

**СТРУКТУРА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КРИВОЙ И СПОСОБЫ
ЕЕ АППРОКСИМАЦИИ. ЧАСТЬ 2. ВЕРХНИЙ ПРЕДЕЛ
ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНА ДАРСИ**

**Н. А. Меренцов¹, В. А. Балашов¹, А. Б. Голованчиков¹,
М. В. Топилин², А. В. Персидский³**

*Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,
steep@mail.ru; ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический университет» (1);
ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть» (2),
АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады» (3);
г. Волгоград, Россия*

Ключевые слова: градиент давления; ламинарная фильтрация; микропористая среда; переходная фильтрация; режим течения; скорость фильтрации; фильтрационная кривая; фильтрационные течения.

Аннотация: Дано описание фильтрационной кривой вплоть до скорости фильтрации, при которой обнаруживается появление нелинейной фильтрации за счет инерционной составляющей структуры фильтрационного течения, то есть критического значения скорости фильтрации $v_{кр}$, которое определяет верхнюю границу возможного применения закона Дарси.

Фильтрационные течения используются во многих промышленных технологических процессах и находят широкое применение на предприятиях химической, нефтехимической, нефтегазовой, строительной, металлургической, пищевой, фармакологической, биохимической и смежных отраслях промышленности [1 – 11]. Фильтрационные течения реализуются также в широчайшем спектре экологического массообменного оборудования, в таких процессах, как адсорбция, десорбция, ионный обмен и др. [12 – 23].

Течение жидкости в пористой среде может быть условно представлено течением струек жидкости в извилистых каналах с периодически изменяющейся площадью поперечного течения. В таких каналах жидкость течет в условиях периодического изменения направления и скорости течения вдоль потока, что, как следует из полных уравнений Навье–Стокса, даже при ламинарном режиме течения является причиной появления сил инерции в потоке жидкости [24].

Другим фактором, приводящим к появлениям сил инерции при фильтрационном течении в каналах, является потеря устойчивости ламинарного течения при достижении им некоторого критического значения скорости течения или внешне-

го возмущающего воздействия на поток, что приводит к появлению турбулизации в потоках жидкости в порах и образованию в последующем, при увеличении скорости фильтрации, развитого турбулентного режима фильтрационного течения.

В общем случае полный градиент давления $\Delta P/H$ при фильтрации будет представляться суммой градиентов давления, необходимых для преодоления в потоке сил вязкого трения $(\Delta P/H)_{\text{л}}$ и сил инерции $(\Delta P/H)_{\text{тр}}$

$$\frac{\Delta P}{H} = \left(\frac{\Delta P}{H} \right)_{\text{л}} + \left(\frac{\Delta P}{H} \right)_{\text{тр}}. \quad (1)$$

Графическая интерпретация такого суммирования сил для фильтрационной кривой $\Delta P/H = f(v_{\text{ф}})$ представлена на рис. 1. Зависимость сил вязкого трения и сил инерции от скорости фильтрации различна. Если величина сил вязкого трения пропорциональна скорости течения жидкости в первой степени, то величина сил инерции в фильтрационном потоке, как показывает анализ течения жидкости в поровых струйках, выполненный с использованием теоремы Борда–Карно и с помощью теории подобия [25, 26], а также специального исследования в работе [27], имеет квадратичную зависимость от скорости фильтрации. Поэтому теоретически, с самого начала фильтрационного течения, зависимость градиента давления от скорости фильтрации должна быть нелинейной.

В первоначальный период возрастающего по скорости фильтрационного течения, когда режим течения жидкости в порах будет ламинарный, силы инерции по сравнению с силами вязкого трения настолько малы, что их воздействие на поток экспериментально не обнаруживается. Причиной этого может быть низкая чувствительность датчиков и устройств для замера давления или нахождение разброса экспериментальных данных замера давления в пределах погрешности, допускаемой экспериментальной установкой или условиями эксперимента. В обоих случаях аппроксимация получаемых данных в области малых скоростей фильтрации возможна линейной зависимостью, что соответствует закону Дарси. Таким образом, всегда будет существовать возможность экспериментального подтверждения закона Дарси в пределах точности допускаемой постановкой задачи экспериментального исследования. С учетом данного обстоятельства экспериментально определяемая фильтрационная кривая $\Delta P/H = f(v_{\text{ф}})$ в широком диапазоне возможного изменения скорости фильтрации в общем случае будет выглядеть так, как представлено на рис. 2. На фильтрационной кривой показан линейный

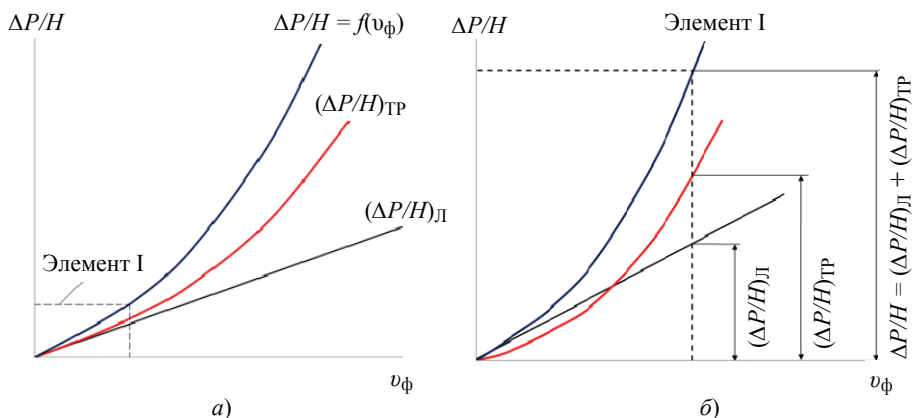


Рис. 1. Геометрическая интерпретация процедуры суммирования сил гидравлического сопротивления в фильтрационном потоке:
a – полная фильтрационная кривая; *б* – начальный участок полной фильтрационной кривой (элемент I)

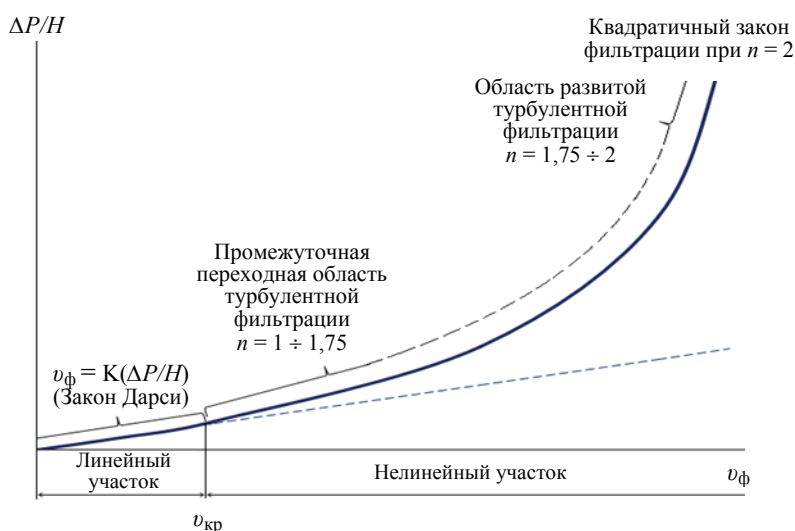


Рис. 2. Экспериментально наблюдаемая фильтрационная кривая $\Delta P/H = f(v_\phi)$ в широком диапазоне возможного изменения скорости фильтрации

участок, в пределах которого применим закон Дарси. Эту область фильтрационного течения обычно называют ламинарной фильтрацией. Фильтрационная кривая в пределах данного участка аппроксимируется зависимостью $\Delta P/H = f(v_\phi)$, которая на основании закона Дарси является линейной и, будучи выраженной через параметры, характеризующие структуру пористой среды, известна как уравнение Козени–Кармана.

По мере увеличения скорости фильтрации составляющая гидравлического сопротивления, обусловленная действием сил инерции и возрастающая в связи с развитием турбулизации во внутрипоровом пространстве более интенсивными темпами, чем силы вязкого трения, достигает величины, достаточной для обнаружения ее присутствия в общем гидравлическом сопротивлении с помощью используемых средств замера давления. С этого момента экспериментально получаемая зависимость $\Delta P/H = f(v_\phi)$ становится нелинейной, плавно отклоняясь в сторону увеличения общего гидравлического сопротивления. Скорость фильтрации, при которой обнаруживается появление нелинейной фильтрации, является тем ее критическим значением $v_{кр}$, которое определяет верхнюю границу возможного применения закона Дарси в пределах допускаемой техникой эксперимента погрешности замера давления и точности графической аппроксимации опытных данных.

Анализ фильтрационных кривых показывает, что в случае возможности аппроксимации части фильтрационной кривой в области малых скоростей фильтрации линейной зависимостью, значение критической скорости $v_{кр}$, определяющей верхнюю границу применения закона Дарси, будет зависеть от двух факторов: структуры пористого материала и вязкости фильтрующейся жидкости. С уменьшением проницаемости пористого слоя и увеличением вязкости жидкости протяженность линейного участка возрастает, в противном случае она уменьшается и может стать исчезающе малой. На рисунках 3 и 4 изображены графики фильтрационных кривых, демонстрирующие возможность существования таких эффектов.

На рисунке 3 изображены кривые для фильтрации 96 % глицерина через слой шаровых частиц для разных значений пористости слоя. На всех кривых четко просматривается возможность линейной аппроксимации начального участка фильтрационных кривых. При этом с увеличением пористости длина линейного

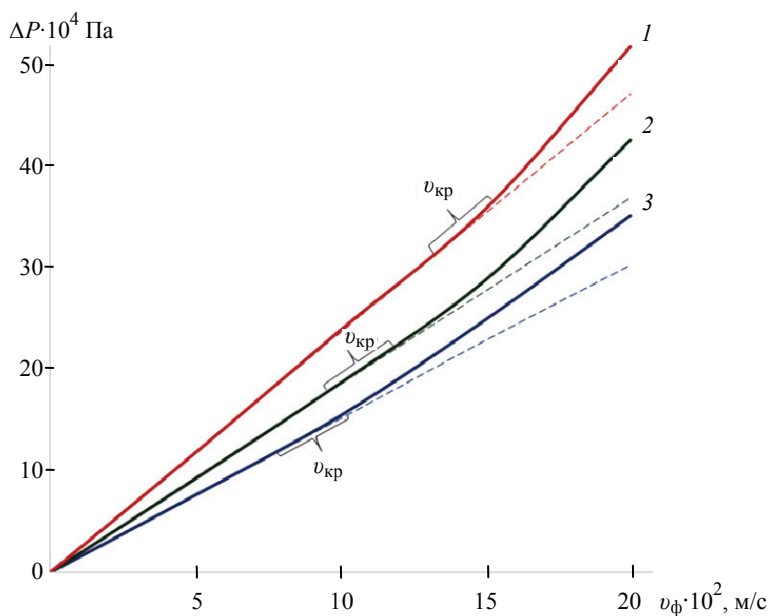


Рис. 3. Фильтрация 96 % водного раствора глицерина через слой шаровых частиц $d = 2,35$ мм:
 $1 - \varepsilon = 0,376$; $2 - \varepsilon = 0,394$; $3 - \varepsilon = 0,400$

участка на кривых сокращается и, очевидно, может стать ничтожно малой при дальнейшем увеличении пористости. На рисунке 4 показаны фильтрационные кривые для фильтрации воды через слой шаровых частиц практически того же размера и пористостью как и в опытах с глицерином. На кривой 1 возможность линейной аппроксимации начального участка наблюдается в пределах области

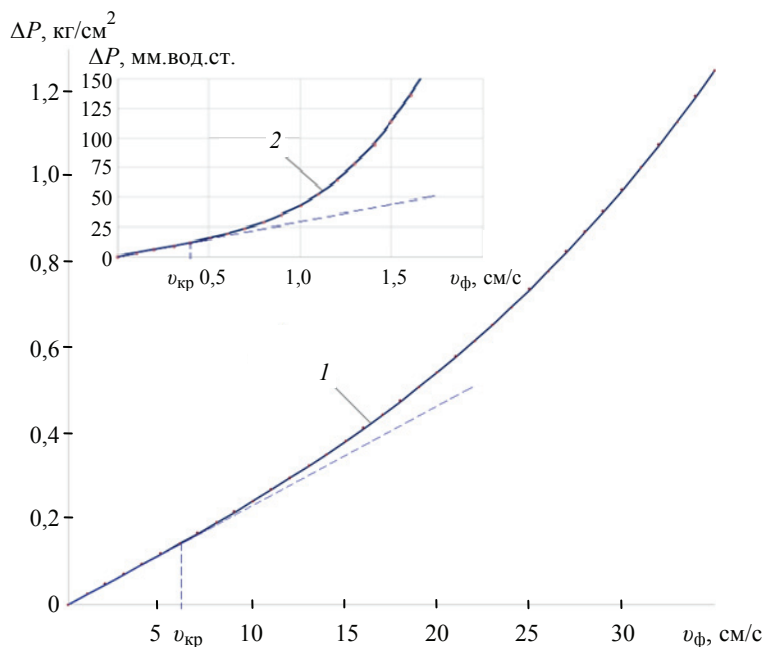


Рис. 4. Фильтрация воды через слой шаровых частиц

до значений скорости фильтрации порядка 7 см/с. Возможность линейной аппроксимации на кривой 2, полученной для слоя шаровых частиц практически того же размера, но для области скоростей фильтрации значительно меньшей, чем для кривой 1, практически на порядок меньше, чем на кривой 1. Очевидно, что если в опытах по фильтрации воды при тех же условиях, которые соблюдались в опытах для кривых 1 и 2, но для области скоростей фильтрации меньших, чем для кривой 2, и появится возможность линейной аппроксимации начального участка, то его размер, в пределах которого окажется возможным существование закона Дарси, будет ничтожно малым относительно области фильтрации, в пределах которой получены кривые 1 и 2.

Увеличение скорости фильтрации сверх $v_{кр}$ приводит к увеличению интенсивности турбулизации фильтрационного течения и постепенному формированию развитого турбулентного режима течения жидкости во внутриворонном пространстве и, соответственно, росту сил инерции в фильтрационном потоке, намного превышающих действие сил вязкого трения. В третьей части данной работы будет подробно дано описание роста сил инерции фильтрационных потоков и приведены уравнения для аппроксимации фильтрационных кривых в широких диапазонах скоростей фильтрации.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых-кандидатов наук МК-1287.2020.8 «Моделирование процессов управления в массообменном экологическом и нефтегазоперерабатывающем оборудовании».

Список литературы

1. Области влияния источника примеси в фильтрационных потоках / Б. Г. Покусаев, Д. А. Казенин, С. П. Карлов, Ю. Н. Сkochилова // Экология и промышленность России. – 2008. – № 4. – С. 41 – 43.
2. Троицкий, В. М. Феноменологический подход к анализу экспериментальных данных о газопроницаемости в пористых средах. Истинная причина эффекта Клинкенберга / В. М. Троицкий // Вести газовой науки. – 2017. – № 2 (30). – С. 110 – 124.
3. Новые конструктивные решения зернистых фильтров и перспективы их применения при тепловой сушке в химической и пищевой технологии / Ю. В. Красовицкий, Е. В. Романюк, Р. А. Важинский, Н. Н. Лобачева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 608 – 614.
4. Леонтьева, А. И. Использование циклично-импульсного режима промывки паст на фильтровальном оборудовании для повышения качественных характеристик пигментов / А. И. Леонтьева, М. А. Колмакова, В. С. Орехов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 113 – 119.
5. Система централизованного сбора, переработки и утилизации отработанных травильных и гальванических растворов и шламов / Н. А. Меренцов, С. А. Бохан, В. Н. Лебедев [и др.] // Вестн. Волгоградского гос. архитектурно-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2018. – № 53 (72). – С. 123 – 131.
6. Self-organization of Processes in Gas and Liquid-Phase Catalytic Reactors / N. A. Merentsov, A. V. Persidskiy, V. V. Groshev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – P. 044041.
7. Голованчиков, А. Б. Уравнение фильтрации для насадочных контактных устройств / А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов, Н. А. Меренцов // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 8 – 10.
8. Авторежимные насадочные колонны для пульсационной жидкостной экстракции / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, М. В. Топилин, А. Б. Голованчиков // Экологические системы и приборы. – 2020. – № 3. – С. 3 – 14. doi: 10.25791/esip.03.2020.1140

9. Степыкин, А. В. Массообменные характеристики регулярной насадки с внедренными теплообменными модулями / А. В. Степыкин, А. А. Сидягин, В. М. Ульянов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 445 – 452. doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.445-452
10. Автоматическое управление режимами работы насадочных аппаратов селективной очистки газовых выбросов / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, В. Н. Лебедев, А. Б. Голованчиков // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 10 – 16. doi: 10.18412/1816-0395-2020-2-10-16
11. Перспективы использования промышленных отходов машиностроительных предприятий для решения экологических проблем строительной отрасли / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, В. Н. Лебедев [и др.] // Вестн. Волгоградского гос. архитектурно-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – № 4 (77). – С. 182 – 195.
12. Голованчиков, А. Б. Моделирование сорбционных процессов с учетом структуры потока : монография / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2018. – 128 с.
13. Математическое моделирование процесса адсорбции углекислого газа / В. Г. Матвейкин, С. Б. Путин, С. А. Скворцов, С. С. Толстошеин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 603 – 609.
14. Сергунин, А. С. Исследование динамики адсорбции и десорбции паров воды активным оксидом алюминия и цеолитом NaX / А. С. Сергунин, С. И. Симаненков, Н. Ц. Гагапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 664 – 671.
15. Адсорбция в колонне непрерывного действия с диффузионной структурой потока по газовой фазе / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов, А. А. Коберник // Экологические системы и приборы. – 2016. – № 2. – С. 23 – 31.
16. Рухов, А. В. Математическое моделирование процессов адсорбции ионов кобальта Co^{2+} активированными углями, модифицированными углеродными нанотрубками / А. В. Рухов, И. В. Романцова, Е. Н. Туголуков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 360 – 367.
17. Моделирование ионообмена в аппарате непрерывного действия с диффузионной структурой потока по жидкости / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов, А. А. Коберник // Экологические системы и приборы. – 2015. – № 10. – С. 15 – 23.
18. Оптимизация и управление циклическим процессом адсорбционного обогащения воздуха кислородом / В. Г. Матвейкин, С. А. Скворцов, Е. И. Акулинин, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 4. – С. 556 – 568. doi: 10.17277/vestnik.2018.04.pp.556-568
19. Golovanchikov, A. V. Modeling of Adsorption Process in Continuous Counter Current Column Having Diffused Flow Structure in Gaseous Phase / A. V. Golovanchikov, N. A. Merentsov, M. V. Topilin // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1278. – P. 012023.
20. Беляев, Д. С. Математическое моделирование процесса адсорбционного разделения газовой смеси при многослойной загрузке шихты / Д. С. Беляев, С. Б. Путин, С. А. Скворцов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 2. – С. 409 – 417.
21. Ломовцева, Е. Е. О пористой структуре гибридных сорбирующих материалов для осушки воздуха / Е. Е. Ломовцева, М. А. Ульянова, Н. Ц. Гагапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 299 – 305.

22. Меренцов, Н. А. Моделирование тепломассообменных насадочных устройств с развитым капельным режимом течения : монография / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2019. – 140 с.
23. Mass Transfer Apparatus for a Wide Range of Environmental Processes / N. A. Merentsov, A. B. Golovanchikov, M. V. Topilin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – P. 055028.
24. Бондаренко, Н. Ф. Физика движения подземных вод / Н. Ф. Бондаренко. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – 215 с.
25. Требин, Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах / Г. Ф. Требин ; под ред. И. М. Муравьева. – М. : Гостоптехиздат, 1959. – 157 с.
26. Пыхачев, Г. Б. Подземная гидравлика / Г. Б. Пыхачев. – М. : Гостоптехиздат, 1961. – 387 с.
27. Кондакова, Л. А. Применение дискретной модели для процесса фильтрования ньютоновской и неньютоновской жидкостей в пористой среде : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Кондакова Любовь Андреевна. – Волгоград, 1979. – 243 с.

The Structure of the Filtration Curve and Methods of Its Approximation. Part 2. The Upper Limit of the Application of Darcy's Law

N. A. Merentsov¹, V. A. Balashov¹, A. B. Golovanchikov¹,
M. V. Topilin², A. V. Persidskiy³

*Department of Processes and Devices of Chemical Industry and Food Production,
steple@mail.ru; Volgograd State Technical University (1);
OOO LUKOIL-Engineering VolgogradNIPImorneft (2),
JSC Federal Research and Production Center "Titan-Barricades" (3);
Volgograd, Russia*

Keywords: pressure gradient; laminar filtration; microporous medium; transient filtration; flow regime; filtration rate; filtration curve; filtration currents.

Abstract: The paper describes the filtration curve up to the filtration rate at which the nonlinear filtration appears due to the inertial component of the filtration flow structure, that is, the critical value of the filtration rate v_{cr} , which determines the upper limit of the possible application of Darcy's law.

References

1. Pokusayev B.G., Kazenin D.A., Karlov S.P., Skochilova Yu.N. [Areas of influence of the source of impurities in filtration flows], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2008, no. 4, pp. 41-43. (In Russ.)
2. Troitskiy V.M. [Phenomenological approach to the analysis of experimental data on gas permeability in porous media. The true cause of the Klinkenberg effect], *Vesti gazovoy nauki* [Lead Gas Science], 2017, no. 2 (30), pp. 110-124. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Krasovitskiy Yu.V., Romanyuk Ye.V., Vazhinskiy R.A., Lobacheva N.N. [New constructive solutions of granular filters and prospects for their use in thermal drying in chemical and food technology], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 608-614. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Leont'yeva A.I., Kolmakova M.A., Orekhov V.S. [The use of a cyclic-pulse mode of washing pastes on filtering equipment to improve the quality characteristics of pigments], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 113-119. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Merentsov N.A., Bokhan S.A., Lebedev V.N., Persidskiy A.V., Balashov V.A. [System of centralized collection, processing and disposal of spent pickling and galvanic solutions and slimes], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture], 2018, no. 53 (72), pp. 123-131. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Groshev V.V., Kozlovtssev V.A., Golovanchikov A.B. Self-organization of Processes in Gas and Liquid-Phase Catalytic Reactors, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399, p. 044041.
7. Golovanchikov A.B., Balashov V.A., Merentsov N.A. [Filtration equation for packed contact devices], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Oil and Gas Engineering], 2017, no. 1, pp. 8-10. (In Russ.)
8. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Topilin M.V., Golovanchikov A.B. [Auto-mode packed columns for pulsating liquid extraction], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2020, no. 3, pp. 3-14, doi: 10.25791/esip.03.2020.1140 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Stepykin A.V., Sidyagin A.A., Ul'yanov V.M. [Mass transfer characteristics of a regular packing with embedded heat exchange modules], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 445-452, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.445-452 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Lebedev V.N., Golovanchikov A.B. [Automatic control of operating modes of packed devices for selective purification of gas emissions], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2020, vol. 24, no. 2, pp. 10-16, doi: 10.18412/1816-0395-2020-2-10-16 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Lebedev V.N., Karasev A.G., Golovanchikov A.B. [Prospects for the use of industrial waste from machine-building enterprises for solving environmental problems of the construction industry], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture], 2019, no. 4 (77), pp. 182-195. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A. *Modelirovaniye sorbtionnykh protsessov s uchetom struktury potoka: monografiya* [Modeling of sorption processes taking into account the flow structure: monograph], Volgograd: VolgGTU, 2018, 128 p. (In Russ.)
13. Matveykin V.G., Putin S.B., Skvortsov S.A., Tolstoshein S.S. [Mathematical modeling of the adsorption process of carbon dioxide], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 603-609. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Sergunin A.S., Simanenkov S.I., Gatapova N.Ts. [Study of the dynamics of adsorption and desorption of water vapor by active aluminum oxide and zeolite Nax], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 664-671. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A., Kobernik A.A. [Adsorption in a continuous column with a diffusion structure of the flow through the gas phase], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2016, no. 2, pp. 23-31. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Rukhov A.V., Romantsova I.V., Tugolukov Ye.N. [Mathematical modeling of adsorption of cobalt ions by Co^{2+} activated carbons modified with carbon nanotubes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 360-367. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., Merentsov N.A., Kobernik A.A. [Modeling of ion exchange in a continuous apparatus with a diffusion structure of the flow through a liquid], *Ekologicheskiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2015, no. 10, pp. 15-23. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Matveykin V.G., Skvortsov S.A., Akulinin Ye.I., Dvoretzkiy S.I. [Optimization and control of the cyclic process of adsorption enrichment of air with oxygen], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 4, pp. 556-568, doi: 10.17277/vestnik.2018.04.pp.556-568 (In Russ., abstract in Eng.)

19. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A., Topilin M.V. Modeling of Adsorption Process in Continuous Counter Current Column Having Diffused Flow Structure in Gaseous Phase, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1278, p. 012023.

20. Belyayev D.S., Putin S.B., Skvortsov S.A. [Mathematical modeling of the process of adsorption separation of a gas mixture with multilayer loading of a charge], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 2, pp. 409-417. (In Russ., abstract in Eng.)

21. Lomovtseva Ye.Ye., Ul'yanova M.A., Gatapova N.Ts. [On the porous structure of hybrid sorbent materials for air drying], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 299-305. (In Russ., abstract in Eng.)

22. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Balashov V.A. *Modelirovaniye teplomassoobmennyykh nasadochnyykh ustroystv s razvitym kapel'nyim rezhimom techeniya: monografiya* [Modeling of heat and mass transfer packed devices with a developed drip flow regime: monograph], Volgograd: VolgGTU, 2019, 140 p. (In Russ.)

23. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persidskiy A.V., Tezиков D.A. Mass Transfer Apparatus for a Wide Range of Environmental Processes, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399, p. 055028.

24. Bondarenko N.F. *Fizika dvizheniya podzemnykh vod* [Physics of groundwater movement], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973, 215 p. (In Russ.)

25. Trebin G.F., Murav'yev I.M. [Ed.] *Fil'tratsiya zhidkostey i gazov v poristykh sredakh* [Filtration of liquids and gases in porous media], Moscow: Gostoptekhizdat, 1959, 157 p. (In Russ.)

26. Pykhachev G.B. *Podzemnaya gidravlika* [Underground hydraulics], Moscow: Gostoptekhizdat, 1961, 387 p. (In Russ.)

27. Kondakova L.A. *PhD Dissertation (Technical)*, Volgograd, 1979, 243 p. (In Russ.)

Die Struktur der Filtrationskurve und Methoden ihrer Annäherung. Teil 2. Die Obergrenze der Anwendung des Darcy-Gesetzes

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung der Filtrationskurve bis zur Filtrationsgeschwindigkeit gegeben, bei der das Auftreten einer nichtlinearen Filtration aufgrund der Trägheitskomponente der Filtrationsströmungsstruktur erkannt wird, d.h. des kritischen Wertes der Filtrationsgeschwindigkeit v_{cr} , der die obere Grenze der möglichen Anwendung des Darcy-Gesetzes bestimmt.

Structure de la courbe de filtration et méthodes de son approximation. Partie 2. Limite supérieure de l'application de la loi de Darcy

Résumé: Est décrite la courbe de filtrage jusqu'à la vitesse de filtrage à laquelle l'apparition d'un filtrage non linéaire est détectée en raison de la composante inertielle de la structure du courant de filtration, c'est-à-dire de la valeur critique du taux de filtration v_{cr} , qui détermine la limite supérieure de l'application possible de la loi de Darcy.

Авторы: *Меренцов Николай Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Балашов Вячеслав Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Голованчиков Александр Борисович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»; *Топилин Михаил Владимирович* – инженер 2-й категории лаборатории стандартных исследований керна, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть»; *Персидский Александр Владимирович* – ведущий инженер-конструктор, АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады», г. Волгоград, Россия.

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.