

**СТРУКТУРА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КРИВОЙ И СПОСОБЫ
ЕЕ АППРОКСИМАЦИИ. ЧАСТЬ 1. ЗАКОН ДАРСИ И НИЖНИЙ
ПРЕДЕЛ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ. ФИЛЬТРАЦИЯ ЖИДКОСТЕЙ
В МИКРОПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

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

*Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,
steerple@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; режим течения; скорость фильтрации; фильтрационная кривая; фильтрационные течения; фильтрация.

Аннотация: Дано описание нижнего предела применения закона Дарси, который обусловлен воздействием ряда аномальных факторов, возникающих при фильтрационном течении жидкостей через слабопроницаемые мелкодисперсные среды. Рассмотрено влияние таких факторов, как действие сил межмолекулярного взаимодействия; граничные слои и смачиваемость поверхности; градиенты концентрации и электрического потенциала; присутствие в жидкости примесей; газонасыщение и парообразование; изменение структуры пористой среды, отдельно или в совокупности приводящие к нарушению закона Дарси.

Фильтрационные течения используются во многих промышленных технологических процессах и изделиях различных отраслей машиностроения, в технологиях и оборудовании химической промышленности и родственных ей производств [1 – 8]. Фильтрация используется в процессах водоподготовки и экологических технологиях [9 – 18]. Фильтрационные процессы являются неотъемлемой частью гидрологии и технологий добычи нефти и газа [19].

Несмотря на такое разнообразие, для вышперечисленных процессов математические модели и основные закономерности фильтрационного течения, устанавливающие взаимосвязь между скоростью фильтрации и гидравлическим сопротивлением пористого слоя, одинаковые. Первоначальной информацией об исследуемом фильтрационном процессе является экспериментально получаемая зависимость градиента давления от скорости фильтрации $\Delta P/H = f(v_f)$, графическое представление которой называется фильтрационной кривой. Зависимости,

аппроксимирующие фильтрационную кривую в виде единого уравнения, всегда могут быть представлены в форме уравнений регрессии. Однако такие уравнения, достаточно точно отражая зависимость $\Delta P/H = f(v_\phi)$, не могут быть использованы для аналитического исследования различных гидродинамических ситуаций фильтрационного течения, которые могут встречаться в технологическом оборудовании и влиять как на его гидравлическое сопротивление, так и на протекающие в условиях фильтрационного течения тепло- и массообменные процессы.

Уточним основные понятия. Фильтрационная кривая – экспериментально получаемая графическая зависимость $\Delta P/H = f(v_\phi)$. Полная фильтрационная кривая – фильтрационная кривая, построенная в диапазоне изменения скорости фильтрации от ее нулевого значения до развитого турбулентного режима фильтрации. Неполная фильтрационная кривая – часть (участок) полной фильтрационной кривой, ограниченный в ее пределах диапазоном скоростей фильтрации, определяемым целью исследования или техническими возможностями экспериментальной установки. Развитый турбулентный режим фильтрации – режим фильтрации, при котором скорость фильтрации может быть определена с помощью квадратичного закона фильтрации. Аппроксимирующее уравнение – уравнение, представляющее фильтрационную кривую в форме математической зависимости (математическая модель фильтрационной кривой).

В реальных условиях нет необходимости в получении фильтрационной кривой в ее полном возможном диапазоне измерения скоростей фильтрации. Обычно исследования процесса фильтрации выполняются для областей фильтрационного течения, представляющих отдельные участки полной фильтрационной кривой. Диапазон скоростей фильтрации для построения таких участков фильтрационной кривой определяется целью исследования. При решении прикладных задач он может ограничиваться пределом скоростей, определяемым технологическим режимом работы установки или аппарата. При проведении научных исследований стремятся получить кривую фильтрации в более широком диапазоне скоростей фильтрации, чем требуется задачей исследования. Основными зависимостями, используемыми для аппроксимации отдельных участков фильтрационной кривой, являются закон Дарси, уравнение Козени–Кармана, степенные уравнения, квадратичный закон фильтрации и уравнение Дюпюи–Форхгеймера. Отдельные участки фильтрационной кривой могут быть аппроксимированы как одной из этих зависимостей, так и их совокупностью. В случае необходимости полная фильтрационная кривая может быть представлена как состоящая из отдельных участков. Выделение на полной фильтрационной кривой таких участков для аппроксимации разными зависимостями всегда осложняется трудностью определения границ их разделения, которые обусловлены тем, что смена гидродинамических условий внутрипорового течения между соседними участками осуществляется постепенно и плавно. Если при выполнении научных исследований данную границу по умолчанию иногда не принимают, ограничиваясь такими условиями, как «в области больших или малых скоростей» или «по мере увеличения или снижения скорости фильтрации», то при выполнении инженерных расчетов ее выбор должен быть обоснован.

Цель настоящего исследования – выявление условий, позволяющих обоснованно определять границы между соседними участками фильтрационной кривой, состоящей из отдельных участков, аппроксимируемых разными зависимостями.

Закон Дарси устанавливает взаимосвязь между расходом фильтрационного потока, движущей силой процесса и свойствами жидкости и пористой среды, через которую осуществляется фильтрационное течение. Одна из форм зависимости закона Дарси может быть представлена в виде

$$v_\phi = K \frac{\Delta P}{H}, \quad (1)$$

где v_{ϕ} – скорость фильтрации, равная расходу жидкости через единицу площади фильтрационного потока в единицу времени; $\Delta P/H$ – градиент давления, являющийся движущей силой процесса фильтрации и определяемый величиной потери давления ΔP на участке потока длиной H ; K – коэффициент фильтрации, отражающий одновременно совокупное влияние свойств жидкости и структуры пористой среды на гидравлическое сопротивление фильтрационному течению.

Взаимонезависимость свойств жидкостей и структуры потока позволяет представить значение коэффициента фильтрации в виде выражения

$$K = \frac{k}{\mu}, \quad (2)$$

где k – коэффициент проницаемости, учитывающий влияние только структуры пористой среды на фильтрационное течение; μ – вязкость жидкости.

Закон Дарси запишем как [20]

$$v_{\phi} = \frac{k \Delta P}{\mu H}. \quad (3)$$

Закон Дарси находит широкое применение при проведении теоретических и экспериментальных исследований фильтрационных течений и решении прикладных задач. Однако существуют условия, при которых наблюдаются отклонения от закона Дарси, следствием чего является появление его различных модификаций в форме обобщенных уравнений. Недостатком таких уравнений является то, что отклонения закона Дарси от его линейного поведения в большинстве случаев компенсируются введением поправочных коэффициентов, нераскрывающих физическое содержание причин появления нелинейности, что не только ограничивает область их практического использования из-за требований к идентичности по структуре пористого слоя, но и снижает ценность использования при проведении теоретических исследований. Отклонение закона Дарси от линейной зависимости наблюдается как со стороны области малых скоростей фильтрации (нижний предел применения закона Дарси), так и со стороны их высоких значений (верхний предел применения закона Дарси).

Нижний предел применения закона Дарси обусловлен влиянием ряда аномальных факторов, возникающих при фильтрационном течении жидкостей через слабопроницаемые мелкодисперсные среды. Природа данных факторов обусловлена действием сил межмолекулярного взаимодействия на границе соприкосновения жидкостей с твердыми поверхностями, в результате чего в приграничной зоне образуются сольватные слои, свойства которых отличаются от остального объема жидкости. Слои обладают повышенной вязкостью и при течении в узких капиллярах обнаруживают некоторую сдвиговую прочность [21, 22], что позволяет применить к расчету движения таких жидкостей в пористой среде реологический закон вязкопластического течения. Согласно такому подходу к изучению фильтрации движение жидкости должно начаться в крупных порах и по мере увеличения градиента давления охватывать все более мелкие поры, распространяясь на весь объем пористой среды, что и приводит к нарушению выражаемой законом Дарси линейной зависимости между градиентом давления и скоростью фильтрации жидкости. В работе [23] аномально вязкое течение в узком капилляре представляется в виде модели стратифицированного трехслойного потока жидкостей с разной текучестью. Используя для оценки аномальной вязкой жидкости реологическое уравнение Шведова–Бингама, получено уравнение для обобщенного закона Дарси с переменным коэффициентом проницаемости, применение которого, однако, сопряжено с трудностями, связанными с определением реологических свойств протекающей в отдельных слоях аномально вязкой жидкости.

Граничные слои жидкости с реологической структурой потока, отличной от остального объема жидкости, образуются около гидрофильной хорошо смачиваемой поверхности. Ухудшение смачиваемости приводит к уменьшению граничных слоев. В случае лиофобных поверхностей при нарушении условий смачиваемости происходит скольжение жидкости относительно твердой поверхности, создавая тем самым видимость течения с меньшей, чем в основном объеме, вязкостью, что также становится причиной отклонения фильтрационного течения от закона Дарси [22].

К отклонениям от закона Дарси могут приводить и возникающие при фильтрации через тонкопористые среды градиенты концентрации и электрического потенциала. Наличие градиента концентрации приводит к развитию в фильтрационном потоке встречного капиллярно-осмотического течения, а явление электрического потенциала – к кажущемуся росту вязкости в результате торможения фильтрационного течения встречным электроосмосом [22].

Отклонения от закона Дарси могут быть вызваны присутствием в реальных жидкостях коллоидных частиц, полимерных молекул или иных примесей, в результате чего протекающие в тонкопористых средах жидкости становятся неньютоновскими. В то же время экспериментальные исследования показывают, что для чистых жидкостей закон Дарси в таких тонкопористых средах выполняется [20, 21].

Большое количество факторов, как видно, может порождать в фильтрационных течениях жидкостей через мелкопористые среды аномальные эффекты, отдельно или в совокупности приводящие к нарушению закона Дарси, поэтому невозможно точно указать размер пор, общий для всех случаев возможного нарушения данного закона. Ориентировочно для рассматриваемого режима фильтрации через мелкопористые слабопроницаемые среды, назовем его условно как «предламинарный» (микрокапиллярный), размер пор может находиться в пределах 0,03...100 мкм, при этом область меньших размеров пор характерна для эффектов физикохимической природы, а больших – для случаев, когда наличие ньютоновской жидкости примесей превращает ее в раствор, являющийся неньютоновской жидкостью.

Перечень рассмотренных эффектов, приводящих к аномалии фильтрационного течения в тонкопористых средах, неполный. Например, считалось, что структура пористой среды – жесткая, и ее свойства оставались неизменными во времени; фильтрующаяся жидкость изначально являлась ньютоновской и отсутствовали возникающие по разным причинам гистерезисные явления. Не рассматривались и такие факторы, как возможное газонасыщение и парообразование, влияние температуры на поведение жидкости и состояние пористой среды, фильтрация газов через мелкопористые слабопроницаемые среды и др. Множество разнообразных по природе и условиям проявления факторов затрудняет разработку общей теории микрокапиллярной фильтрации.

В каждом конкретном случае набор факторов по природе своего воздействия на гидродинамику микрокапиллярной фильтрации можно классифицировать по следующим признакам: области их принадлежности (природной или техногенной), особенности структуры пористой среды (является объектом естественного образования или промышленного производства), свойствам жидкости (химическим или реологическим). В соответствии с данной классификацией факторов оказывается возможным выделить отдельные направления для проведения локально ориентированных исследований в целях выявления закономерностей микрокапиллярной фильтрации и условий, когда использование уравнения Дарси в расчетах возможно, а когда приводит к недопустимым погрешностям. Такими направлениями, например, могут быть исследования микрокапиллярной фильтрации в химико-технологических и экологических процессах, тонкая очистка технических жидкостей, пропитка строительных материалов и изделий с волокнистой и мелкозернистой структурой и др. Наглядным примером такого подхода к исследованию и получению закономерностей аномального фильтрационного течения грунтовых вод в мелиоративной геологии может служить работа [23].

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. Скочилова // Экология и промышленность России. – 2008. – № 4. – С. 41 – 43.
2. 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. Вазинский, Н. Н. Лобачева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 608 – 614.
3. 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.
4. Эксергетический анализ и выбор энергосберегающих параметров импульсной регенерации фильтров, улавливающих пыль из сушильного агента / Ю. В. Красовицкий, Р. А. Вазинский, Е. В. Романюк [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 605 – 607.
5. 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.
6. 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
7. 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
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

13. 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.
14. Автоматизация процесса адсорбционного разделения газовых смесей и получения водорода / В. Г. Матвейкин, А. А. Ишин, С. А. Скворцов, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 548 – 556.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Требин, Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах / Г. Ф. Требин ; под ред. И. М. Муравьева. – М. : Гостоптехиздат, 1959. – 157 с.
21. Чураев, Н. В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н. В. Чураев. – М. : Химия, 1990. – 372 с.
22. Дерягин, Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. – М. : Наука, 1985. – 399 с.
23. Бондаренко, Н. Ф. Физика движения подземных вод / Н. Ф. Бондаренко. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – 215 с.

**The Structure of Filter Curve and Methods of Its Approximation.
Part 1. Darcy's Law and the Lower Limit of Its Application.
Filtration of Liquids in Microporous Media**

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

*Department of Processes and Devices of Chemical and Food Production,
steeple@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; flow regime; filtration rate; filtration curve; filtration currents; filtration.

Abstract: The description of the lower limit of the application of Darcy's law is given, which is due to the influence of a number of anomalous factors that arise during the filtration flow of liquids through low-permeability finely dispersed media.

The influence of such factors as the action of the forces of intermolecular interaction is considered; boundary layers and surface wettability; concentration and electric potential gradients; the presence of impurities in the liquid; gas saturation and vaporization; changes in the structure of the porous medium, separately or in the aggregate, leading to a violation 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. 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.)
3. 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.)
4. Krasovitskiy Yu.V., Vazhinskiy R.A., Romanyuk Ye.V., Lobacheva N.N., Arkhangel'skaya Ye.V. [Exergetic analysis and selection of energy-saving parameters of pulsed regeneration of filters that trap dust from a drying agent], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 605-607. (In Russ., abstract in Eng.)
5. 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.)
6. 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.)
7. 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.)
8. 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.)
9. 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.)
10. 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.)

11. 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.)
12. 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.)
13. 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.)
14. Matveykin V.G., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretzkiy S.I. [Automation of the process of adsorption separation of gas mixtures and hydrogen production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 548-556. (In Russ., abstract in Eng.)
15. 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.)
16. 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.)
17. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persidskiy A.V., Tezikov D.A. Mass Transfer Apparatus for a Wide Range of Environmental Processes, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399, p. 055028.
18. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Balashov V.A. *Modelirovaniye teplomassoobmennyykh nasadochnyykh ustroystv s razvitym kapel'nyy 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.)
19. 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.)
20. 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.)
21. Churayev N.V. *Fizikokhimiya protsessov massoperenosa v poristykh telakh* [Physicochemistry of mass transfer in porous bodies], Moscow: Khimiya, 1990, 372 p. (In Russ.)
22. Deryagin B.V., Churayev N.V., Muller V.M. *Poverkhnostnyye sily* [Surface forces], Moscow: Nauka, 1985, 399 p. (In Russ.)
23. Bondarenko N.F. *Fizika dvizheniya podzemnykh vod* [Physics of groundwater movement], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973, 215 p. (In Russ.)

**Struktur der Filterkurve und Methoden ihrer Annäherung.
Teil 1. Darcys Gesetz und die untere Grenze seiner Anwendungen.
Filtration von Flüssigkeiten in mikroporösen Medien**

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung der unteren Grenze der Anwendung des Darcy-Gesetzes gegeben, die auf den Einfluss einer Reihe anomaler Faktoren zurückzuführen ist, die während des Filtrationsflusses von Flüssigkeiten durch

fein dispergierte Medien mit geringer Permeabilität auftreten. Es ist der Einfluss solcher Faktoren betrachtet, wie die Wirkung der Kräfte der intermolekularen Wechselwirkung; Grenzschichten und Oberflächenbenetzbarkeit; Konzentrations- und elektrische Potentialgradienten; das Vorhandensein von Verunreinigungen in der Flüssigkeit; Gassättigung und Verdampfung; Änderungen in der Struktur des porösen Mediums, die getrennt oder insgesamt zu einem Verstoß gegen Darcys Gesetz führen.

Structure de la courbe de filtration et méthodes d'approximation.

Partie 1. Loi de Darcy et limite inférieure de son application.

Filtration de liquides dans des milieux microporeux

Résumé: Est donnée une description de la limite inférieure de l'application de la loi de Darcy qui est due à l'influence d'un certain nombre de facteurs anormaux se produisant lors de la filtration des fluides à travers des milieux à petites particules faiblement perméables. Est examinée l'influence de tels facteurs que l'action des forces d'interaction inter-moléculaire; les couches limites et la mouillabilité de la surface; les gradients de concentration et de potentiel électrique; la présence d'impuretés dans le liquide; la saturation en gaz et la formation de vapeur; la modification de la structure du milieu poreux, entraînant une violation 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.