессовых просадочных грунтов. Определены факторы нагрузки и получены характеристики их влияния. Предложен метод физического моделирования на образцах грунта ненарушенной структуры. Получены значения коэффициентов фильтрации лессовых просадочных грунтов.

**Ключевые слова:** фильтрация, слабопроницаемые, грунты, слой, подтапливание, лабораторные методы, защемленный воздух, нагрузка, просадочные, влагоперенос.

**THE CHARACTERISTIC OF FLUID FILTRATION  
IN THE WEAK-PERMEABLE SOILS**

**Kumeev Sergey S.**, D.Sc. in Geology and Mineralogy, Professor

Kalmyk State University  
4 Suseev st., Elista, Republic of Kalmykia, Russian Federation, 358000  
E-mail: pgs-kgu@yandex.ru

**Dordzhiev Anatoliy G.**, C.Sc. in Technology, Associate Professor

Kalmyk State University  
4 Suseev st., Elista, Republic of Kalmykia, Russian Federation, 358000  
E-mail: pgs-kgu@yandex.ru

**Sangadzhiev Mergen M.**, C.Sc. in Geology and Mineralogy, Associate Professor

Kalmyk State University  
4 Suseev st., Elista, Republic of Kalmykia, Russian Federation, 358000  
E-mail: pgs-kgu@yandex.ru

**Dordzhiev Anatoliy A.**, Assistant

Kalmyk State University  
4 Suseev st., Elista, Republic of Kalmykia, Russian Federation, 358000  
E-mail: pgs-kgu@yandex.ru

Modern process of urban development are profoundly changing the natural water regime of surface and ground water. In most cases, there is an increase infiltration of groundwater, leading to flooding of developed areas. Flooding process can be divided into three stages: the increase of soil moisture in the aeration zone, a large underground water rise to critical levels and the rise of ground water above critical levels. The paper deals with fluid filtration in low permeable soils and water transfer in the area of incomplete saturation. Described permeability shale and the theoretical issues of the modern definition. Submissions addressed issues of moisture transport in the unsaturated zone on various factors. A complete description of the loess soil subsidence due to the prospects of growth in water infrastructure construction and flooding of the built-up area of the city of Elista, Republic of Kalmykia. Presents laboratory and field work, methods for determining water-tight collapsible loess soils. Identified pressures and characterized based their influence. A method of physical modeling for undisturbed soil samples. The values of the filter coefficients collapsible loess soils. Urban development dramatically alters the natural water regime of surface and ground water. In most cases, there is an increase infiltration of groundwater, leading to flooding of developed areas. Flooding process can be divided into three stages: 1) an increase in soil moisture in the aeration zone, 2) the rise of groundwater to the critical level, 3) the rise of groundwater above the critical level.

Permeability characteristics of the filter media as quantitatively expressed in statutory language filter, which connects the filtration rate  $v$  (the ratio of the flow rate to the area of its cross-section) with a gradient of pressure.

**Key words:** filtration, weak-permeable, soils, layer, flooding, laboratory methods, jammed air, loading, subsiding, humidity transfer.

Урбанизация территорий коренным образом изменяет естественный водный режим поверхностных и подземных вод. В большинстве случаев проис-

ходит увеличения инфильтрационного питания подземных вод, приводящие к подтоплению застроенных территорий. Процесс подтопления можно разделить на три стадии: 1) увеличение влажности грунтов зоны аэрации, 2) подъем подземных вод до критических отметок, 3) подъем подземных вод выше критических отметок.

Проницаемость как характеристика фильтрующей среды количественно выражается при формулировке закона фильтрации, который связывает скорость фильтрации  $v$  (отношение расхода потока к площади его поперечного сечения) с градиентом напора.

При обычно имеющих место малых скоростях фильтрации режим течения является ламинарным и зависимость  $v(I)$  выражается линейным законом Дарси  $v = k_\phi I$ , где:  $k_\phi$  – коэффициент фильтрации, имеющий размерность скорости, при гидрогеологических расчетах он обычно измеряется в метрах в сутки и может определяться как скорость фильтрации при единичном градиенте напора. Величина коэффициента фильтрации зависит от геометрии порового пространства и гидродинамических свойств фильтрующейся жидкости (плотности и вязкости).

При изучении фильтрации жидкостей с переменными гидродинамическими свойствами (в частности, при учете величин плотности и вязкости воды в связи с изменениями минерализации или температуры) вместо коэффициента фильтрации удобнее пользоваться коэффициентом проницаемости  $\bar{k}$ , который не зависит от гидродинамических свойств жидкости и связывается с коэффициентом фильтрации соотношением [9]:  $\bar{k} = k_\phi v / g$ , где  $v$  – коэффициент кинематической вязкости;  $g$  – ускорение свободного падения.

Закон Дарси имеет очень широкую область применения и по праву считается основным законом фильтрации. Вместе с тем существуют условия, при которых закон Дарси нарушается, причем имеют место верхняя и нижняя границы его использования.

Верхняя граница применения закона Дарси проявляется в породах высокой проницаемости при больших скоростях фильтрации. Однако больший и практический интерес представляет анализ аномалий основного закона фильтрации, возникающих при малых скоростях фильтрации, характерных для слабопроницаемых пород. Природу этих аномалий связывают с влиянием сил молекулярного взаимодействия частиц воды и грунтов.

В работах [6, 7, 8] объяснение таких аномалий основывается на представлениях о вязко-пластическом характере течения воды в ультратонких поровых каналах. Рассматривая для анализа закономерностей вязко-пластического режима фильтрации простейшую модель пористой среды, состоящую из одинаковых капиллярных трубок с радиусом  $r_T$ , можно показать, что в этом случае вязкое течение начинается при градиенте напора  $I_0$  определяемом по формуле:

$$I_0 = 2\tau_0 / (\rho g r_T), \quad (1)$$

где  $r_0$  – начальное сопротивление сдвигу в жидкости, которое имеет порядок  $r_0 = 10^{-4}$  МПа;  $\rho$  – плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения.

При  $I > I_0$  основной закон фильтрации описывается уравнением:

$$v = k \left[ I - \frac{4}{3} I_0 + \frac{I_0}{3} \left( \frac{I_0}{I} \right)^3 \right]. \quad (2)$$

Скорость проницаемости глинистых грунтов существенно возрастает (в несколько раз и на порядок) с увеличением температуры. Рост проницаемо-

сти отличается как для пресных, так и для минерализованных (хлоридных и сульфатных) вод. При переменном по величине и направленности температурном режиме фильтрации (смена нагревания породы охлаждением) отмечаются значительные остаточные изменения проницаемости глин, то есть своего рода температурной гистерезис.

Под совместным влиянием роста температуры и концентрации хлоридных растворов и в зависимости от минералогического типа глин коэффициент проницаемости может увеличиться на один - два порядка.

При влагопереносе в зоне неполного насыщения, которая характеризуется отрицательными давлениями в воде, вместо высоты давления используется высота всасывания  $\Psi = -h_p$ , которая связывается с влажностью так называемой влажностной характеристикой [9], обычно хорошо аппроксимируемой кривой вида:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_H} \exp\left(-\frac{\Psi}{H_k}\right), \quad (3)$$

где  $\omega_H$  – влажность насыщения;  $H_k$  – параметр, характерные значения которого (в км) для песка 0,1 – 0,3, супеси 0,5 – 1 и суглинка 1 – 3.

Экспериментальными исследованиями [6, 9] доказано, что при влагопереносе скорость фильтрации определяется законом Дарси, в котором коэффициент фильтрации (влагопереноса)  $K_\phi$  сильно зависит от относительной влажности  $W$ . Теоретический анализ, проведенный [1] и подтвержденный экспериментальными данными, показал, что зависимость  $K_\phi$  от  $W$  имеет степенной характер вида:

$$k_\phi = k_0 \bar{\omega}^n, \quad (4)$$

где  $k_0$  – коэффициент фильтрации при полном водонасыщении (при  $\omega = 1$ ), для показателя степени рекомендуются значения  $n = 3 - 4$ .

Для определения коэффициента фильтрации  $k_\phi$  в зависимости от давления всасывания  $\Psi$  определяется по формуле:

$$k_\phi = k_0 / (1 + a\Psi^m), \quad (5)$$

где  $a$  и  $m$  – параметры, определяемые опытным путем, причем для песков  $m = 2$ , а для тяжелых суглинков  $m = 4$ . Зависимости  $\Psi(\omega)$  и  $k(\omega)$  являются наиболее объективными энергетическими и кинематическими характеристиками поровых вод и поэтому правомерно рассматриваются как основные воднофизические свойства горных пород.

При обосновании расчетных параметров влагопереноса большое значение имеет выявление связей этих параметров между собой и с другими, удобно определяемыми характеристиками пород. С этой целью [8, 7] исследователи используют предположения о том, что породы одинакового генезиса имеют геометрически подобный механический состав и соответственно характеризуются инвариантностью воднофизических свойств, позволяющей считать справедливыми соотношения  $\Psi \sim d_s^{-1}$  и  $k \sim d_s^2$ , где  $d_s$  – эффективный диаметр зерен породы, который рекомендуется считать обратно пропорциональным удельной поверхности частиц. Из выражения  $N = N_0 + N_1 \lg \frac{d_{60}}{d_{10}}$ , где  $N$  – фактор пористости, следует что  $\Psi$  может быть связано с коэффициентом фильтрации соотношением:

$$\psi / \psi_i = \sqrt{k_i / k_\phi},$$

где  $\psi_i$  – всасывающее давление для породы с коэффициентом фильтрации  $k_i$ . При этом для величины  $H_k$  в зависимости (3) будет справедливо соотношение:

$$H_k = A / \sqrt{k_\phi},$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент. Справедливость соотношения (4) и значения коэффициента  $A$  должна в каждом случае устанавливаться экспериментально для каждого генетического типа отложений. Например, для отложений периферической части предгорного склона [7] получено, что величина  $H_k$  связывается с коэффициентом фильтрации соотношением:

$$H_k = A + (B / \sqrt{k_\phi}),$$

где:  $A = 0$  и  $B = 1,5$  при  $k_\phi > 0,15$  м/сут;  $A = 2,8$  и  $B = 0,1$  при  $k_\phi > 0,15$  м/сут;

В связи с перспективами роста объемов водохозяйственного строительства и подтоплением застроенных территорий г. Элисты возникают вопросы изучения проницаемости грунтов.

Методы определения водонепроницаемости можно разделить на две группы – полевые и лабораторные. К первой относятся методы налива: в шурфы, кольца, котлованы, на слой, в скважины; ко второй группе – методы, основанные на применении фильтрационных приборов.

Рассмотрим лабораторные методы определения фильтрационных параметров. В состав лабораторных методов входят методы, основанные на применении фильтрационных приборов разных типов и конструкций. Методика проведения опытов в таких приборах заключается в заполнении образца жидкостью сверху вниз или снизу вверх и фильтрации при постоянном напоре, то есть в стационарных условиях. При этом обычно не контролируется степень насыщения образца породы водой и не фиксируется наличие в ней заземленного воздуха. Известны также компрессионно-фильтрационные приборы, в которых определяется водопроницаемость с учетом влияния нагрузки на образец грунта.

В основу наших исследований процесса фильтрации в грунтах зоны аэрации был положен метод физического моделирования [5], предусматривающий проведение экспериментов на образцах грунта ненарушенной структуры. Экспериментальная установка для изучения проницаемости грунтов содержала устройства, позволяющие насыщать образец сверху или снизу, обеспечить 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 образце. При проведении опытов отбирались пробы фильтрата для выяснения минерализации, определялось количество заземленного в образце воздуха прямыми замерами или по изменению массы образца; измерялась температура подаваемой воды в образце и на выходе из него; в целях контроля за изменением структуры грунта проводились наблюдения за выносом частиц грунта.

К факторам, оказывающим заметное влияние на водопроницаемость грунтов, относятся следующие: способ насыщения образца, который определяет количество заземленного воздуха, содержащегося в образце в начале опыта; нагрузка на образец; продолжительность процесса фильтрации, по-

скольку при большой его длительности на поверхности образцов образуется корка, что приводит к изменению объема заземленного в поровом пространстве воздуха; температура воды, которая обуславливает вынос воздуха из грунта или накопление его в поровом пространстве.

Анализ опытов по определению фильтрационных параметров грунтов и проведенных экспериментальных исследований процесса фильтрации в глинистых грунтах позволяют сформулировать основные требования к проведению испытаний, цель которых является получение значений коэффициента фильтрации грунтов зоны аэрации. Схема проведения опыта должна обеспечивать [3]: одновременность фильтрационного потока в условиях насыщенного и квазинасыщенного состояния грунта; получение информации о количестве заземленного воздуха в грунте; небольшую продолжительность опыта.

Ни один из существующих полевых методов определения водопроницаемости грунтов не удовлетворяет этим требованиям, и практически очень сложно обозначить реальные перспективы их усовершенствования. Лабораторные методы также не удовлетворяют всем перечисленным требованиям, однако, возможностей для их совершенствования несравненно больше.

В процессе опытов изучались лессовые просадочные суглинки, отобранные с площадок в зоне предполагаемого жилищного строительства и аварийных объектов г. Элисты.

Грунты неводонасыщенные представляют многофазную систему. Следовательно, в опытах на проницаемость необходимо учитывать фазы грунта, влияющие на нее (вода, воздух, водорастворимая минеральная часть и др.). Водорастворимые соли, выщелачиваясь при фильтрации воды, увеличивают пористость, которая в то же время снижается под воздействием от собственного веса и приложенной нагрузки. При анализе ранее проведенных исследований четкой закономерности не обнаружено, но на скорость фильтрации воды в грунтах очень сильно влияют химический состав растворителя и его температура: чем агрессивней растворитель и чем больше температура, тем выше скорость.

На проницаемость грунтов существенно влияет нагрузка на образец [2, 4], которая вызывает «закрытие активных пор», «защемление» воздуха, что приводит к снижению коэффициента фильтрации. Коэффициент фильтрации  $K_f$  является показателем водопроницаемости грунтов, то есть показателем их способности фильтровать через себя определенное количество воды в единицу времени.

В лабораторных условиях опыты на фильтрацию нами проводились под арретиром и при постоянном градиенте напора с использованием компрессионно-фильтрационных приборов типа Ф-1 м. При сравнении коэффициентов фильтрации, полученных в режиме нисходящего и восходящего потоков, результаты согласуются в пределах точности экспериментов. Следовательно, предложенная методика может быть использована для определения фильтрационных свойств лессовых просадочных грунтов региона.

Для исследованных лессовых просадочных грунтов после анализа полученных результатов приняты значения  $K_f = 0,40 - 0,42$  м/сутки. Немаловажное значение в величине  $K_f$  играет структура лессового грунта. Как правило, грунты зернистой структуры имеют фильтрационную способность выше, чем у зернисто-агрегативной и тем более агрегативной. Увеличение плотности грунтов уменьшает скорость фильтрации.

Наличие погребенных почвенных горизонтов и горизонтов вторичных карбонатов и гипса резко снижает величину  $K_f$ ; как правило, эти горизонты являются полуводоупорами и служат одной из причин формирования верховодок.

С увеличением степени дисперсности грунтов величина  $K_f$  уменьшается. Наличие гидрофильных минералов типа монтмориллонита понижает  $K_f$  на 20 – 30 %. Глинистые грунты гидрослюдистокаолиникового состава обладают водопроницаемостью выше, чем монтмориллонитового состава.

На створах, приуроченных к возможным источникам теплового загрязнения грунтовых вод или зоны аэрации, следует наряду с гидрофизическими наблюдениями проводить измерения температуры. 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. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод / С. Ф. Аверьянов. – Москва : КолосС, 1982. – 237 с.
2. Дорджиев А. Г. Влияние нагрузки на водонасыщение лессовидных грунтов / А. Г. Дорджиев // Труды Республиканской научно-практической конференции. – Элиста, 1987. – С. 33–35.
3. Дорджиев А. Г. Влияние схемы испытания на определение проницаемости лессовидных грунтов / А. Г. Дорджиев, Г. Г. Пюрбеев // Труды научно-практической конференции КГУ. – 1989. – С. 85–86.
4. Дорджиев А. Г. Влияние заземленного воздуха на проницаемость грунтов / А. Г. Дорджиев // Труды VI Республиканской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Элиста, 1990. – С. 62–64.
5. Дорджиев А. Г. Моделирование водопроницаемости грунтов зоны аэрации в лабораторных условиях / А. Г. Дорджиев // Труды VI научно-практической конференции КГУ. – Элиста, 1990. – С. 268–270.
6. Полубарина-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубарина-Кочина. – Москва : Наука, 1977. – 664 с.
7. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы // под ред. Е. М. Сергеева. – Москва : Недра, 1986. – 245 с.
8. Фильтрация из хранилищ и прудов / под ред. Н. Н. Веригина. – Москва : КолосС, 1975. – 304 с.
9. Шестаков В. М. Динамика подземных вод / В. М. Шестакова. – Москва: Изд-во Московского государственного университета, 1979. – 356 с.

#### References

1. Averyanov S. F. *Filtratsiya iz kanalov i ee vliyanie na rezhim gruntovykh vod* [Filtering of the channels and its impact on the groundwater regime]. Moscow: KolosS, 1982, 237 p.
2. Dordzhiev A. G. *Vliyanie nagruzki na vodonasyshchenie lessovidnykh gruntov* [Load effect on water saturation loess soils]. *Trudy Respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Works of the Republican Scientific and Practical Conference], Elista, 1987, pp. 33–35.
3. Dordzhiev A. G., Pyurbееv G. G. *Vliyanie skhemy ispytaniya na opredelenie pronitsaemosti lessovidnykh gruntov* [Influence diagrams test to determine the permeability of loess soils]. *Trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii KGU* [Works of Scientific and Practical Conference of Kalmyk State University], 1989, pp. 85–86.
4. Dordzhiev A. G. *Vliyanie zashchemlennogo vozdukha na pronitsaemost gruntov* [Influence of entrapped air on the permeability of soils]. *Trudy VI Respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchennykh i spetsialistov* [Works of the VI Republican Scientific Conference of Young Scientists and Specialists], Elista, 1990, pp. 62–64.
5. Dordzhiev A. G. *Modelirovanie vodopronitsaemosti gruntov zony aeratsii v laboratornykh usloviyakh* [Modeling permeability soil aeration zone in the laboratory]. *Trudy VI nauchno-prakticheskoy konferentsii KGU* [Works of VI Scientific and Practical Conference of Kalmyk State University], Elista, 1990, pp. 268–270.

6. Polubarinova-Kochina P. Ya. *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod* [The theory of groundwater flow]. Moscow: Nauka, 1977, 664 p.
7. Sergeev Ye. M. *Teoreticheskie osnovy inzhenernoy geologii. Mekhaniko-matematicheskie osnovy* [Theoretical foundations of engineering geology. Mechanical and mathematical foundations]. Moscow: Nedra, 1986, 245 p.
8. Verigin N. N. *Filtratsiya iz khranilishch i prudov* [Filtering of the stores and ponds]. Moscow: KolosS, 1975, 304 p.
9. Shestakov V. M. *Dinamika podzemnykh vod* [Dynamics of groundwater]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1979, 356 p.