

СТРУКТУРА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КРИВОЙ И СПОСОБЫ ЕЕ АППРОКСИМАЦИИ. ЧАСТЬ 3. УРАВНЕНИЯ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КРИВОЙ

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

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

Аннотация: Рассмотрена структура фильтрационной кривой, построенной в широком диапазоне изменения скоростей фильтрации. Дано подробное описание механизма возникновения и развития инерционной составляющей структуры фильтрационного течения. Представлены уравнения, которые могут быть использованы для аппроксимации фильтрационной кривой. Предложено модифицированное уравнение, обеспечивающее плавный переход от ламинарной к турбулентной фильтрации без разрывов полей скоростей и давлений, которое может быть использовано при выполнении расчетов как одномерных, так и пространственных фильтрационных течений.

Введение

Фильтрационные течения используются во многих промышленных технологических процессах и изделиях различных отраслей машиностроения, в технологиях и оборудовании химической промышленности и родственных ей производств [1 – 14]. Фильтрация используется в процессах водоподготовки и экологических технологиях [15 – 41]. Фильтрационные процессы являются неотъемлемой частью гидрологии и технологий добычи нефти и газа [42].

Простейшей зависимостью для описания закономерностей турбулентной фильтрации является степенное уравнение вида [43, 44]

$$v_{\text{ф}} = K_{\text{ТР}} \left(\frac{\Delta P}{H} \right)^{1/n}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ТР}}$ – коэффициент, учитывающий влияние структуры порового пространства на формирование динамики турбулентного течения; $\Delta P/H$ – полный градиент давления; $1/n$ – показатель степени, отражающий интенсивность проявления сил инерции в турбулентном фильтрационном потоке. Так как значения $K_{\text{ТР}}$ и n явля-

ются функциями скорости фильтрации, то уравнение (1) может быть использовано для описания нелинейной зависимости $\Delta P/H = f(v_\phi)$ в общем случае, только в пределах относительно узкого диапазона изменения скорости фильтрации, поэтому оно может быть применимо для аппроксимации нелинейного участка фильтрационной кривой в широком диапазоне изменения скорости фильтрации, только в виде дробно-нелинейной зависимости, как показано на рис. 1, где μ – вязкость жидкости; $v_{кр}$ – критическая скорость фильтрационного течения [45]. Аппроксимация линейной зависимостью этих опытных данных, представленных в координатах $\lg(\Delta P/H) \div \lg v_\phi$, позволяет определить значения $K_{ТР}$ и n . Значения n , найденные для ряда интервалов по возрастающей скорости фильтрации, могут служить показателем меры интенсивности нарастания составляющей общего градиента давления за счет сил инерции, обусловленных возрастающей турбулизацией потока в поровом пространстве.

Экспериментальные исследования показывают, что возможные значения n для нелинейной фильтрации находятся в интервале $1 \dots 2$, возрастая по мере увеличения скорости фильтрации [44]. При развитом внутрипоровом турбулентном режиме фильтрации значение n приближается к двум, и при полном его развитии скорость фильтрации в пределах этой области можно определять с помощью квадратичного закона фильтрации [43]

$$v_\phi = K_{ТР} \sqrt{\frac{\Delta P}{H}}. \quad (2)$$

Процедура определения значений параметров $K_{ТР}$ и n путем линейной аппроксимации экспериментальных данных в системе координат $\lg(\Delta P/H) \div \lg v_\phi$, по существу, равносильна замене отдельных областей фильтрационной кривой отрезками прямых, что позволяет аппроксимировать ее в логарифмической системе координат дробно-линейной зависимостью, которая является другим вариантом графического представления дробно-нелинейной аппроксимации нелинейного участка фильтрационной кривой (см. рис. 1).

В тех случаях, когда условия работы технологического аппарата или иного устройства ограничены узким диапазоном измерения рабочих значений скорости фильтрации в области ее нелинейной зависимости, для гидравлического расчета аппарата достаточно иметь формулу, состоящую из одного степенного уравнения, справедливого для данного диапазона скоростей фильтрации.

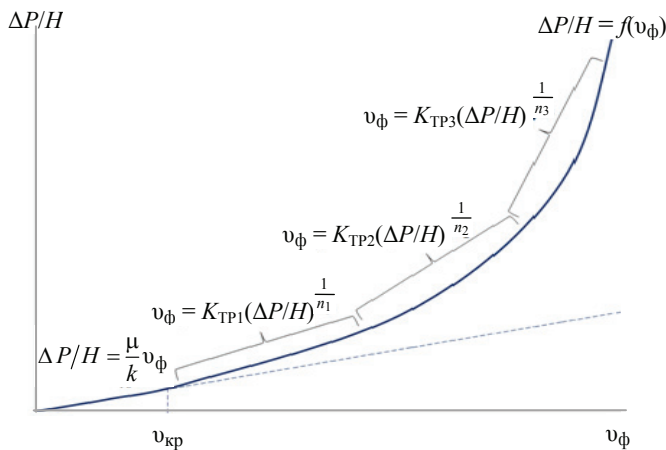


Рис. 1. График дробно-нелинейной аппроксимации нелинейного участка фильтрационной кривой

При графической форме представления кусочно-нелинейной аппроксимации фильтрационной кривой соседние аппроксимируемые участки плавно совмещаются, при равенстве значений скорости фильтрации и градиента давления в точке их сопряжения. Однако из структуры степенных уравнений следует, что значения градиента давления в точке их сопряжения, рассчитанные при одинаковой скорости фильтрации, соответствующей данной точке, не могут быть равными. Не будут равными в точке сопряжения и скорости фильтрации, рассчитанные при общем для этой точки значении градиента давления.

Если при построении соседних участков в логарифмической системе координат, необходимом для определения значений параметров K и n , точки их сопряжения будут находиться в пределах допускаемых экспериментом границ их отклонений, то и разрывы значений поля скорости фильтрации и градиента давления в таких точках не будут выходить за пределы этих границ. Поэтому дробно-нелинейная аппроксимация может применяться при выполнении гидравлических расчетов одномерных фильтрационных потоков. Однако при выполнении расчетов пространственных течений с использованием дифференциальных уравнений модель фильтрационного течения с дробно-нелинейной аппроксимацией фильтрационной кривой неприменима из-за невозможности при наличии разрыва поля скоростей задания граничных условий, обеспечивающих гладкое сопряжение соседних фильтрационных потоков.

Исключая наблюдаемый при экспериментальных исследованиях в области малых скоростей фильтрации эффект погрешности и имея в виду условие независимого суммирования сил вязкого трения и инерции в пределах всего возможного диапазона скорости фильтрации, зависимость между скоростью фильтрации и градиентом давления теоретически должна описываться двухчленной формулой вида [46]

$$\frac{\Delta P}{H} = Av_{\phi} + Bv_{\phi}^2. \quad (3)$$

Впервые такое уравнение было независимо предложено Дюпюи еще в период начальных исследований в области фильтрационных исследований, а затем и Форхгеймером. В настоящее время такое представление о структуре зависимости $\Delta P/H = f(v_{\phi})$ является общепризнанным. В области фильтрации данное уравнение приобрело форму записи, известную как уравнение Дюпюи–Форхгеймера:

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha \mu v_{\phi} + \beta \rho v_{\phi}^2. \quad (4)$$

где α , β – коэффициенты, отражающие влияние структуры пористого слоя на сопротивление, оказываемое фильтрационному течению, соответственно, силами вязкого трения и силами инерции, $\alpha = 1/k$; ρ – плотность потока.

Уравнение Эргуна является частным случаем уравнения Дюпюи–Форхгеймера, когда значения его коэффициентов α и β выражены через параметры, характеризующие структуру зернистой пористой среды [46, 47].

С позиций представлений о гидродинамическом поведении жидкости при фильтрационном течении сквозь поровое пространство и результатов большого количества экспериментальных исследований по фильтрации жидкостей и газов сквозь различные виды пористых сред, формула (4) наиболее полно показывает картину физического содержания процесса фильтрационного течения жидкостей и газов в широком диапазоне скоростей фильтрации независимо от структуры пористой среды и режима течения. Данная формула отражает тот факт, что при любой скорости фильтрации в потоке всегда будут существовать силы вязкого трения и силы инерции. Доля вклада этих сил в общее сопротивление фильтраци-

онному потоку будет различной, в зависимости от скорости фильтрации, и режим фильтрационного течения фактически всегда будет переходный. При снижении скорости фильтрации, когда второе слагаемое становится существенно меньше по сравнению с первым, им можно пренебречь, и уравнение (4) в предельном случае преобразуется в закон Дарси. То же самое можно сказать и о другом предельном состоянии, когда скорость фильтрации возрастает настолько, что пренебрежимо малым становится первое слагаемое и уравнение (4) преобразуется в квадратичный закон фильтрации.

Уравнение (4) может быть использовано для аппроксимации полной фильтрационной кривой только в том случае, если существование линейного участка экспериментально не обнаруживается или им можно пренебречь в силу его незначительной величины. В противном случае ее следует аппроксимировать с учетом наличия линейного участка, аппроксимируемого уравнением Козени–Кармана (рис. 2). При этом линейный и нелинейный участки плавно сопрягаются в точке, определяемой скоростью фильтрации $v_{кр}$, а продолжение линейного участка является касательной к кривой, определяемой уравнением Дюпюи–Форхгеймера. Таким образом, аппроксимация фильтрационной кривой с помощью уравнения Дюпюи–Форхгеймера находится в полном соответствии с физической картиной гидродинамического поведения фильтрационного течения жидкости в пористой среде. Но при этом условие равенства градиентов давления для обоих участков в точке сопряжения при их определении расчетным путем с помощью уравнений Козени–Кармана и Дюпюи–Форхгеймера для скорости $v_{кр}$ не выполняется. Из структуры данных уравнений следует, что для нелинейного участка в точке сопряжения значение градиента давления будет выше на величину его турбулентной составляющей. Однако это не является нарушением условия плавного сопряжения линейного и нелинейного участков фильтрационной кривой, так как оба они находятся в пределах границ ее возможного отклонения, обусловленного техническими возможностями экспериментальной установки и принятой методики проведения эксперимента, поэтому аппроксимация фильтрационной кривой, имеющей линейный участок, с помощью уравнений Козени–Кармана и Дюпюи–Форхгеймера может быть использована при выполнении расчетов одномерных фильтрационных течений. Однако такая аппроксимация оказывается неприемлемой при расчетах пространственных фильтрационных течений с использованием дифференциальных уравнений из-за невозможности задания граничных условий,

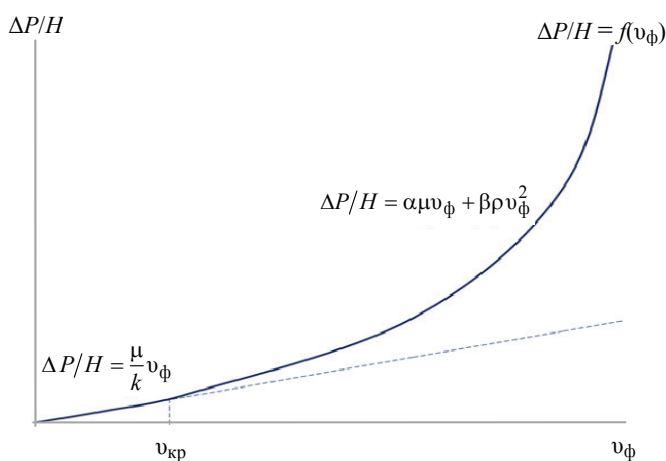


Рис. 2. График аппроксимации нелинейного участка фильтрационной кривой уравнением Дюпюи–Форхгеймера

обеспечивающих плавное сопряжение полей давлений фильтрационных потоков соседних участков. Подобного недостатка лишено модифицированное уравнение Дюпюи–Форхгеймера, в котором суммирование сил вязкого трения и инерции начинается не с начала фильтрационной кривой, а только при достижении критической скорости фильтрации $v_{кр}$, соответствующей началу экспериментально обнаруживаемого проявления действия сил инерции в фильтрационном потоке. Такой способ комбинирования совместного действия сил вязкости и инерции в фильтрационном потоке позволяет аппроксимировать фильтрационную кривую, содержащую линейный и нелинейный участки, единым уравнением

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha \mu v_{\phi} + \left(\frac{v_{\phi} - v_{кр}}{B} \right)^m, \quad (5)$$

где m – показатель степени, изменяющийся в пределах 1..2; B – коэффициент, определяемый структурой пористой среды. Данное уравнение является аппроксимирующим для фильтрационной кривой в нелинейной области, когда $v_{\phi} > v_{кр}$. При $v_{\phi} = v_{кр}$ оно обращается в уравнение Козени–Кармана, но при этом сохраняется равенство производных $d(\Delta P/H)/dv_{\phi}$ на границе сопряжения линейного и нелинейного фильтрационных течений, поэтому уравнение (5) может быть рекомендовано для расчета пространственных фильтрационных течений.

В химико-технологическом и экологическом оборудовании, работающем с использованием фильтрационных течений (фильтрования, сушки, адсорбции, ионного обмена, десорбции, абсорбции, экстракции, ректификации и других процессов), режим фильтрации с квадратичным законом (или близким к нему) во многих случаях оказывается недостижимым или нецелесообразным по причине того, что оптимальные условия работы такого оборудования достигаются еще до начала формирования данного режима. Поэтому в таких случаях практически достаточным оказывается получение фильтрационной кривой в границах, не превышающих область начала формирования развитого турбулентного режима. Зачастую при выполнении расчетов по фильтрации или проведении научных исследований нет необходимости получения фильтрационной кривой в широком интервале скоростей фильтрации и предполагается ее получение только в пределах диапазона значений скоростей фильтрации, определяемых целью исследования или техническими возможностями оборудования экспериментальной установки. В таких условиях «неполная» фильтрационная кривая может быть представлена областью только ламинарной или турбулентной фильтрации или соответствовать части фильтрационной кривой в области их совместного проявления.

При проведении научных исследований в целях получения или уточнения расчетных уравнений, предпочтение отдается аппроксимирующим уравнениям, в структуре которых отражаются значения параметров, характеризующих пористый материал, или они являются зависимостями, допускающими экстраполирование переменных параметров процесса фильтрации за пределы границ, в рамках которых проводились экспериментальные исследования. К таким зависимостям, например, относятся уравнения Козени–Кармана, Эргуна, Дюпюи–Форхгеймера. Если целью экспериментальных исследований является получение интерполяционных зависимостей, то целесообразно использование степенных уравнений и полиномов, для получения которых экспериментальные исследования являются менее затратными. Такие зависимости, являясь менее информативными относительно понимания гидродинамической картины фильтрационного течения, позволяют с высокой точностью аппроксимировать фильтрационную кривую в пределах границ полученных экспериментальных данных, что очень важно для оценки качества и управления работой технологического оборудования, работающего с использованием фильтрационных течений.

Заключение

Рассмотрена структура фильтрационной кривой, построенной в широком диапазоне изменения скоростей фильтрации в пределах от их нулевого значения до развитого турбулентного режима фильтрации. В общем случае полная фильтрационная кривая может быть представлена двумя плавно сопрягаемыми участками: линейным и нелинейным, фильтрацию в пределах которых называют соответственно ламинарной и турбулентной. Показано, что граница сопряжения линейного и нелинейного участков полной фильтрационной кривой не может быть точно определена. Рассмотрено влияние объективных и субъективных факторов на определение скорости фильтрации $v_{кр}$, условно принимаемой в качестве границы их сопряжения. В области малых скоростей фильтрации опытные данные могут быть аппроксимированы линейной зависимостью, выражаемой законом Дарси. Определены границы, в пределах которых проявляется действие закона Дарси.

Рассмотрены уравнения Козени–Кармана, степенные и Дюпюи–Форхгеймера, которые могут быть использованы для аппроксимации фильтрационной кривой; различные варианты аппроксимации фильтрационной кривой указанными уравнениями в условия как однорежимного фильтрационного течения, только ламинарного или турбулентного, так и при наличии сопрягаемых фильтрационных потоков с разными режимами фильтрационного течения.

Показано, что кусочно-нелинейная аппроксимация фильтрационной кривой и ее аппроксимация в области сопряжения линейного и нелинейного участков совместно уравнением Козени–Кармана для линейного участка и уравнениями степенным или Дюпюи–Форхгеймера для нелинейного, могут быть использованы при выполнении расчетов одномерных фильтрационных течений, но оказываются неприемлемыми при выполнении пространственных фильтрационных течений из-за невозможности задания граничных условий, обеспечивающих гладкое сопряжение полей скоростей и давлений.

Предложено модифицированное уравнение Дюпюи–Форхгеймера, которое может быть использовано при выполнении расчетов как одномерных, так и пространственных фильтрационных течений. При аппроксимации нелинейного участка фильтрационной кривой с использованием степенной зависимости или модифицированного уравнения Дюпюи–Форхгеймера, значения показателей степени n и m , найденные для ряда интервалов фильтрационной кривой, построенных по возрастающей скорости фильтрации, могут служить показателем меры интенсивности нарастания инерционной составляющей общего градиента давления.

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. Малыгин, Е. Н. Методика автоматизированного выбора и расчета фильтров для разделения суспензий / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин, С. Н. Маковеев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 659 – 668.
3. Эксергетический анализ и выбор энергосберегающих параметров импульсной регенерации фильтров, улавливающих пыль из сушильного агента / Ю. В. Красовицкий, Р. А. Важинский, Е. В. Романюк [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 605 – 607.

4. 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.
5. Меренцов, Н. А. Моделирование теплообменных насадочных устройств с развитым капельным режимом течения : монография / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2019. – 140 с.
6. Применение углеродных нанотрубок для повышения эффективности работы волокнистых фильтров сверхтонкого обеспыливания газов / А. Е. Бураков, И. В. Иванова, Е. А. Буракова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 649 – 655.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Автоматическое управление режимами работы аппаратов испарительного охлаждения промышленной оборотной воды / Н. А. Меренцов, В. Н. Лебедев, А. В. Персидский [и др.] // Вестн. Волгоградского гос. архитектурно-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – № 4 (77). – С. 124 – 135.
12. 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
13. 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
14. Химвинга, М. Интенсификация процесса абсорбционной очистки газов в аппаратах распылительного типа / М. Химвинга, С. Ю. Панов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 58 – 67.
15. 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
16. 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.
17. Математическое моделирование процесса обогащения кислородом воздуха в установке короткоциклового адсорбции / Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 2. – С. 341 – 355.

18. Расчеты массообменных процессов с учетом энерго- и ресурсосбережения : учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов, К. В. Черикова. – Волгоград : Волгоградский гос. техн. ун-т, 2019. – 128 с.
19. Голованчиков, А. Б. Моделирование сорбционных процессов с учетом структуры потока : монография / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов. – Волгоград : Волгоградский гос. техн. ун-т, 2018. – 128 с.
20. Современные тенденции по уменьшению энергозатрат кислороддобывающих установок короткоциклового безнагревной адсорбции / Е. И. Акулинин, А. А. Ермаков, Д. С. Дворецкий, С. И. Симаненков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 597 – 601.
21. Моделирование процесса обогащения воздуха кислородом путем поглощения азота в установке короткоциклового адсорбции / Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Е. Н. Туголуков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 182 – 196.
22. 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.
23. Меренцов, Н. А. Экспериментальное исследование характеристик тепло-массообменных насадочных устройств : учеб. пособие / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов. – Волгоград : Волгоградский гос. техн. ун-т, 2018. – 94 с.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. Акулинин, Е. И. Исследование процессов тепло- и массообмена при обогащении воздуха кислородом методом короткоциклового адсорбции / Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 411 – 419.
28. 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.
29. 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
30. 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. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556
31. Golovanchikov, A. B. Modeling of Adsorption Process in Continuous Counter Current Column Having Diffused Flow Structure in Gaseous Phase / A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov, M. V. Topilin // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1278. – P. 012023.

32. Елизарова, В. А. Метод экспресс-оценки адсорбционных свойств поглотителя на основе гидроксида циркония / В. А. Елизарова, Ю. А. Гранкина, Н. Ц. Гагапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 94 – 97. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.094-097
33. 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.
34. 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.
35. Сергунин, А. С. О глубокой осушке воздуха применительно к бортовым кислорододобывающим установкам / А. С. Сергунин, С. И. Симаненков, Н. Ц. Гагапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 197 – 202.
36. Полезная модель к патенту 195520 Российская Федерация, МПК В01D 53/00. Массообменный аппарат для электросорбционных процессов / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, М. В. Топилин, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2019116909 ; заявл. 31.05.2019 ; опубл. 30.01.2020, Бюл. № 4. – 6 с.
37. Полезная модель к патенту 195503 Российская Федерация, МПК В01D 53/06. Массообменный аппарат непрерывного действия / Н. А. Меренцов, М. В. Топилин, А. В. Персидский, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2019116945 ; заявл. 31.05.2019 ; опубл. 29.01.2020, Бюл. № 4. – 6 с.
38. Полезная модель к патенту 195502 Российская Федерация, МПК В01D 53/06. Теплообменный аппарат / Н. А. Меренцов, М. В. Топилин, А. В. Персидский, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2019116903 ; заявл. 31.05.2019 ; опубл. 29.01.2020, Бюл. № 4. – 6 с.
39. Методы концентрирования диоксида углерода в системе регенерации воздуха в условиях длительных пилотируемых космических полетов / Н. В. Постернак, С. Б. Путин, С. И. Симаненков, Н. Ц. Гагапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 173 – 181.
40. Путин, С. Б. Математическое моделирование процесса регенерации воздуха в замкнутом объеме / С. Б. Путин, Д. Л. Симонова, С. А. Скворцов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 953 – 956.
41. Mass Transfer Apparatus for a Wide Range of Environmental Processes / N. A. Merentsov, A. V. Golovanchikov, M. V. Topilin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – P. 055028.
42. 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.
43. Требин, Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах / Г. Ф. Требин ; под ред. И. М. Муравьева. – М. : Гостоптехиздат, 1959. – 157 с.
44. Пыхачев, Г. Б. Подземная гидравлика / Г. Б. Пыхачев. – М. : Гостоптехиздат, 1961. – 387 с.
45. Структура фильтрационной кривой и способы ее аппроксимации. Часть 2. Верхний предел применения закона Дарси / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 245 – 254. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.245-254

46. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Л. : Химия, 1968. – 512 с.

47. Айнштейн, В. Г. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов. – М. : Логос ; Высшая школа, 2014. – 912 с.

The Structure of Filter Curve and Methods of Its Approximation. Part 3. Equations for Filter Curve Approximation

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,
steeples@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; filtration rate; turbulent filtration; filtration curve; filtration currents; filtration.

Abstract: The paper describes the structure of the filtration curve built in a wide range of variation of filtration rates. A detailed description of the mechanism of occurrence and development of the inertial component of the filtration flow structure is given. Equations are presented that can be used to approximate the filtration curve. A modified equation is proposed that provides a smooth transition from laminar to turbulent filtration without discontinuities of the velocity and pressure fields, which can be used when calculating both one-dimensional and spatial filtration flow.

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. Malygin Ye.N., Karpushkin S.V., Makoveyev S.N. [Method of automated selection and calculation of filters for separating suspensions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 659-668. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Krasovitskiy Yu.V., Vazhinskiy R.A., Romanyuk Ye.V., Lobacheva N.N., Arkhan-gel'skaya Ye.V. [Energetic 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.)

4. 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.

5. 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: VolGTU, 2019, 140 p. (In Russ.)

6. Burakov A.Ye., Ivanova I.V., Burakova Ye.A., Tkachev A.G., Tarov V.P. [The use of carbon nanotubes to improve the efficiency of fibrous filters for ultrafine dust removal], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 649-655. (In Russ., abstract in Eng.)
7. 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.)
8. 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.)
9. 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.)
10. 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.)
11. Merentsov N.A., Lebedev V.N., Persidskiy A.V., Shilikhin A.S., Golovanchikov A.B. [Automatic control of operating modes of evaporative cooling apparatus for industrial circulating water], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture], 2019, no. 4 (77), pp. 124-135. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Topilin M.V., Golovanchikov A.B. [Auto-mode packed columns for pulsating liquid extraction], *Ekologicheskkiye 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.)
13. 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.)
14. Khimvinga M., Panov S.Yu. [Intensification of the absorption process of gas cleaning in spray-type devices], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 58-67. (In Russ., abstract in Eng.)
15. 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.)
16. 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.)
17. Akulinin Ye.I., Dvoret'skiy D.S., Dvoret'skiy S.I., Yermakov A. A., Simanenkova S. I. [Mathematical modeling of the process of enrichment with air oxygen in a pressure swing adsorption unit], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 341-355. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Golovanchikov A.B., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A., Cherikova K.V. *Raschety massoobmennykh protsessov s uchetom energo- i resursoberezheniya: uchebnoye posobiye* [Calculations of mass transfer processes taking into account energy and resource conservation: a tutorial], Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2019, 128 p. (In Russ.)
19. 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.)
20. Akulinin Ye.I., Yermakov A.A., Dvoretzkiy D.S., Simanenkoy S.I. [Current trends in reducing the energy consumption of oxygen-extracting installations of short-cycle heatless adsorption], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 597-601. (In Russ., abstract in Eng.)
21. Akulinin Ye.I., Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Tugolukov Ye.N. [Modeling the process of air enrichment with oxygen by nitrogen absorption in a pressure swing adsorption unit], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 182-196. (In Russ., abstract in Eng.)
22. 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.)
23. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Balashov V.A. *Eksperimental'noye issledovaniye kharakteristik teplomassoobmennykh nasadochnykh ustroystv: uchebnoye posobiye* [Experimental study of the characteristics of heat-mass transfer packing devices: a tutorial], Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2018, 94 p. (In Russ.)
24. Sergunin A.S., Simanenkoy 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.)
25. 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], *Ekologicheskkiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2016, no. 2, pp. 23-31. (In Russ., abstract in Eng.)
26. 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.)
27. Akulinin Ye.I., Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I. [Investigation of heat and mass transfer processes during air enrichment with oxygen by the method of pressure swing adsorption], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 411-419. (In Russ., abstract in Eng.)
28. 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], *Ekologicheskkiye sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2015, no. 10, pp. 15-23. (In Russ., abstract in Eng.)
29. 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.)
30. 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, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556 (In Russ., abstract in Eng.)

31. 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.
32. Yelizarova V.A., Grankina Yu.A., Gatapova N.Ts. [Method of rapid assessment of the adsorption properties of an absorber based on zirconium hydroxide], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 94-97, doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.094-097 (In Russ., abstract in Eng.)
33. 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.)
34. 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.)
35. Sergunin A.S., Simanenkov S.I., Gatapova N.Ts. [On deep air drying in relation to onboard oxygen-producing plants], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 197-202. (In Russ., abstract in Eng.)
36. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Topilin M.V., Balashov V.A., Golovanchikov A.B. *Massoobmennyy apparat dlya elektrosorbtsionnykh protsessov* [Mass transfer apparatus for electrosorption processes], Russian Federation, 2020, Utility model to patent 195520. (In Russ.)
37. Merentsov N.A., Topilin M.V., Persidskiy A.V., Balashov V.A., Golovanchikov A.B. *Massoobmennyy apparat nepreryvnogo deystviya* [Mass transfer apparatus of continuous action], Russian Federation, 2020, Utility model to patent 195503. (In Russ.)
38. Merentsov N.A., Topilin M.V., Persidskiy A.V., Balashov V.A., Golovanchikov A.B. *Teplomassoobmennyy apparat* [Heat and mass transfer apparatus], Russian Federation, 2020, Utility model to patent 195502. (In Russ.)
39. Posternak N.V., Putin S.B., Simanenkov S.I., Gatapova N.Ts. [Methods of carbon dioxide concentration in the air regeneration system under conditions of long-term manned space flights], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 173-181. (In Russ., abstract in Eng.)
40. Putin S.B., Simonova D.L., Skvortsov S.A. [Mathematical modeling of the air regeneration process in a closed volume], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 953-956. (In Russ., abstract in Eng.)
41. 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.
42. 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.)
43. 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.)
44. Pykhachev G.B. *Podzemnaya gidravlika* [Underground hydraulics], Moscow: Gostoptekhizdat, 1961, 387 p. (In Russ.)
45. Merentsov N.A., Balashov V.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persidskiy A.V. [The structure of the filtration curve and methods of its approximation. Part 2. Upper limit of application of Darcy's law], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 245-254, doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.245-254 (In Russ., abstract in Eng.)
46. Aerov M.E., Todes O.M. *Gidravlicheskiye i teplovyye osnovy raboty apparatov so stacionarnym i kipyashchim zernistym sloyem* [Hydraulic and thermal foundations of the work of devices with a stationary and boiling granular layer], Leningrad: Khimiya, 1968, 512 p. (In Russ.)

47. Aynshteyn V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. Obshchiy kurs* [Processes and apparatuses of chemical technology. General course], Moscow: Logos, Vysshaya shkola, 2014, 912 p. (In Russ.)

Die Struktur der Filtrationskurve und Methoden ihrer Approximation. Teil 3. Gleichungen zur Approximation der Filtrationskurve

Zusammenfassung: Es ist die Struktur der Filtrationskurve betrachtet, die in einer Vielzahl der Änderung der Filtrationsraten konstruiert ist. Eine detaillierte Beschreibung des Mechanismus des Auftretens und der Entwicklung der Trägheitskomponente der Filtrationsströmungsstruktur ist gegeben. Es sind Gleichungen vorgestellt, die verwendet werden können, um die Filtrationskurve anzunähern. Es ist eine modifizierte Gleichung vorgeschlagen, die einen glatten Übergang von laminarer zu turbulenter Filtration ohne Diskontinuitäten der Geschwindigkeits- und Druckfelder ermöglicht, die bei der Berechnung sowohl eindimensionaler als auch räumlicher Filtrationsströmungen verwendet werden kann.

Structure de la courbe de filtrage et moyens de son approximation. Partie 3. Équations pour l'approximation de la courbe de filtrage

Résumé: Est examinée la structure de la courbe de filtration, construite dans une large gamme de changements de vitesse de filtration. Est donnée une description détaillée du mécanisme de l'apparition et du développement de la composante inertielle de la structure du courant de filtration. Sont présentées les équations qui peuvent être utilisées pour approximer la courbe de filtrage. Est proposé d'utiliser une équation qui assure une transition en douceur de la filtration laminaire à la filtration turbulente sans rupture des champs de vitesse et de pression, qui peut être utilisée dans les calculs des courants de filtration unidimensionnels et ceux spatiaux.

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 ядра, 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 технологическая безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.