

Н. С. БУХМАН
Л. М. БУХМАН

ДИНАМИКА ВПИТЫВАНИЯ ПАДАЮЩЕЙ НА ПОРИСТЫЙ ГРУНТ ЖИДКОСТИ

DYNAMICS OF ABSORPTION OF LIQUID FALLING INTO A POROUS SOIL

Рассмотрена одномерная динамика инфильтрации в пористый грунт слоя жидкости, падающей на грунт. Получено дифференциальное уравнение инфильтрации, учитывающее одновременно как вязкость, так и инертность жидкости. Проведено численное решение этого дифференциального уравнения для некоторых наиболее распространенных типов техногенных грунтов. Показано, что в случае нулевой начальной скорости движения лежащей на грунте жидкости влияние инерционности жидкости незначительно и при расчетах можно пользоваться приближением безынерционной жидкости (уравнение Дарси). В случае высокой скорости столкновения жидкости и грунта на начальном этапе инфильтрация имеет характер практически мгновенного «впрыскивания» жидкости в грунт. В процессе этого впрыскивания жидкость тормозится и дальнейшая инфильтрация протекает в «безынерционном» режиме.

Ключевые слова: фильтрация, инертность жидкости, впрыскивание жидкости, пористый грунт, время впитывания, пористость, коэффициент фильтрации

The univariate dynamics of infiltration of a layer of liquid falling on the ground into a porous soil is considered. A differential infiltration equation is obtained, taking into account both the viscosity and the inertia of the liquid at the same time. The numerical solution of this differential equation is carried out for some of the most common types of man-made soils. It is shown that in the case of zero initial velocity of a liquid lying on the ground, the effect of inertia of the liquid is insignificant and the approximation of an inertialess liquid (Darcy equation) can be used in calculations. In the case of a high collision velocity of liquid and soil at the initial stage, infiltration has the character of an almost instantaneous “injection” of liquid into the soil. During this injection, the liquid is inhibited and further infiltration proceeds in a “non-inertial” mode.

Keywords: filtration, inertia of liquid, injection of liquid, porous soil, absorption time, porosity, filtration coefficient

Одним из источников загрязнения окружающей среды являются пребывающие в жидкой фазе загрязнения, основной компонентой которых является вода [1–5]. При изучении фильтрации таких загрязнений обычно используют уравнение Дарси [6, 7].

В работах [8, 10] изучена временная зависимость впитывания слоя жидкости с первоначальной глубиной $h_{\text{до}}$ (лужи) в пористый грунт. Ясно, что с ходом времени глубина лужи $h_{\text{г}}(t)$

постепенно уменьшается от начального значения $h_{\text{до}}$ до нуля (полное впитывание), а глубина насыщенного влагой слоя грунта $h_{\text{г}}(t)$ постепенно увеличивается от нуля до максимального значения $h_{\text{г}} = h_{\text{до}} / m$, где m – пористость грунта. В [8, 10] эта задача решена в квазистационарном приближении, т. е. в предположении, что в каждый момент времени жидкость находится в состоянии равновесия, медленно изменяющегося с изменением глубины лужи $h_{\text{г}}(t)$ и глу-

бины насыщенного влагой слоя грунта $h_s(t)$. В данной работе предпринята попытка выйти за рамки приближения квазистационарности, а именно учесть игнорируемые в квазистационарном приближении динамические эффекты, такие, например, как инерционность жидкости, которая не может ни мгновенно ускориться, ни мгновенно остановиться.

Так, в частности, в квазистационарном приближении предполагается, что на границе свободной жидкости и пористой среды скорость фильтрации $\vec{u}$ [6, 7] не изменяется (это является прямым следствием уравнения непрерывности, каковое уравнение в свою очередь является следствием закона сохранения массы). Но скорость реального движения жидкости в среде $\vec{v}$ связана со скоростью фильтрации соотношением $\vec{v} = \vec{u} / m$, где $m < 1$ – пористость среды. Поэтому возникает парадокс – в слое свободной жидкости над пористой средой $v = u$, а в среде $v > u$, т. е. вместо торможения жидкость в среде разгоняется. Кроме того, в квазистационарном приближении сопротивление среды фильтрации жидкости полностью контролируется вязкостью жидкости и для невязкой жидкости полностью отсутствует, что явно неверно, как показано в работе [10], в которой изучено сопротивление пористого грунта впитыванию совершенно невязкой жидкости. Следует отметить, что в квазистационарном приближении в начальный момент фильтрации скорость фильтрации оказывается бесконечной (см. [8]), что также бессмысленно.

Поэтому выход за рамки приближения квазистационарности необходим хотя бы для того, чтобы убедиться в несущественности возникающих при этом выходе поправок.

Для вывода исходного одномерного дифференциального уравнения впитывания жидкости в грунт можно использовать закон сохранения энергии в виде

$$\frac{dE}{dt} = -F_{mp}v, \quad (1)$$

где E – энергия столба жидкости площади S над и под границей грунта; F_{mp} – сила трения, действующая на столб жидкости,двигающийся в грунте со скоростью v .

Энергия столба жидкости распадается на кинетическую и потенциальную. Кинетическая энергия связана с движением слоя жидкости толщины h_s с некоторой скоростью $u = -\frac{dh_s}{dt}$ над грунтом и слоя жидкости толщины $\frac{h_s - h_{s0}}{m}$ над грунтом и слоя жидкости толщины $\frac{h_s - h_{s0}}{m}$ над грунтом, m – пористость грунта)

со скоростью $v = u / m$ в грунте. Потенциальная энергия жидкости состоит из энергии жидкости на грунте (центр тяжести $h_s / 2$) и в грунте (центр тяжести $-\frac{h_s - h_{s0}}{2m}$). Очевидно, для столба жидкости с плотностью ρ и площадью сечения S имеем

$$E = \frac{\rho S}{2} \left\{ g \left[h_s^2 - \frac{(h_{s0} - h_s)^2}{m} \right] + \left(\frac{dh_s}{dt} \right)^2 \left[h_s + \frac{h_{s0} - h_s}{m^2} \right] \right\}. \quad (2)$$

Для силы трения, учтя, что коэффициент фильтрации $C = \frac{k\rho g}{\mu}$ имеет физический смысл постоянной скорости безнапорной фильтрации жидкости в грунте под действием гравитации [8, 9] и что при этой «гравитационной» фильтрации происходит взаимная компенсация силы трения и силы тяжести, имеем

$$F_{mp} = \frac{\rho S m g (h_{s0} - h_s) u}{C} = -\frac{\rho S m g (h_{s0} - h_s)}{C} \left(\frac{dh_s}{dt} \right). \quad (3)$$

Продифференцировав (2) по времени и учтя, что $u = -\left(\frac{dh_s}{dt}\right)$, окончательно имеем задачу Коши для дифференциального уравнения второго порядка

$$\frac{d^2 h_s}{dt^2} = \frac{\left(\frac{dh_s}{dt}\right)^2 (1 - m^2) - \left(\frac{dh_s}{dt}\right) (h_{s0} - h_s) \frac{2gm}{C}}{2[h_{s0} - h_s (1 - m^2)]} + \frac{2gm[h_s (1 - m) - h_{s0}]}{2[h_{s0} - h_s (1 - m^2)]}, \quad (4)$$

$$h_s(0) = h_{s0},$$

$$\frac{dh_s}{dt}(0) = -\sqrt{2gh_{nad}}.$$

В (4) h_{s0} – толщина слоя жидкости на грунте в начальный момент ее контакта с грунтом, h_{nad} – высота, с которой жидкость упала на грунт (на самом деле $\sqrt{2gh_{nad}}$ – это просто скорость слоя жидкости в момент контакта с грунтом).

Представляется странным, что плотность жидкости (являющаяся мерой ее инертности) не входит в (4). На самом деле ничего странного

в этом нет – плотность входит в уравнение (4) одновременно с ее вязкостью через коэффициент фильтрации $C = \frac{k\rho g}{\mu}$.

Уравнение (4) одновременно учитывает и вязкость жидкости, и ее инертность и в этом смысле является обобщением как уравнения для впитывания невязкой инертной жидкости [12], так и основанного на законе Дарси уравнения для впитывания вязкой безынерционной жидкости [10,11].

В случае невязкой (вязкость $\mu = 0$) инерционной жидкости в уравнении (4) следует положить $C = \frac{k\rho g}{\mu} = \infty$, что приводит нас к более простому уравнению

$$\frac{d^2 h_e}{dt^2} = \frac{\left(\frac{dh_e}{dt}\right)^2 (1-m^2) + 2gm[h_e(1-m) - h_{e0}]}{2[h_{e0} - h_e(1-m^2)]}, \quad (5)$$

порядок которого легко понижается, что приводит нас к уравнению (4) из [10].

В противоположном предельном случае вязкой безынерционной жидкости ($C = \frac{k\rho g}{\mu} \rightarrow 0$)

следует учесть, что скорость впитывания при этом также стремится к нулю, и обнулить в (4) все производные толщины слоя жидкости, кроме являющихся коэффициентами при C^{-1} , что немедленно приводит нас к уравнению (6) из [8].

Решение уравнения (4) удастся провести только численно. Некоторые результаты численного счета показаны в таблицах.

В табл. 1 приведены данные по времени впитывания слоя жидкости с исходной толщиной 10 см в различные типы грунтов при падении с разной высоты. Видно, что в случае нулевой скорости падения жидкости ($h_{nad} = 0$) учет инерционности жидкости практически не изменяет результаты теории Дарси. С ростом высоты падения жидкости (а соответственно и динамического напора) время впитывания уменьшается в сравнении с результатами теории Дарси несмотря на то, что в рамках приближения Дарси время впитывания не зависит от скорости падения жидкости. Уменьшение времени впитывания достигает примерно 0,5 с при высоте падения 1 м, примерно 1 с при высоте падения 4 м и примерно 3–4 с при высоте падения 60 м. Ясно, что это уменьшение времени впитывания следует сравнивать с полным временем впитывания и для техногенных грунтов (щебень) оно играет относительно более значительную роль, чем для природных (песок).

Тем не менее можно констатировать, что в любом случае учет инерционности жидкости не меняет принципиально результаты теории Дарси.

В табл. 2 приведены данные по времени впитывания слоя жидкости с различной исходной толщиной (1, 10 или 100 см) в гранитный щебень 5×20 мм (коэффициент фильтрации 1,80Е-03, пористость 0,448) при падении с разной высоты. Приведенные в табл. 2 данные позволяют проверить, выполняется ли для инерционной жидкости отмеченная в [9] прямо пропорциональная зависимость между толщиной слоя жидкости и временем ее впитывания. Действительно, в приближении Дарси при переходе от первой строчки таблицы ко второй и от второй к третьей толщина слоя жидкости увеличивается в 10 раз – и так же должно увеличиваться время впитывания. Эта зависимость практически точно выполняется в приближении Дарси (первый столбец) при падении жидкости с нулевой высоты (второй столбец), приближенно выполняется при падении жидкости с высоты 1 м (третий столбец) и не выполняется при падении с высоты 4 м и более (четвертый – шестой столбцы).

Обращает на себя внимание аномально быстрое (полторы миллисекунды) впитывание сантиметрового слоя жидкости при падении с высоты 60 м. Очевидно, в данном случае имеет место не постепенное впитывание, а почти мгновенное «впрыскивание» быстро движущейся жидкости в пористую среду.

Для иллюстрации этого явления на рисунке приведены графики зависимости толщины слоя жидкости на грунте от времени для толщины слоя жидкости 1, 10 и 100 см при падении жидкости с 60 м. На рисунке показано: $t_0 = h_0 / C$ при падении слоя жидкости с толщиной $h_0 = 1$ м (сплошная линия), $h_0 = 10$ см (штриховая линия) и $h_0 = 1$ см (пунктир) при падении слоя жидкости с высоты 60 м. Рисунок «а» отличается от рисунка «б» только масштабом по горизонтальной оси.

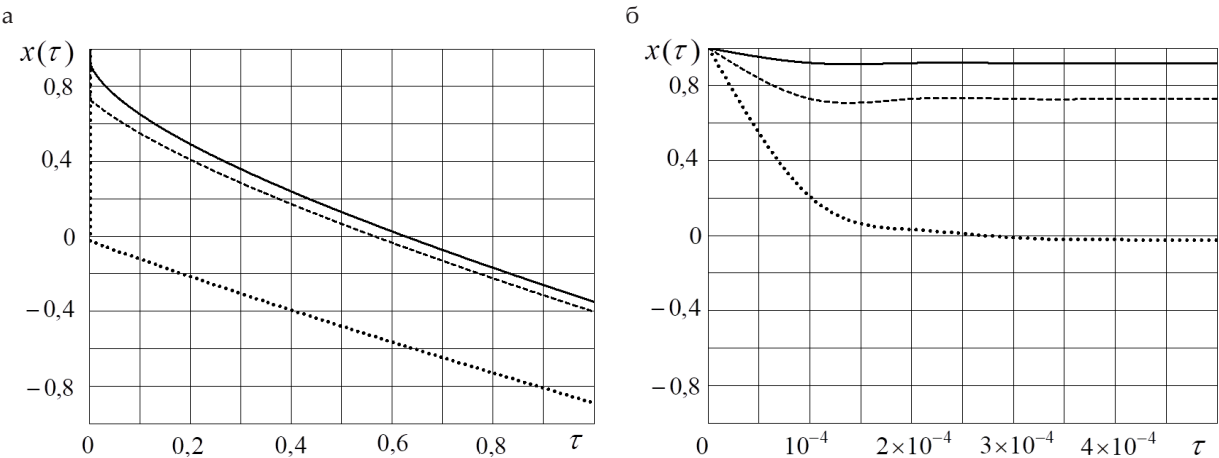
Видно, что в случае столкновения достаточно быстро движущейся жидкости с грунтом процесс впитывания четко разделяется на две стадии – сначала некоторая часть жидкости практически мгновенно ($\tau \approx 10^{-4}$) «впрыскивается» в грунт, а затем жидкость тормозится, практически останавливается и достаточно медленно $\tau \approx 1$ впитывается в грунт примерно в соответствии с теорией Дарси. При этом уменьшение (в сравнении с теорией Дарси) времени впитывания при падении с высоты 60 м практически не зависит от толщины слоя жидкости и составляет примерно 3,5 с. Поэтому нет ничего удивительного в том, что в случае толщины слоя жидкости 1 см все «время впитывания Дарси» (3,5 с) «съедается» стадией впрыскивания и жидкость исчезает с поверхности почвы практически мгновенно.

Таблица 1. Время впитывания в грунт слоя воды толщиной 10 см
Table 1. Time for water layer 10 cm thick to be absorbed into the ground

Тип грунта	Коэффициент фильтрации, м/с	Пористость	Время впитывания, с					
			по теории Дарси	при $h_{\text{пад}}=0$ м	при $h_{\text{пад}}=1$ м	при $h_{\text{пад}}=4$ м	при $h_{\text{пад}}=8$ м	при $h_{\text{пад}}=60$ м
Гранитный щебень 40×70 мм	0,01	0,46	6,27	6,27	5,79	5,31	4,90	2,57
Гранитный щебень 20×40 мм	0,004	0,452	15,74	15,74	15,27	14,79	14,38	11,99
Гранитный щебень 5×20 мм	1,80E-03	0,448	35,06	35,06	34,59	34,11	33,71	31,31
Кварцевый песок 2–3 мм	1,00E-03	0,3	69,15	69,14	68,66	68,15	67,72	65,13
Речной песок 1 мм	5,10E-04	0,15	153,45	153,45	152,90	152,30	152,01	151,00

Таблица 2. Время впитывания в гранитный щебень 5×20 мм слоя воды
разной толщины при падении с разной высоты
Table 2. Time of water layer absorption into granite crushed stone 5×20 mm
of different thickness when falling from different heights

Толщина слоя жидкости, см	Время впитывания, с					
	по теории Дарси	при $h_{\text{пад}}=0$ м	при $h_{\text{пад}}=1$ м	при $h_{\text{пад}}=4$ м	при $h_{\text{пад}}=8$ м	при $h_{\text{пад}}=60$ м
1	3,51	3,51	3,02	2,54	2,14	1,51E-3
10	35,056	35,06	34,59	34,11	33,71	31,31
100	350,56	350,56	350,10	349,65	349,26	346,96



Зависимость обезразмеренной толщины слоя жидкости на грунте
(гранитный щебень 5×20 мм) $x(\tau) = h(\tau) / h_{0e}$ от обезразмеренного времени $\tau = t / t_0$
Dependence of the dimensionless thickness $x(\tau) = h(\tau) / h_{0e}$ of the liquid layer on the ground
(granite crushed stone 5×20 mm) on the dimensionless time $\tau = t / t_0$

Вывод

При столкновении быстро движущегося слоя жидкости с пористой средой процесс внедрения жидкости в среду протекает в две стадии. Сначала некоторая часть жидкости практически мгновенно «впрыскивается» в среду, при этом быстро тормозясь. Затем почти оставившаяся жидкость относительно медленно впитывается по «безынерционному» механизму. Безусловно, «стадия впрыскивания» представляет определенный интерес и заслуживает дальнейшего изучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., ГоршкALEV П.А., Саргсян А.М. Экологические аспекты воздействия поверхностных сточных вод с железнодорожных станций // Градостроительство и архитектура. 2013. № S4(13). С. 83–88. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.S4.23.
2. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., ГоршкALEV П.А., Саргсян А.М. Оценка экологического состояния технической полосы отвода // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 3. С. 31–34.
3. 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.
4. Стрелков А. К., Теплых С. Ю., ГоршкALEV П. А. Влияние хозяйственной деятельности на качественный состав поверхностных водотоков // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 8. С. 21–26.
5. Стрелков А. К., Теплых С. Ю., ГоршкALEV П. А., Саргсян А. М. Современное состояние вопроса сбора и очистки поверхностного стока с железной дороги // Научное обозрение. 2014. № 4. С. 123–129.
6. Леонтьев Н. Е. Основы теории фильтрации. М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.
7. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / Институт компьютерных исследований. Москва – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. 628 с.
8. Бухман Н.С., Теплых С.Ю., Бухман Л.М. Динамика впитывания жидких загрязнений в пористый грунт // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 4 (132). С. 51–59.
9. Бухман Н.С., Теплых С.Ю., Бухман Л.М. О линейной зависимости времени впитывания скопления жидкости от высоты ее слоя на поверхности почвогрунта // Приволжский научный журнал. 2022. № 4 (64). С. 73–78.
10. Бухман Н.С., Бухман Л.М. О скорости впитывания невязкой жидкости в грунт // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 2. С. 37–41. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.02.05.

REFERENCES

1. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A., Sargsyan A.M. Environmental aspects of the impact of surface wastewater from railway stations. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Planning and Architecture], 2013, no. S4(13), pp. 83–88. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2013.S4.23
2. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A., Sargsyan A.M. Environmental assessment of the technical right-of-way. *Put' i putevye hozjajstvo* [Track and Track Facilities], 2014, no. 3, pp. 31–34. (in Russian)
3. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Bukhman N.S., Sargsyan A.M. Analysis and characteristics of surface runoff filtration in the ballast prism of the railway track. *Vodospabzhenie i sanitarnaja tehnika* [Water Supply and Sanitary Equipment], 2015, no. 12, pp. 63–72. (in Russian)
4. Strelkov A. K., Teplykh S. Yu., Gorshkalev P. A. Influence of economic activity on the qualitative composition of surface watercourses. *Vodospabzhenie i sanitarnaja tehnika* [Water Supply and Sanitary Equipment], 2014, no. 8, pp. 21–26. (in Russian)
5. Strelkov A. K., Teplykh S. Yu., Gorshkalev P. A., Sargsyan A. M. The current state of the issue of collecting and cleaning surface runoff from the railway. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2014, no. 4, pp. 123–129. (in Russian)
6. Leontiev N.E. *Osnovy teorii fil'tracii* [Fundamentals of filtration theory]. Moscow, Publishing House of the Center for Applied Research at the Faculty of Mechanics and Mathematics of Moscow State University, 2009. 88 p.
7. Masket M. *Techenie odnorodnykh zhidkostej v poristoj srede* [Flow of homogeneous liquids in a porous medium]. Moscow-Izhevsk, SIC "Regular and chaotic dynamics", 2004. 628 p.
8. Bukhman N.S., Teplykh S.Yu., Bukhman L.M. Dynamics of absorption of liquid contaminants into porous soil. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov* [Problems of collection, treatment and transportation of oil and petroleum products], 2021, no. 4(132), pp. 51–59. (in Russian)
9. Bukhman N.S., Teplykh S.Yu., Bukhman L.M. On the linear dependence of the time of fluid accumulation absorption on the height of its layer on the soil surface. *Privolzhsnij nauchnyj zhurnal* [Volga Scientific Journal], 2022, no. 4(64), pp. 73–78. (in Russian)
10. Bukhman N.S., Bukhman L.M. On the rate of absorption of inviscid liquid into the ground. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Planning and Architecture], 2025, vol. 15, no. 2, pp. 37–41. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.02.05

Об авторах:

БУХМАН Николай Сергеевич

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики, профессор кафедры
строительной механики,
инженерной геологии, оснований и фундаментов
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, Молодогвардейская, 244
E-mail: nik3141rambler@rambler.ru

БУХМАН Любовь Михайловна

старший преподаватель
кафедры строительной механики,
инженерной геологии, оснований и фундаментов
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, Молодогвардейская, 244
E-mail: liubov1967@list.ru

BUKHMAN Nikolay S.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor,
Professor of the Physics Chair, Professor of the Structural
Mechanics,
Engineering Geology, Foundations and Foundations Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya st., 244
E-mail: nik3141rambler@rambler.ru

BUKHMAN Lyubov M.

Senior Lecturer of the Structural Mechanics,
Engineering Geology, Foundations and Foundations Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya st., 244
E-mail: liubov1967@list.ru

Для цитирования: Бухман Н.С., Бухман Л.М. Динамика впитывания падающей на пористый грунт жидкости
// Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 4. С. 46–51. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.04.07.

For citation: Bukhman N.S., Bukhman L.M. Dynamics of absorption of liquid falling into a porous soil.
Gradostroitel'stvo i arhitektura [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 4, pp. 46–51. (in Russian)
DOI: 10.17673/Vestnik.2025.04.07.

Принята: 06.05.2025 г.