Н.С. Бухман, С.Ю. Теплых, Л.М. Бухман (Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация)

ДИНАМИКА ВПИТЫВАНИЯ ЖИДКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ПОРИСТЫЙ ГРУНТ

Nikolay S. Bukhman, Svetlana Yu. Teplykh, Lyubov M. Bukhman
(Samara State Technical University, Samara, Russian Federation)

DYNAMICS OF LIQUID CONTAMINATION INFILTRATION IN POROUS SOIL

Введение

Одним из источников загрязнения окружающей среды являются поверхностные сточные воды, а также иные пребывающие в жидкой фазе загрязнения (например нефтепродукты) с полосы отвода железнодорожных путей. Поскольку эти загрязнения, поступающие в окружающую среду с объектов железнодорожного транспорта, отводятся неорганизованно, нормирование по загрязняющим веществам к ним не применяется. Поэтому необходимо уделить особое внимание способам сбора, отведения и очистки этих загрязнений, для чего 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).

Цели и задачи

Статья посвящена изучению динамики инфильтрации слоя жидкости в пористый грунт.

Результаты

Получены простые формулы для временной зависимости толщины слоя жидкости на грунте и для времени полного впитывания жидкости в грунт в зависимости от коэффициента фильтрации и пористости грунта.

Background

One of the sources of environmental pollution is surface wastewater, as well as other liquid-phase pollution (for example, oil products) from the railway right-of-way. Since these pollutants entering the environment from railway transport facilities are discharged in an unorganized manner, the regulation on pollutants is not applied to them. Therefore, it is necessary to pay special attention to the methods of collecting, removing and cleaning these contaminants, for which it is necessary to clearly understand the ways of their possible migration both in the horizontal direction (runoff, overflow, etc.) and in the vertical direction (seepage into the ground).

Aims and Objectives

The article is devoted to the study of the dynamics of infiltration of a liquid layer into a porous soil.

Results

Simple formulas were obtained for the time dependence of the thickness of the liquid layer on the soil and for the time of complete absorption of the liquid into the soil, depending on the filtration coefficient and the porosity of the soil.

Показано, что полное время впитывания прямо пропорционально толщине исходного слоя жидкости на грунте.

Показано, что практически при любых пористостях грунта (от 40 % до 100 %) процесс инфильтрации практически не зависит от конкретной величины пористости и протекает практически так же, как в предельном случае стопроцентной пористости.

Проведены расчеты времени впитывания для типичных грунтов.

It is found that the total absorption time is directly proportional to the thickness of the initial liquid layer on the ground.

It is found that practically at any soil porosity (from 40 % to 100 %), the infiltration process is practically independent of the specific porosity value and proceeds practically in the same way as in the limiting case of 100% porosity.

Calculations of the absorption time for typical soils have been carried out.

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

Keywords: filtration; liquid contamination; porous soil; absorption time; porosity; filtration coefficient

Одним из источников загрязнения окружающей среды являются поверхностные сточные воды, а также иные пребывающие в жидкой фазе загрязнения (например нефтепродукты) с полосы отвода железнодорожных путей. Поскольку эти загрязнения, поступающие в окружающую среду с объектов железнодорожного транспорта, отводятся неорганизованно, нормирование по загрязняющим веществам к ним не применяется. Поэтому необходимо уделить особое внимание способам сбора, отведения и очистки этих загрязнений, для чего 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) [1-7].

Данная работа посвящена изучению временной зависимости (динамики) впитывания слоя жидкости с первоначальной глубиной h_{e0} (скопления воды или лужи) в пористый грунт. Ясно, что с ходом времени глубина места скопления воды $h_e(t)$ постепенно уменьшается от начального значения

h_{e0} до 0 (полное впитывание), а глубина насыщенного влагой слоя грунта $h_z(t)$ постепенно увеличивается от 0 до максимального значения $h_{z0} = h_{e0}/m$, где m - пористость грунта.

Решим эту задачу в одномерном (1D) варианте в квазистационарном приближении, предполагая, что в каждый момент времени жидкость находится в состоянии равновесия, медленно изменяющемся с изменением глубины впадины скопления жидкости $h_e(t)$ и глубины насыщенного влагой слоя грунта $h_z(t)$.

Разумеется, любая реальная впадина со скоплением воды имеет ограниченные поперечные размеры и переменную по поперечным координатам (x, y) глубину, причем ее поперечные размеры определяются степенью неровности поверхности, а глубина $h_e(x, y, t)$ - еще и объемом сброшенных стоков. Тем не менее ясно, что неоднород-

ность задачи по поперечным координатам существенно ниже, чем ее неоднородность по продольной координате (высота, z), и поэтому поперечные координаты в данном случае с хорошей точностью можно считать параметрами, считая, что динамика впитывания в каждой точке поверхности (x, y) определяется стартовой глубиной впадины $h_{e0}(x, y)$ именно в этой точке и не зависит от положения дел в соседних точках поверхности.

Основными уравнениями для фильтрации жидкостей в грунте являются уравнение неразрывности и закон Дарси [8, 9]:

$$\frac{\partial(\rho m)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0; \quad (1)$$

$$0 = -\operatorname{grad}(p) + \rho \vec{g} - \frac{\mu}{k} \cdot \vec{u}, \quad (2)$$

где ρ - плотность жидкости;

m - пористость грунта (то есть относительная доля объема открытых пор в грунте);

$\vec{u}$ - скорость фильтрации жидкости;

t - время фильтрации жидкости;

p - давление жидкости;

$\vec{g}$ - ускорение свободного падения;

μ - динамическая вязкость жидкости;

k - проницаемость (или коэффициент проницаемости) грунта.

Уравнение (1) выражает закон сохранения массы фильтруемой жидкости и в одномерном стационарном случае может быть записано как соотношение $\frac{\partial u(z, t)}{\partial z} = 0$ с очевидным решением $u(z, t) = u(t)$.

Таким образом, скорость вертикального движения жидкости над поверхностью грунта не зависит от вертикальной координаты и совпадает как со скоростью фильтрации жидкости в грунте (которая также не зависит

от вертикальной координаты z), так и со скоростью смещения свободной поверхности жидкости

$$u(t) = -\frac{dh_e}{dt} = m \frac{dh_z}{dt}. \quad (3)$$

Второе равенство в (3) учитывает то обстоятельство, что скорость реального движения жидкости в пористой среде (а, следовательно, и скорость перемещения границы жидкости в грунте) не совпадает со скоростью фильтрации $u(t)$ и равна $\frac{u(t)}{m}$ (рисунок 1).

Рисунок 1. Геометрия задачи.

Жирными горизонтальными линиями показаны верхняя граница слоя жидкости на грунте (а), граница свободной жидкости и насыщенного жидкостью грунта (б) и граница насыщенного жидкостью грунта и сухого грунта (в)

Проинтегрировав второе из уравнений (3) с начальными условиями $h_e(0) = h_{e0}$,

$h_z(0) = 0$, нетрудно получить уравнение связи глубины впадины скопления воды $h_g(t)$ и глубины границы жидкости в грунте $h_z(t)$ в виде

$$h_z(t) = \frac{h_{g0} - h_g(t)}{m}. \quad (4)$$

Уравнение Дарси (2) в одномерном случае можно записать в виде

$$u = C \left(1 + \frac{h_g(t)}{h_z(t)} \right), \quad (5)$$

где $C = \frac{k\rho g}{\mu}$ - коэффициент фильтрации жидкости в грунте.

Для этого достаточно учесть, что давление на поверхности грунта равно $\rho g h_g$, а на глубине h_z оно становится равно 0; поэтому $\text{grad}(p) = -\frac{\rho g h_g}{h_z}$.

Объединив (3) и (5) с учетом (4), окончательно получаем для исследования дифференциальное уравнение

$$\frac{dh_g}{dt} = -C \left(1 + m \frac{h_g}{h_{g0} - h_g} \right) \quad (6)$$

с начальным условием $h_g(0) = h_{g0}$.

Интеграл дифференциального уравнения (6) находится элементарно и имеет вид

$$\frac{Ct}{h_{g0}} = \frac{1}{1-m} \left\{ \frac{\Delta h(t)}{h_{g0}} - \frac{m}{1-m} \ln \left(1 + \frac{1-m}{m} \frac{\Delta h(t)}{h_{g0}} \right) \right\}, \quad (7)$$

где $\Delta h(t) = h_{g0} - h_g(t)$ - понижение уровня жидкости в впадине с ходом времени.

К сожалению, разрешить уравнение (7) относительно уровня жидкости не удастся, но это не мешает изобразить зависимость

$h_g(t) = h_{g0} - \Delta h(t)$ при различных значениях пористости грунта m графически (рисунок 2).

На рисунке 2 показана зависимость нормированного уровня свободной жидкости $h_g(t)/h_{g0}$ от нормированного времени t/t_0 при различной пористости грунта $m = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ (справа налево). Параметр нормировки $t_0 = h_{g0}/C$ имеет смысл времени впитывания жидкости в грунт при условии, что впитывание происходит с «гравитационной» скоростью безнапорной фильтрации жидкости C .

Соотношение (7) позволяет найти время полного впитывания жидкости в зависимости от пористости грунта (рисунок 3)

$$t_{en} = t_0 \frac{1}{1-m} \left(1 + \frac{m \ln m}{1-m} \right). \quad (8)$$

Это время изменяется от «гравитационного» времени $t_0 = h_{g0}/C$ при нулевой пористости грунта до половины этого «гравитационного» времени $t_0 = h_{g0}/C$ при пористости 100 %. Разумеется, реальных пористостей 100 % на практике не встречается, но график на рисунке 3 приближается к своему предельному значению весьма быстро, и уже при пористости 40 % и выше время впитывания находится в пределах от 65 % до 50 % от «гравитационного».

Анализируя рисунок 2, нетрудно заметить, что графики зависимости снижения уровня жидкости в впадине с водой сначала идут вниз достаточно резко, а затем угол их наклона снижается и стремится к общему (не зависящему от пористости среды) наклону $\frac{dh_g}{dt} = -C$, соответствующему стеканию жидкости с «безнапорной» скоростью C .

Это вполне естественно, потому что сопротивление пористого грунта просачиванию вязкой жидкости пропорционально толщине слоя насыщенного жидкостью грунта и возрастает с ростом этой толщины; сила же, под действием которой происходит фильтрация,

состоит из двух частей - суммарного веса жидкости в порах грунта (который тоже возрастает с ростом толщины насыщенного жидкостью слоя грунта) и веса свободной жидкости на грунте, который по мере впитывания жидкости в грунт снижается и играет все меньшую роль. Поэтому если на начальном этапе впитывания, по существу, происходит «свободное падение» жидкости в поры грунта, то на конечном этапе имеем равномерное безнапорное стекание жидкости в порах под действием собственной тяжести.

Нетрудно также заметить, что при пористостях среды выше 40 % графики, соот-

ветствующие различным значениям пористости, расположены очень близко друг к другу и при значениях пористости от 0,4 до 1 (что является нормой для всех практически интересных типов грунта, за исключением чистых песков (таблица 1 [4])), и потому могут быть с хорошей точностью аппроксимированы графиком с предельной (стопроцентной) пористостью, выделенном на рисунке 2 жирной линией.

Узкая полоса, в которой сосредоточены графики, соответствующие значениям пористостей от 0,4 до 1, на рисунке 2 выделена серым фоном.

Рисунок 2. Зависимость нормированного уровня свободной жидкости $h_e(t)/h_{e0}$ от нормированного времени t/t_0 при различной пористости грунта $m = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ (справа налево).

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

Рисунок 3. Зависимость нормированного времени полного впитывания $t_{ен} / t_0$ от пористости грунта m .

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

В этом пределе ($m \rightarrow 1$) формула (7) упрощается и может быть записана как

$$\frac{Ct}{h_{e0}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta h(t)}{h_{e0}} \right)^2. \quad (9)$$

Эта зависимость, в отличие от (7), уже может быть разрешена относительно текущего уровня жидкости в впадине, что дает нам

$$\Delta h(t) = \sqrt{2Ch_{e0}t}, \quad (10)$$

$$h_e(t) = h_{e0} - \sqrt{2Ch_{e0}t}. \quad (11)$$

Теперь видно, что практически во всех грунтах, кроме песка, впитывание жидкости происходит по закону квадратного корня.

Анализируя рисунок 3, можно отметить, что обычно (при пористостях начиная с 0,4) впитывание происходит примерно в 2 раза быстрее, чем можно было бы ожидать, исходя

из предположения о «гравитационной» скорости фильтрации.

В таблице 1 приведены рассчитанные по формуле (8) времена впитывания десятисантиметрового слоя воды в различные типы грунтов. Разумеется, любая реальная впадина имеет переменную глубину, и потому в процессе инфильтрации ее форма изменяется, поэтому приведенные в таблице данные относятся к случаю, когда максимальная глубина впадины равна 10 см. Поскольку в соответствии с формулой (8) время впитывания прямо пропорционально глубине впадины и кинематической вязкости жидкости, данные таблицы 1 после соответствующей коррекции могут использоваться и для других жидкостей и глубин. Так, например, для оценки времени впитывания пятисантиметрового слоя нефти достаточно уменьшить приведенные в последнем столбце результаты в 2 раза ($5/10 = 0,5$) и увеличить их в 50 раз (полагая, что кинематическая вязкость нефти в 50 раз выше кинематической вязкости воды).

Таблица 1. Время впитывания в грунт воды из «стандартной впадины» глубиной 10 см

Тип грунта	Коэффициент фильтрации	Пористость	Время впитывания
Щебень гранитный 40 × 70 мм	0,01	0,46	6 с
Щебень гранитный 20 × 40 мм	0,004	0,452	16 с
Щебень гранитный 5 × 20 мм	1,80E-03	0,448	35 с
Кварцевый песок 2-3 мм	1,00E-03	0,3	1 мин 9 с
Речной песок 1 мм	5,10E-04	0,15	2 мин 33 с
Супесь	4,00E-06	0,6	4 ч 4 мин
Суглинок	2,20E-06	0,75	6 ч 55 мин
Глина	2,30E-08	0,5	741 ч

Вывод

Основным выводом проведенного рассмотрения является заключение о хорошей точности «приближения стопроцентной пористости» (9)-(11) не только в тех случаях, когда пористость действительно близка к 100 %, но и при любых пористостях от 40 %

до 100 %. Это позволяет надеяться, что существенно упрощается рассмотрение подобных объектов, и приближение можно использовать при решении более сложных задач теории фильтрации жидкости в пористой среде.

Список литературы

1. Стрелков А.К., Теплых С.Ю. Охрана окружающей среды и экология гидросферы. Самара: Изд-во СГАСУ, 2013. 488 с.
2. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Горшкалев П.А., Саргсян А.М. Экологические аспекты воздействия поверхностных сточных вод с железнодорожных станций // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2013. № S4 (13). С. 83-88. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.S4.23.
3. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Горшкалев П.А., Саргсян А.М. Оценка экологического состояния технической полосы отвода // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 3. С. 31-34.
4. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Бухман Н.С., Саргсян А.М. Анализ и характеристика фильтрации поверхностного стока в балластной призме железнодорожного пути // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 12. С. 63-72.
5. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Горшкалев П.А. Методика определения категории загрязненности железнодорожных путей // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре.

References

1. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu. *Okhrana okruzhayushchei sredy i ekologiya gidrosfery* [Environmental Protection and Ecology of the Hydrosphere]. Samara, SGASU Publ., 2013. 488 p. [in Russian].
2. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A., Sargsyan A.M. *Ekologicheskie aspekty vozddeystviya poverkhnostnykh stochnykh vod s zheleznodorozhnykh stantsii* [Nature of Oil Pollutions Oil from Railways]. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arkhitektura - Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture*, 2013, No. S4 (13), pp. 83-88. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.S4.23. [in Russian].
3. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A., Sargsyan A.M. *Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya tekhnicheskoi polosy otvoda* [Assessment of Ecological Condition of Strip of Branch of Railway Tracks]. *Put' i putevye khozyaistvo - Railway Track and Facilities*, 2014, No. 3, pp. 31-34. [in Russian].
4. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Bukhman N.S.,

Образование. Наука. Практика: матер. 66-й Всероссий. науч.-технич. конф. по итогам НИР за 2008 г. Самара: Изд-во СГАСУ, 2009. С. 109-111.

6. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Горшкалев П.А. Влияние хозяйственной деятельности на качественный состав поверхностных водотоков // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 8. С. 21-25.

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

8. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.

9. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Институт компьютерных исследований. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. 628 с.

Sargsyan A.M. Analiz i kharakteristika fil'tratsii poverkhnostnogo stoka v ballastnoi prizme zheleznodorozhnogo puti [Analysis and Specifications of Filtration of Surface Runoff from Railway Track Ballast Section]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika - Water Supply and Sanitary Technique*, 2015, No. 12, pp. 63-72. [in Russian].

5. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A. Metodika opredeleniya kategorii zagryaznenosti zheleznodorozhnykh putei [Methodology for Determining the Category of Contamination of Railway Tracks]. *Materialy 66-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po itogam NIR za 2008 g. «Aktual'nye problemy v stroitel'stve i arkhitekture. Obrazovanie. Nauka. Praktika»* [Materials of the 66th All-Russian Scientific and Technical Conference on the Results of Research Work for 2008. «Actual Problems in Construction and Architecture. Education. The Science. Practice»]. Samara, SGASU Publ., 2009, pp. 109-111. [in Russian].

6. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A. Vliyanie khozyaistvennoi deyatel'nosti na kachestvennyi sostav poverkhnostnykh vodotokov [The Impact of Economic Activity on the Qualitative Composition of Surface Water Courses]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika - Water Supply and Sanitary Technique*, 2014, No. 8, pp. 21-25. [in Russian].

7. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A., Sargsyan A.M. Sovremennoe sostoyanie voprosa sбора i ochistki poverkhnostnogo stoka s zheleznnoi dorogi [Modern Condition of the Problem of Collecting and Purifying Rail Way Surface Drainage]. *Nauchnoe obozrenie - Science Review*, 2014, No. 4, pp. 123-129. [in Russian].

8. Leontev N.E. *Osnovy teorii fil'tratsii* [Fundamentals of Filtration Theory]. Moscow, Tsentr prikladnykh issledovaniy pri mekhaniko-matematicheskom fakul'tete MGU Publ., 2009. 88 p. [in Russian].

9. Masket M. *Techenie odnorodnykh zhidkosti v poristoi srede. Institut komp'yuternykh issledovaniy* [The Flow of Homogeneous Fluids in a Porous Medium. Institute for Computer Research]. Moscow-Izhevsk, NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika» Publ., 2004. 628 p. [in Russian].

Авторы

• Бухман Николай Сергеевич, д-р физ.-мат. наук Самарский государственный технический университет, Академия строительства и архитектуры
Профессор кафедры «Общая физика, геология и физика нефтегазового производства»
Российская Федерация, 443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
e-mail: nik3141rambler@rambler.ru

The Authors

• Bukhman Nikolay S., Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Samara State Technical University, Academy of Civil Engineering and Architecture
Professor of General Physics, Geology and Physics of Oil and Gas Production Department
194, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443001, Russian Federation
e-mail: nik3141rambler@rambler.ru

• Теплых Светлана Юрьевна, канд. техн. наук
Самарский государственный технический
университет, Академия строительства
и архитектуры
Доцент кафедры «Водоснабжение
и водоотведение»
Российская Федерация, 443001, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 194
e-mail: kafvv@mail.ru

• Teplykh Svetlana Yu., Candidate of Engineering
Sciences
Samara State Technical University, Academy of Civil
Engineering and Architecture
Assistant Professor of Water Supply and Sanitation
Department
194, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443001,
Russian Federation
e-mail: kafvv@mail.ru

• Бухман Любовь Михайловна
Самарский государственный технический
университет, Академия строительства
и архитектуры
Старший преподаватель кафедры «Строительная
механика, инженерная геология, основания
и фундаменты»
Российская Федерация, 443001, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 194
e-mail: bukhman-liubov@rambler.ru

• Bukhman Lyubov M.
Samara State Technical University, Academy of Civil
Engineering and Architecture
Senior Lecturer of Structural Mechanics, Engineering
Geology, Bases and Foundations Department
194, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443001,
Russian Federation
e-mail: bukhman-liubov@rambler.ru