



УДК 628.31

Н. С. БУХМАН, д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры физики;
С. Ю. ТЕПЛЫХ, канд. техн. наук, доц. кафедры водоснабжения и водоотведения;
Л. М. БУХМАН, ст. преп. кафедры строительной механики и сопротивления материалов

О ЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВРЕМЕНИ ВПИТЫВАНИЯ СКОПЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ ОТ ВЫСОТЫ ЕЕ СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВОГРУНТА

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Россия, 443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 194. Тел.: (846) 339-14-25;

эл. почта: nik3141rambler@rambler.ru

Ключевые слова: фильтрация, жидкие загрязнения, пористый грунт, время впитывания, пористость, коэффициент фильтрации.

Рассмотрена динамика впитывания слоя жидкости в пористый грунт под действием силы тяжести. Показано, что не только в случае применимости закона Дарси, но и при использовании самого общего вида закона фильтрации несжимаемой жидкости в изотропной пористой среде время впитывания слоя жидкости в грунт под действием гравитационных сил линейно зависит от исходной толщины этого слоя или, другими словами, средняя по времени впитывания скорость не зависит от исходной глубины жидкости на поверхности почвогрунта.

Одним из значимых источников загрязнения окружающей среды являются поверхностные сточные воды, а также иные пребывающие в жидкой фазе загрязнения (например, нефтепродукты) с полосы отвода железнодорожных путей [1–7]. Для изучения возможных способов борьбы с этими загрязнениями необходимо отчетливо представлять себе пути их возможной миграции как в горизонтальном направлении (сток, перетекание и т. д.), так и в вертикальном направлении (просачивание в грунт).

Там, где нет дождевой сети, поверхностные сточные воды отводятся по рельефу местности в нижерасположенные места: овраги, реки, озера и т. д. Изначально отведение поверхностных сточных вод предусматривалось только с твердых покрытий: автодорог, крыш домов и пр. Железнодорожное полотно и железнодорожные станции не рассматривались как объект загрязнения поверхностных и грунтовых вод. Так, на железнодорожных путях, станциях и перегонах, в частности на железнодорожных станциях Самары, не предусмотрены мероприятия по сбору, отведению и очистке поверхностных сточных вод [1, 5]. Протяженность путей Куйбышевской железной дороги (КЖД) составляет 11 502,5 км, а их общая площадь (с учетом полосы отвода 50 м) – 575,125 км².

Атмосферные осадки, попадая на железнодорожное полотно, могут рассматриваться:

- как сток с щебеночной и затем сток с грунтовой поверхности;
- как инфильтрация в грунт;
- как испарение с поверхности.

Средние концентрации загрязнений по нефтепродуктам составляют порядка 1500 мг/кг, что превышает предельно допустимую концентрацию (для грунтов – 1000 мг/кг) в 1,5 раза.

Данная работа посвящена изучению временной зависимости (динамики) впи-



тывания слоя жидкости с первоначальной глубиной h_{e0} (лужи) в пористый грунт. Ясно, что с ходом времени глубина слоя жидкости $h_e(t)$ постепенно уменьшается от начального значения h_{e0} до нуля (полное впитывание), а глубина насыщенного влагой слоя грунта $h_s(t)$ постепенно увеличивается от нуля до максимального значения $h_{s0} = h_{e0}/m$, где m – пористость грунта. В работе [10] эта задача решена в одномерном (1D) варианте в квазистационарном приближении в предположении справедливости классического закона Дарси [8, 9], то есть в предположении о линейной зависимости между силой сопротивления среды фильтрации жидкости и скоростью фильтрации.

Окончательный результат решения этой задачи имеет вид [10]:

$$t_{en} = t_0 \frac{1}{1-m} \left(1 + \frac{m \ln m}{1-m} \right), \quad (1)$$

где параметр $t_0 = h_{e0}/C$ имеет смысл времени впитывания жидкости при условии, что впитывание происходит с «гравитационной» скоростью безнапорной

фильтрации жидкости C ; $C = \frac{k\rho g}{\mu}$ – коэффициент фильтрации жидкости в грунте, k – коэффициент проницаемости грунта [8, 9], ρ и μ – плотность и вязкость жидкости, g – ускорение свободного падения.

Нетрудно заметить, что в соответствии с формулой (1) время впитывания оказывается прямо пропорционально исходной глубине слоя жидкости, что выглядит, на первый взгляд, несколько странно. Действительно, в этом случае оказывается, что средняя по времени впитывания скорость уменьшения глубины лужи

$$u_{cp} = h_{e0}/h_{en} = \frac{C(1-m)}{1 + \frac{m \ln m}{1-m}} \quad (2)$$

не зависит от ее исходной глубины h_{e0} . Между тем при большей исходной глубине лужи напор слоя жидкости над грунтом также оказывается больше, и потому скорость впитывания очевидно должна быть тем больше, чем больше глубина лужи. Разрешается отмеченный «парадокс», очевидно за счет того обстоятельства, что с ростом глубины лужи возрастает не только напор слоя жидкости над грунтом, но также и толщина насыщенного влагой слоя грунта под лужей, через который и происходит фильтрация. Очевидно, что независимость средней скорости снижения уровня жидкости в луже от ее глубины связана с точной взаимной компенсацией двух отмеченных выше противоположных эффектов.

В связи с этим возникает вопрос: сохраняется ли эта «компенсация» при более реалистических предположениях о законе фильтрации жидкости или же она является следствием именно закона Дарси в его простейшем, «классическом» [8, 9] варианте? Ответу на этот вопрос и посвящена данная работа.

Известно [8, 9], что закон Дарси в «классическом» виде

$$0 = -\text{grad}(p) + \rho g - \frac{\mu}{k} \cdot u \quad (3)$$

справедлив только в случае достаточно медленных (ламинарных) течений жидкости в поровых промежутках, когда число Рейнольдса мало в сравнении с 1.

$$\text{Re} = \frac{\rho u \sqrt{k}}{\mu} = \frac{u}{u_{\text{Re}}}, \quad (4)$$



где u – скорость фильтрации жидкости, $u_{Re} = \frac{\mu}{\rho \sqrt{k}}$ – некоторая характерная для данной среды скорость фильтрации, при которой число Рейнольдса равно 1. (5)

Закон Дарси в классической форме применим только при выполнении условия $u \ll u_{Re}$. В случае нарушения этого условия происходит переход к «турбулентному» режиму фильтрации, при котором соотношение (3) неприменимо.

Использование методов теории подобия позволяет утверждать [8], что самая общая форма закона фильтрации (разумеется, в рамках квазистационарного приближения, без учета сил инерции) имеет вид:

$$0 = -\text{grad}(p) + \rho g - \frac{\mu}{k} \cdot u f(\text{Re}), \quad (6)$$

где $f(\text{Re})$ – некоторая функция своего аргумента, удовлетворяющая условию нормировки $f(\text{Re}) = 1$ при $\text{Re} = 0$.

Воспользовавшись (см. [10]) соотношением

$$h_c(t) = \frac{h_{e0} - h_e(t)}{m}, \quad (7)$$

можно переписать уравнение Дарси (6) в виде

$$u f(u) = C \left(1 + m \frac{h_e}{h_{e0} - h_e} \right), \text{ или,} \quad (8)$$

введя обозначения $\text{Re}_C = C/u_{Re} = \rho^2 g k^{3/2} \mu^{-2}$ и $x = h_e/h_{e0}$, а также воспользовавшись формулой (4), – в виде

$$\text{Re} f(\text{Re}) = \text{Re}_C = \left(1 + m \frac{x}{1-x} \right). \quad (9)$$

Введя обозначение $\varphi(x) = x f(x)$, обозначив $\varphi^{-1}(x)$ функцию, обратную к функции $\varphi(x)$ и воспользовавшись (см. [10]) соотношением

$$u(t) = -\frac{dh_e}{dt} = m \frac{dh_c}{dt}, \quad (10)$$

имеем дифференциальное уравнение

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{u_0}{h_{e0}} \varphi^{-1} \left[\text{Re}_C \left(1 + m \frac{x}{1-x} \right) \right] \quad (11)$$

с общим интегралом

$$\int dt = -\frac{h_{e0}}{u_{Re}} \int \frac{dx}{\varphi^{-1} \left[\text{Re}_C \left(1 + m \frac{x}{1-x} \right) \right]}. \quad (12)$$

Обозначив момент начала впитывания $t = 0$, момент конца впитывания $t = t_{en}$, и учтя, что в начальный момент $x = 1$ ($h_e = h_{e0}$), а в конечный $x = 0$ ($h_e = 0$), окончательно для времени впитывания имеем

$$t_{en} = \frac{h_{e0}}{u_{Re}} \int_0^1 \frac{dx}{\varphi^{-1} \left[\text{Re}_C \left(1 + m \frac{x}{1-x} \right) \right]}. \quad (13)$$

Теперь видно, что при самом общем виде закона фильтрации (в том числе и



в случае турбулентного режима фильтрации) зависимость времени впитывания от исходной глубины лужи в исходно сухой грунт по-прежнему линейна, а средняя скорость впитывания u_{cp} по-прежнему не зависит от исходной глубины лужи.

$$u_{cp} = h_{\text{с0}} / t_{\text{сн}} = \frac{u_{\text{Re}}}{\int_0^1 \frac{dx}{\varphi^{-1} \left[\frac{C}{u_{\text{Re}}} \left(1 + m \frac{x}{1-x} \right) \right]}}. \quad (14)$$

Разумеется, для проведения конкретных расчетов по формуле (14) необходимо знать конкретный вид функции $\varphi(x) = xf(x)$, но сделанный вывод о независимости средней скорости впитывания в исходно сухой грунт остается справедливым при любом виде этой функции.

Вместе с тем следует отметить, что отнюдь не все результаты классического закона Дарси (3) распространяются на общий случай (6), и факт независимости средней скорости впитывания от исходной глубины лужи является скорее исключением из правил, чем общим правилом. Например, линейная зависимость средней скорости фильтрации (2) от коэффициента фильтрации C и ее независимость от прочих параметров среды (кроме пористости) «по отдельности» имеет место только в случае применимости закона Дарси в классической форме – в общем случае нелинейности функции $\varphi(x) = xf(x)$, (а следовательно, и функции $\varphi^{-1}(x) = xf(x)$) средняя скорость фильтрации зависит от пористости m , коэффициента

фильтрации $C = \frac{k\rho g}{\mu}$ и параметра $u_{\text{Re}} = \frac{\mu}{\rho \sqrt{k}}$ «по отдельности», причем нелинейным образом.

Вывод. Показано, что время впитывания слоя жидкости в грунт под действием гравитационных сил линейно зависит от исходной толщины этого слоя или, другими словами, средняя по времени скорость впитывания не зависит от исходной глубины жидкости на поверхности почвогрунта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стрелков, А. К. Охрана окружающей среды и экология гидросферы : учебник / А. К. Стрелков, С. Ю. Теплых. – Самара : СГАСУ, 2013. – 487 с. : ил. – ISBN 978-5-9585-0523-4. – Текст : непосредственный.
2. Экологические аспекты воздействия поверхностных сточных вод с железнодорожных станций / А. К. Стрелков, С. Ю. Теплых, П. А. Горшкалев, А. М. Саргсян. – Текст : непосредственный // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2013. – № S4 (13). – С. 83–88.
3. Оценка экологического состояния технической полосы отвода / А. К. Стрелков, С. Ю. Теплых, П. А. Горшкалев, А. М. Саргсян. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 31–34.
4. Анализ и характеристика фильтрации поверхностного стока в балластной призме железнодорожного пути / А. К. Стрелков, С. Ю. Теплых, Н. С. Бухман, А. М. Саргсян. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 12. – С. 63-72.
5. Стрелков, А. К. Методика определения категории загрязненности железнодорожных путей / А. К. Стрелков, С. Ю. Теплых, П. А. Горшкалев. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика : материалы 66-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР за 2008 г. / Самарский государственный архитектурно-строительный университет. – Самара, 2009. – С. 109-111.
6. Стрелков, А. К. Влияние хозяйственной деятельности на качественный состав по-



верхностных водотоков / А. К. Стрелков, С. Ю. Теплых, П. А. Горшкалев. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2014. – № 8. – С. 21–26.

7. Современное состояние вопроса сбора и очистки поверхностного стока с железной дороги / А. К. Стрелков, С. Ю. Теплых, П. А. Горшкалев, А. М. Саргсян. – Текст : непосредственный // Научное обозрение. – 2014. – № 4. – С. 123–129.

8. Леонтьев Н. Е. Основы теории фильтрации : учебное пособие / Н. Е. Леонтьев. – Москва : Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. – 88 с. – Текст : непосредственный.

9. Маскет, М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / М. Маскет ; Институт компьютерных исследований. – Москва ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2004. – 628 с. – Текст : непосредственный.

10. Бухман, Н. С. Динамика впитывания жидких загрязнений в пористый грунт / Н. С. Бухман, С. Ю. Теплых, Л. М. Бухман. – Текст : непосредственный // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – № 4 (132). – С. 51–59.

BUKHMAN Nikolay Sergeevich, doctor of physical and mathematical sciences, professor of the chair of physics; TEPLYKH Svetlana Yurevna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of water supply and wastewater; BUKHMAN Lyubov Mikhaylovna, senior teacher of the chair of construction mechanics and material resistance

ON THE LINEAR DEPENDENCE OF THE ABSORPTION TIME OF A PUDDLE ON ITS DEPTH

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, Russia. Tel.: +7 (846) 242-35-79; e-mail: physics@samgtu.ru

Key words: filtration, liquid contamination, porous soil, absorption time, porosity, filtration coefficient.

The article considers dynamics of absorption of a liquid layer into a porous soil under the influence of gravity. It is shown that not only in the case of the applicability of Darcy's law, but also when using the most general form of the incompressible fluid filtration law in an isotropic porous medium, the absorption time of a liquid layer into the ground under the action of gravitational forces linearly depends on the initial thickness of this layer or, in other words, the average absorption rate does not depend on the initial depth of the puddle.

REFERENCES

1. Strelkov A. K., Teplykh S. Yu. Okhrana okruzhayushchey sredy i ekologiya gidrosfery [Environmental protection and ecology of the hydrosphere] : uchebnik / Samara: SGASU, 2013. 487 p. : il. – ISBN 978-5-9585-0523-4.

2. Strelkov A. K., Teplykh S. Yu., Gorshkalev P. A., Sargsyan A. M. Ekologicheskie aspekty vozdeystviya poverkhnostnykh stochnykh vod s zheleznodorozhnykh stantsiy [Environmental aspects of the impact of surface wastewater from railway stations] // Vestnik SGASU. Gradostroitelstvo i arkhitektura [Urban Construction and Architecture]. 2013, № S4, (13). P. 83–88.

3. Strelkov A. K., Teplykh S. Yu., Gorshkalev P. A., Sargsyan A. M. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya tekhnicheskoy polosy otvoda [Assessment of ecological condition of a technical right-of-way lane] // Put i putevye khozyaystvo [Railway track and facilities]. 2014. № 3. P. 31–34.

4. Strelkov A. K., Teplykh S. Yu., Bukhman N. S., Sargsyan A. M. Analiz i kharakteristika filtratsii poverkhnostnogo stoka v ballastnoy prizme zheleznodorozhnogo puti [Analysis and specifications of filtration of surface runoff from railway track ballast section] // Vodosnabzhenie



i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary equipment]. 2015. № 12. P. 63–72.

5. Strelkov A. K., Teplykh S. Yu., Gorshkalev P. A. Metodika opredeleniya kategorii zagryaznyonnosti zheleznodorozhnykh putey [Methodology for determining the category of pollution of railway tracks] / Aktualnye problemy v stroitelstve i arkhitekture. Obrazovanie. Nauka. Praktika [Actual problems in construction and architecture. Education. Science. Practice.]. Materialy 66-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po itogam NIR za 2008 g. Samarskiy gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Samara, 2009. P. 109–111.

6. Strelkov A. K., Teplykh S. Yu., Gorshkalev P. A. Vliyaniye hozyajstvennoj deyatel'nosti na kachestvennyj sostav poverhnostnykh vodotokov [The influence of economic activity on the qualitative composition of surface watercourses] // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 2014. № 8. P. 21–26.

7. Strelkov A. K., Teplykh S. Yu., Gorshkalev P. A., Sargsyan A. M. Sovremennoe sostoyaniye voprosa sbora i ochistki poverkhnostnogo stoka s zheleznoy dorogi [The current state of the issue of collecting and cleaning surface runoff from the railway] // Nauchnoe obozrenie [Scientific Review.]. 2014. № 4. P. 123–129.

8. Leontev N. E. Osnovy teorii filtratsii [Fundamentals of filtration theory]: uchebnoe posobie. – Moscow : Izd-vo Tsentra prikladnykh issledovaniy pri mekhaniko-matematicheskom fakultete MGU, 2009, 88 p.

9. Masket M. Techenie odnorodnykh zhidkostey v porистой srede [The flow of homogeneous liquids in a porous medium]. Institut kompyuternykh issledovaniy. – Moscow–Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika» [Institute of Computer Research. – Moscow–Izhevsk: Regular and chaotic dynamics], 2004, 628 p.

10. Bukhman N. S., Teplykh S. Yu., Bukhman L. M. Dinamika vpityvaniya zhidkikh zagryazneniy v poristy grunt [Dynamics of absorption of liquid contaminants into porous soil] // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov [Problems of collection, preparation and transport of oil and petroleum products]. 2021. № 4 (132). P. 51–59.

© Н. С. Бухман, С. Ю. Теплых, Л. М. Бухман, 2022

Получено: 10.09.2022 г.