

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ СТУПЕНЕЙ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН.

М. М. Баяндина, А. В. Кустов, Я. С. Гончарова, В. Г. Межов, И. В. Голубев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

Аннотация. В статье представлено исследование вихревых контактных ступеней с осевыми и тангенциальными завихрителями ректификационной колонны, применяемой в технологических линиях химической переработки биомассы древесины. Проведена математическая обработка экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению контактных ступеней, с получением зависимостей для определения коэффициента гидравлического сопротивления контактных ступеней.

Знание величины гидравлических потерь в аппарате необходимо также при расчете схем технологической обвязки аппарата. В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе имеются многочисленные данные по исследованию закономерностей изменения гидравлического сопротивления вихревых аппаратов от режимных и конструктивных параметров, с различными типами завихрителей.

Результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления вихревых аппаратов с тангенциальными завихрителями показывают, что гидравлические закономерности в этих аппаратах аналогичны закономерностям в аппарате с осевыми завихрителями.

Ректификация широко используется в следующих отраслях: в технологиях комплексной переработки древесины; в лесохимической промышленности при получении продуктов потребления; при восстановлении экстракционных растворов в процессах извлечения биологически активных веществ из растительного сырья; в технологии химической переработки древесины при производстве этанола; при переработке нарастающих природных отходов газификацией и использования синтез-газа для получения биополимера на стадии регенерации растворителей (хлористый метилен, гипохлорит натрия, гексан и т.д.), где также востребованы высокоэффективные и производительные ректификационные колонны.

В большинстве своём, ректификации подлежат многокомпонентные смеси, как правило, азеотропные, имеющие схожую температуру кипения, что объясняет использование для их разделения многоступенчатых ректификационных колонн. При этом применяются различные способы ректификации, такие как азеотропная, экстрактивная, молекулярная, дробная, парциальная.

Ключевые слова: ректификация, контактная ступень, критерий Рейнольдса, гидравлическое сопротивление, коэффициент гидравлического сопротивления, моделирование, материал.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 5, P. 79–85

HYDRAULIC RESISTANCE OF THE CONTACT STAGES OF THE DISTILLATION COLUMNS.

M. M. Bayandina, A. V. Kustov, Ya. S. Goncharova, V. G. Mezhev, I. V. Golubev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Annotation. The article presents a study of vortex contact steps with axial and tangential swirlers of a distillation column used in technological lines of chemical processing of wood biomass. Mathematical processing of experimental data on the hydraulic resistance of the contact steps was carried out, with the obtaining of dependencies for determining the coefficient of hydraulic resistance of the contact steps.

Knowledge of the magnitude of hydraulic losses in the apparatus is also necessary when calculating the technological strapping schemes of the apparatus. Currently, there are numerous data in the domestic and foreign literature on the study of the laws governing changes in the hydraulic resistance of vortex apparatuses from operating and design parameters, with various types of vortices.

The results of experimental studies of the hydraulic resistance of vortex apparatuses with tangential vortices show that the hydraulic patterns in these apparatuses are similar to those in the apparatus with axial vortices.

Rectification is widely used in the following industries: in the technologies of complex wood processing; in the timber chemical industry in the production of consumer products; in the recovery of extraction solutions in the extraction of biologically active substances from plant raw materials; in the technology of chemical processing of wood in the production of ethanol; when processing increasing natural waste by gasification and using synthesis gas to produce a biopolymer at the stage of solvent regeneration (methylene chloride, sodium hypochlorite, hexane, etc.), where highly efficient and productive distillation columns are also in demand.

For the most part, multicomponent mixtures are subject to rectification, as a rule, azeotropic, having a similar boiling point, which explains the use of multi-stage distillation columns for their separation. At the same time, various methods of rectification are used, such as azeotropic, extractive, molecular, fractional, partial.

Keywords: rectification, contact stage, Reynolds criterion, hydraulic resistance, coefficient of hydraulic resistance, modeling, material.

Ректификация имеет широкое применение в технологических линиях по комплексной переработке древесины; в лесохимической промышленности; при восстановлении экстракционных растворов в процессах извлечения биологически активных веществ. В основном, ректификации подлежат многокомпонентные смеси, в том числе, азеотропные или имеющие близкую температуру кипения, что обуславливает использование для их разделения многоступенчатых колонн [1].

В настоящее время наметилась тенденция использования вихревых контактных тепло- массообменных ступеней для проведения процессов ректификации в технологических линиях по переработке растительного сырья. Вихревые колонны не уступают по своим массообменным параметрам самым эффективным аппаратам насадочного типа [7].

Гидравлическое сопротивление является важной гидродинамической характеристикой контактных ступеней, которая отображает затраты энергии газового потока на проведение процесса массообмена.

В настоящее время имеются многочисленные данные по исследованию закономерностей изменения гидравлического сопротивления вихревых аппаратов от конструктивных параметров, с различными типами завихрителей (рис. 1) [2–6].

Согласно [1; 2], где исследованы массообменные аппараты с осевым завихрителем с углом наклона $45\text{--}75^\circ$, величина гидравлического сопротивления сухих аппаратов пропорциональна квадрату скорости газового потока и увеличивается с ростом угла наклона лопастей завихрителя, что обусловлено возрастанием крутки газового потока. Более подробное исследование вихревых массообменных аппаратов с осевыми завихрителями, с углом наклона лопастей завихрителя $78, 74$ и 60° [3] выявило наличие двух аэродинамических режимов работы вихревого аппарата:

– при первом режиме, турбулентном (скорость газа по сечению < 20 м/с), гидравлическое сопротивление пропорционально скорости газа в степени 1,75;

– при втором, автомодельном – в степени 2.

Оба режима наблюдались как для сухого, так и для орошаемого аппарата. При малых нагрузках по жидкости ($L/G < 2$) сопротивление орошаемого аппарата практически совпадало с сопротивлением сухого аппарата. С увеличением расхода жидкой фазы величина гидравлического сопротивления увеличивалась пропорционально удельной нагрузке аппарата по фазам.

Наличие двух аэродинамических режимов работы вихревых аппаратов с осевыми завихрителями отмечено также в работе [4]. В отличие от работы [3], изменение величины гидравлического сопротивления в турбулентном режиме оказалось пропорциональным скорости газового потока в степени 2,87. Увеличение угла наклона лопастей завихрителя приводит к повышению степени крутки двухфазного газо-жидкостного потока и энергетических потерь в аппарате. Нарушение квадратичной зависимости гидравлического сопротивления вихревого аппарата от расхода газовой фазы может быть обусловлено как аэродинамической структурой потока в аппарате, так и внешними причинами, одной, из которых, является введение в аппарат жидкой фазы. Затраты энергии газового потока на транспорт жидкости составляют часть общих затрат энергии в аппарате. Если эта составляющая не подчиняется квадратичной зависимости, то сопротивление аппарата в целом также будет отклоняться от этой закономерности. Этот факт отражают результаты работы [5], в которой указывается, что если связь гидравлического сопротивления сухого контактного устройства со скоростью газового потока подчиняется квадратичному закону, то наблюдается автомодельность коэффициента гидравлического сопротивления аппарата по расходу газовой фазы.



Рис. 1. Фотографии исследованных завихрителей

a – осевой завихритель; *б* – тангенциальный завихритель; *в* – кромки тангенциального завихрителя

Результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления вихревых аппаратов с тангенциальными завихрителями показывают, что гидравлические закономерности в этих аппаратах аналогичны закономерностям в аппарате с осевыми завихрителями. Так коэффициенты гидравлического сопротивления сухих аппаратов автомодельны по расходу газовой фазы. Величина гидравлических потерь на ступени возрастает с увеличением крутки газового потока [7; 11].

Вместе с тем, закономерности изменения гидравлического сопротивления вихревого орошаемого аппарата с тангенциальным завихрителем отличаются одной характерной особенностью, которая не наблюдается, в аппаратах с другим типами завихрителей. Это связано со снижением величины гидравлического сопротивления орошаемого аппарата ниже величины сопротивления сухого аппарата, при малых нагрузках по жидкой фазе. Результаты обзора показывают, что величина этого снижения довольно существенна и может достигать 50 % величины сопротивления сухого аппарата.

Данные по сопротивлению вихревых аппаратов с тангенциальными завихрителями показывают, что гидравлические потери сухого аппарата подчиняются квадратичной зависимости от скорости газового потока и увеличиваются с уменьшением коэффициента крутки завихрителя, а коэффициенты гидравлического сопротивления орошаемых аппаратов не автомодельны по расходу газовой фазы и полностью определяются соотношением нагрузок по фазам. Особенность зависимости коэффициента сопротивления аппарата от удельной нагрузки по жидкой фазе состоит в том, что при малых значениях нагрузки коэффициент сопротивления вихревого аппарата сначала резко убывает и становится меньше коэффициента сопротивления сухого аппарата, а затем, с увеличением нагрузки, возрастает, асимптотически приближаясь к прямой. Очевидно, что объяснение эффекту снижения гидравлических потерь следует искать во взаимодействии газового потока с дисперсной фазой в рабочем объеме аппарата. При

взаимопроникающем движении газа через вращающийся газо-жидкостный слой происходит перераспределение энергии, идущей на создание крутки потока, в энергию, затрачиваемую на вращение слоя. В результате крутка газового потока падает. При малых удельных нагрузках аппарата по жидкости, затраты энергии на транспорт жидкой фазы вдоль оси аппарата незначительны и общее сопротивление орошаемого аппарата, обусловленное падением крутки газового потока, уменьшается и становится меньше сопротивления сухого аппарата. С увеличением нагрузки аппарата по жидкой фазе, перераспределение энергии газового потока в энергию вращательного движения капельного слоя уменьшается, раскрутка газового потока замедляется, и возрастание расхода энергии на транспорт дисперсной фазы вдоль оси аппарата оказывается преобладающим, что приводит к увеличению общего сопротивления вихревого аппарата.

Различие в функциональном назначении исследованных вихревых аппаратов, в их конструктивных параметрах и режимных условиях, определило разнообразие полученных результатов по гидравлическому сопротивлению и – методов их обобщения и представления.

В зависимости от нагрузки по пару (газу), на контактных ступенях наблюдается определенный гидродинамический режим течения газа и жидкости. Визуальное наблюдение за перемещением струй газа, выходящих из каналов осевых и тангенциальных завихрителей, показывает их некоторое различие в траектории движения. Для осевых завихрителей струя газа при выходе из каналов устремляется в верх, а в тангенциальных – к периферии аппарата. Поэтому при малых расходах газа, когда сила инерции незначительна, на ступени с осевыми завихрителями наблюдается брызгоунос. Кроме того, с целью обеспечения газосодержания по всему объему жидкости на ступени ширина каналов для прохода газа в осевых завихрителях должна быть выполнена равной толщине вращающегося газо-жидкостного слоя [8].

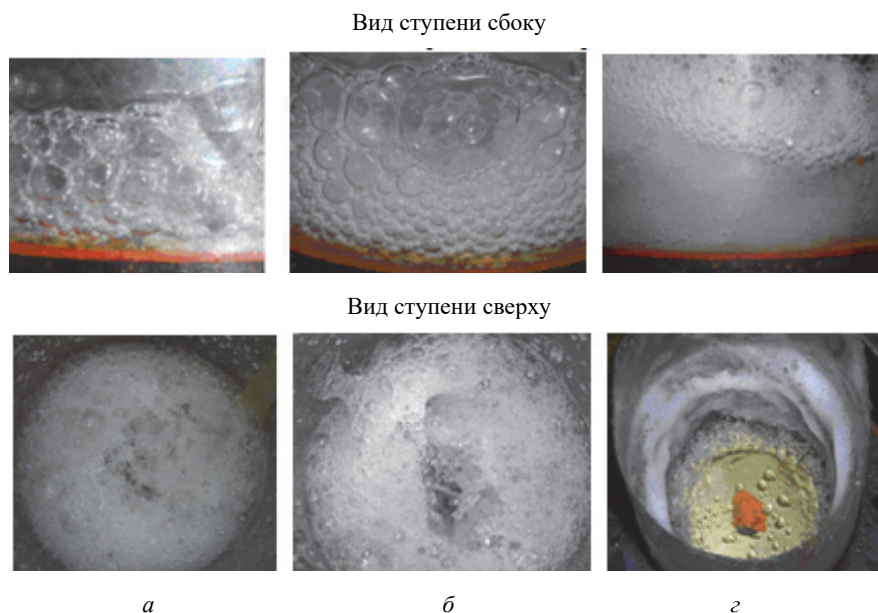


Рис. 2. Режимы газо-жидкостной смеси на ступени

Режимы: а – пенный; б – кольцевой; в – пленочный. $D_c = 114 \text{ мм}$, $R_s = 44 \text{ мм}$

При увеличении расхода наблюдается струйное течение газа. При ширине канала $\delta_0 < (0,5 - 2)$ мм во всем объеме жидкости на ступени наблюдаются пузырьки газа; при $\delta_0 > 2$ мм отмечается граница между движущимися в жидкости струями и пеной, размещенной в верхней части ступени.

С дальнейшим увеличением расхода наблюдается пенный режим, в котором зона жидкости со струями газа исчезает, образуется сплошная подвижная пена.

При достижении определенной критической скорости газа в каналах ($u_{кр}$), наблюдается кольцевой режим, сопровождающийся вращением газожидкостного слоя с начальной полостью, визуальнo фиксируемой при диаметре у основания – 20 мм.

Общее сопротивление контактной ректификационной ступени ΔP вышележащей ступени можно представить в виде

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m. \quad (1)$$

Сопротивление сухой тарелки

$$\Delta P_c = \xi \frac{\rho u^2}{2} \quad (2)$$

и ступени со слоем жидкости

$$\Delta P_m = \rho g H (1 - \phi) + \Delta P_\lambda, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент сопротивления сухой ступени; u – среднерасходная скорость газа на выходе из каналов; ρ – плотность газа; ΔP_λ – потери давления на трение и преодоление силы поверхностного натяжения слоя жидкости на контактной ступени.

В работах [7; 8; 10; 11; 15] приводится зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления контактных вихревых ступеней в виде

$$\xi = \xi_{вх} + \xi_{вых} + \xi_\Gamma, \quad (4)$$

где $\xi_{вх} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{f}{F}\right)^{\frac{3}{4}}$, $\xi_{вых} = \left(1 - \frac{f}{F}\right)^2$ дает заниженные значения.

Авторы приводят расширенную формулу для расчета сопротивлению:

$$\xi = \xi_{вх} + \xi_{вых} + \xi_\Gamma + \xi_{тур}, \quad (5)$$

где

$$\xi_{тур} = 1,36 \times 10^{-2} \alpha^{0,75} \delta_0^{1,3} n^{1,3} R^{-2,5}. \quad (6)$$

Величина коэффициента сопротивления, вызванная изменением направления движения потока газа, для завихрителя с параллельными каналами и плоской кромкой составила $\xi_\Gamma = 0,6$, а для завихрителя с каналами, выполненными из пластин на конус, – $\xi_\Gamma = 0,2$ [9].

Экспериментальные значения коэффициента сопротивления для тангенциальных завихрителей с разным количеством щелей и величиной зазора для прохода газа (пара) представлены на рис. 3 для завихрителей с 36 щелями и 18 щелями в зависимости от величины зазора для прохода газа (пара) [12; 13; 14].

Как видно, при величине критерия Рейнольдса более 1500 наблюдается автомодельный режим, при

котором значение коэффициента гидравлического сопротивления близок прямой линии.

В автомодельном режиме влияние на коэффициент гидравлического сопротивления зависит только от суммарной площади каналов для прохода газа. На рис. 4 показана зависимость коэффициента сопротивления от площади каналов.

Обработка экспериментальных данных позволила получить зависимости для расчета коэффициента сопротивления сухой контактной ступени (рис. 3) при $Re > 1500$ представлен [12; 13; 14]. в виде

$$\xi = 71195 \times f^{1,2}, \quad (4)$$

где f – суммарная площадь каналов завихрителя, m^2 .

Расчет по зависимости (4) позволяет получить величину коэффициента сопротивления с погрешностью порядка 4–6 % от величины экспериментально полученного коэффициента.

Для неавтомодельного режима (Re менее 1500) графики представляют явную степенную зависимость (рис. 5).

Обработка полученных данных позволила получить зависимость для расчета в следующем виде

$$\xi = 0,013 \times f^{-1,33} \times Re^{-0,33}. \quad (5)$$

Далее был исследован коэффициент гидравлического сопротивления для осевого завихрителя (рис. 6). На графике видно, что в процессе работы наблюдается автомодельный режим.

Обработка экспериментальных данных позволила определить зависимость для определения коэффициента в виде

$$\xi = 101195 \times f^{1,6}. \quad (6)$$

Расчет по уравнению (6) позволяет определять коэффициент гидравлического сопротивления осевой контактной ступени с погрешностью 5–7 %.

В дальнейшем проведена обработка экспериментальных данных влияния скорости газа, как составляющей критерия Рейнольдса, на гидравлическое сопротивление, вызванное трением и поверхностным натяжением слоя жидкости. Как установлено, данная зависимость представляет собой линейную зависимость (рис. 7) – точки группируются возле прямой.

Исследование позволило получить зависимости для расчета составляющей:

для ступени с тангенциальным завихрителем

$$-0,0542 Re + 176,71;$$

для ступени с осевым завихрителем

$$0,0476 Re + 2,65.$$

Расчет по полученным зависимостям, представлен на рис. 7 в виде прямых линий.

Как видно, погрешность при расчетах не превышает 10 %.

Полученные зависимости позволяют определять гидравлическое сопротивление вихревых контактных ступеней, применяемых в технологических линиях по переработке гидратизата на основе растительного сырья.

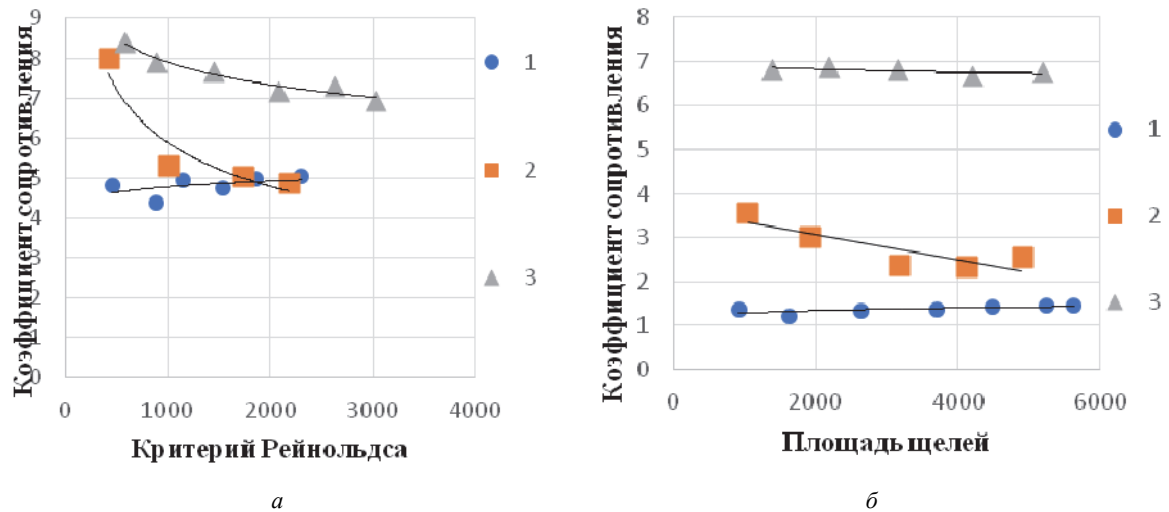


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления тангенциальной контактной ступени от критерия Рейнольдса:

a – ступень с 36 щелями; *б* – ступень с 18 щелями; 1 – зазор 0,7 мм; 2 – зазор 1 мм; 3 – зазор 2 мм

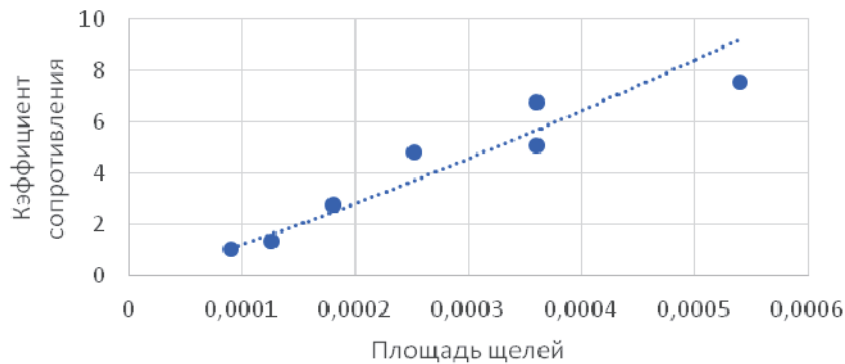


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления от величины площади щелей для автомодельного режима течения газового (парового) потока

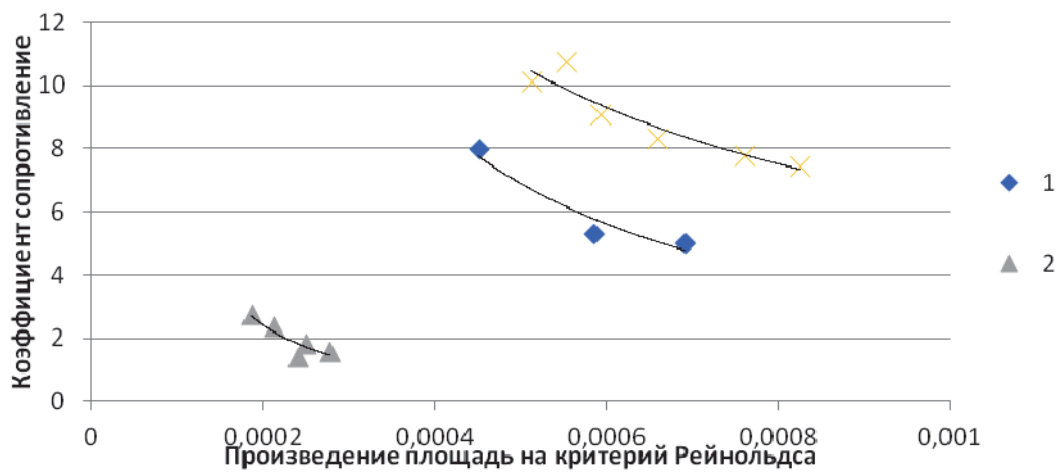


Рис. 5. Зависимость коэффициента сопротивления тангенциальной контактной ступени от критерия Рейнольдса при неавтомодельном режиме:

1 – 36 щелей; 2 – 18 щелей; 3 – 45 щелей

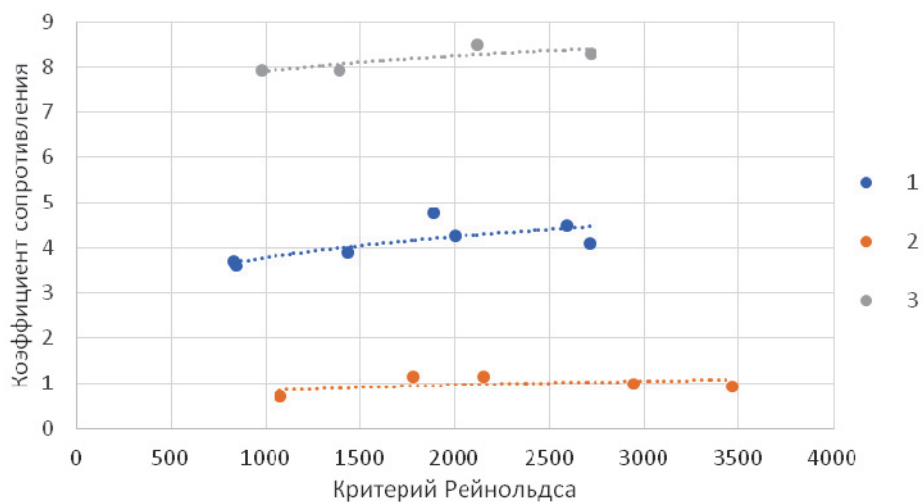


Рис. 6. Зависимость коэффициента сопротивления осевой контактной ступени с 16 щелями от критерия Рейнольдса:
1 – зазор 1 мм; 2 – зазор 0,6 мм; 3 – зазор 2 мм

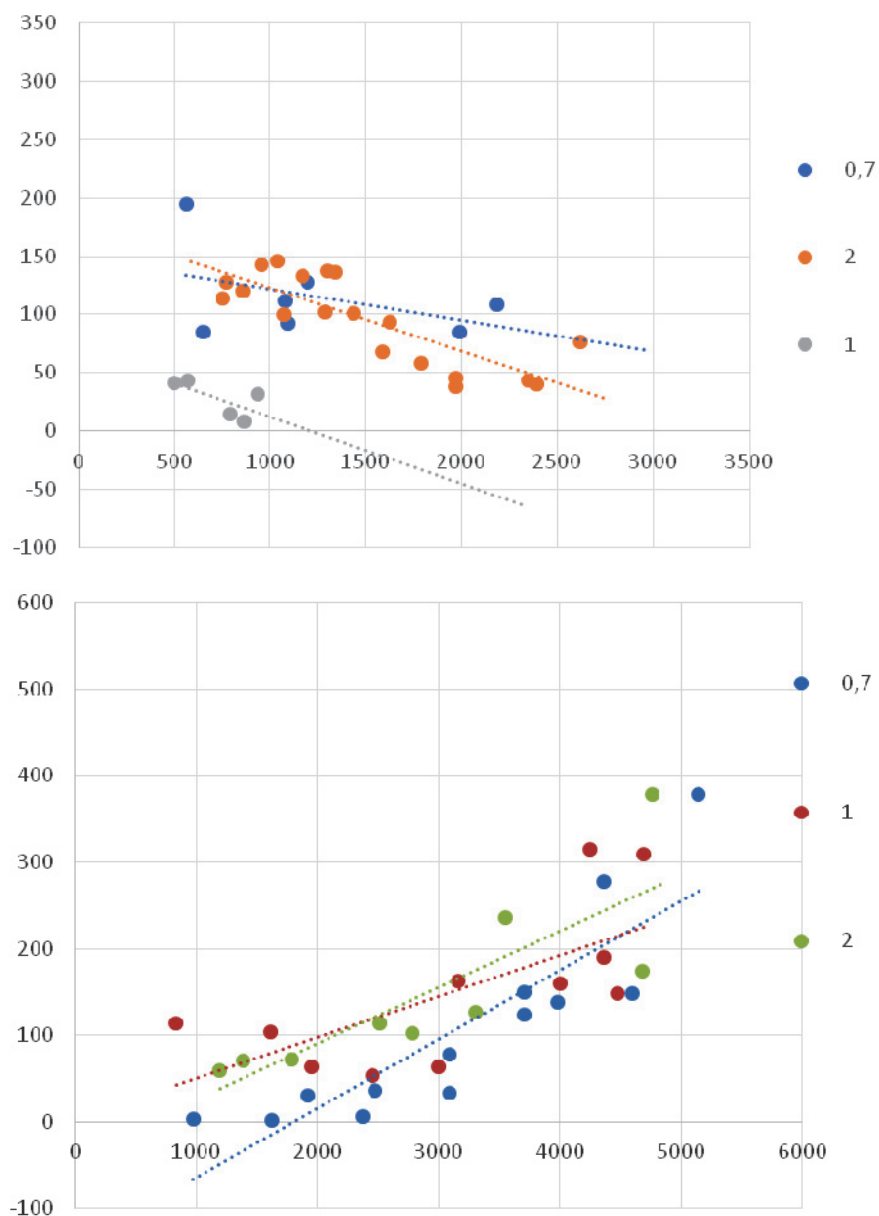


Рис. 7. Зависимость гидравлического сопротивления, вызванного трением, от критерия Рейнольдса

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Вязовкин Е. С. Исследование гидродинамики и эффективности вихревых контактных ступеней : дис. ... канд. техн. наук. Казань : КХТИ, 1972. 182 с.
2. Марголин Е. В. Выбор оптимальных параметров вертикального каплеуловителя М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1976. № 3. С. 11–13.
3. Мусташкин Ф. А. Гидродинамические закономерности в массообменном аппарате вихревого типа // Труды Казан. хим.-технол. ин-та. 1970. Вып. 45. С. 26–31.
4. Левданский Э. И. Исследование скоростной ректификации в аппаратах с прямоточно-центробежными контактными устройствами // 3-я Всес. конф. по теории и практике ректификации. Ч. 2. Северодонецк, 1973. С. 258–261.
5. Платонов В. М. Разделение многокомпонентных смесей. М. : Наука. 1965. 368 с.
6. Войнов Н. А., Кустов А. В., Николаев Н. А. Получение безводного этанола при ректификации под вакуумом // Хвойные бореальной зоны. 2012. № 3-4. С. 373–378.
7. Кустов А. В. Гидродинамика и массообмен на вихревых ректификационных ступенях при переработки растительного сырья : автореф. дис. ... канд. техн. наук; 05.21.03. Красноярск : СибГТУ. 2010.
8. Войнов Н. А., Николаев Н. А., Кустов А. В. Гидродинамика и массообмен в вихревой ректификационной колонне // Химическая промышленность. 2008. Т. 85, № 8. С. 413–419.
9. Вихревые ректификационные ступени с низким гидравлическим сопротивлением / А. В. Кустов [и др.] // Химическая промышленность сегодня. 2017. № 1. С. 34–41.
10. Исследование вихревых ректификационных ступеней / А. В. Кустов [и др.] // Химия растительного сырья. 2016. № 3. С. 125–134.
11. Баяндина М. М., Кустов А. В. Основные гидродинамические зависимости для определения гидравлического сопротивления вихревых контактных устройств ректификационных колонн // Решетневские чтения. 2023. С. 552–554.
12. Баяндина М. М., Кустов А. В. Коэффициент гидравлического сопротивления вихревой контактной ступени ректификационной колонны // Актуальные проблемы науки и техники. 2023. С. 30–33.
13. Баяндина М. М., Кустов А. В. Коэффициент гидравлического сопротивления вихревых контактных ступеней ректификационной колонны // Научное творчество молодежи – лесному комплексу. 2024. С. 397–701.
14. Баяндина М. М., Кустов А. В. Исследование гидравлического сопротивления вихревых контактных ступеней ректификационных колонн // Инноватика-2024. 2024. С. 153–157.
15. Кустов А. В., Корнев В. М., Алашкевич Ю. Д. Исследование гидравлического сопротивления вихревых ректификационных ступеней // Химия растительного сырья. 2020. № 4. С. 529–537.

REFERENCES

1. Vyazovkin E. S. Issledovanie gidrodinamiki i effektivnosti vihevnykh kontaktnykh stupeney : dis. ... kand. tehn. nauk. Kazan' : KHTI, 1972. 182 s.
2. Margolin E. V. Vybora optimalnykh parametrov vertikalnogo kapleulovatelya. M. : CINTIhimneftemash, 1976. № 3. S. 11–13.
3. Mustashkin F. A. Gidrodinamicheskie zakonomernosti v massoobmennom apparate vihevogo tipa // Trudy Kazan. him.-tehnol. in-ta. 1970. Vyp. 45. S. 26–31.
4. Levdanskiy E. I. Issledovanie skorostnoy rektifikatsii v apparatah s pryamotочно-centrobezhnymi kontaktnymi ustroystvami // 3-ya Vses. konf. po teo-rii i praktike rektifikatsii. Chast 2. Severodoneck, 1973. S. 258–261.
5. Platonov V. M. Razdelenie mnogokomponentnykh smesey. M. : Nauka, 1965. 368 s.
6. Vojnov N. A., Kustov A. V., Nikolaev N. A. Poluchenie bezvodnogo etanola pri rektifikatsii pod vakuumom // Hvoynye borealnoy zony. 2012. № 3-4. S. 373–378.
7. Kustov A. V. Gidrodinamika i massoobmen na vihevnykh rektifikatsionnykh stupenyah pri pererabotki rastitelnogo syrya : avtoreferat dis. ... kand. tehn. nauk ; 05.21.03. Krasnoyarsk : SibGTU, 2010.
8. Vojnov N. A., Nikolaev N. A., Kustov A. V. Gidrodinamika i massoobmen v vihevoj rektifikatsionnoj kolonne // Himicheskaya promyshlennost. 2008. T. 85, № 8. S. 413–419.
9. Vihevyye rektifikatsionnye stupeni s nizkim gidravlicheskim soprotivleniem / A. V. Kustov [i dr.] // Himicheskaya promyshlennost segodnya. 2017. № 1. S. 34–41.
10. Issledovanie vihevnykh rektifikatsionnykh stupeney / A. V. Kustov [i dr.] // Himiya rastitelnogo syrya. 2016. № 3. S. 125–134.
11. Bayandina M. M., Kustov A. V. Osnovnye gidrodinamicheskie zavisimosti dlya opredeleniya gidravlicheskogo soprotivleniya vihevnykh kontaktnykh ustroystv rektifikatsionnykh kolonn // Reshetnevskie chteniya. 2023. S. 552–554.
12. Bayandina M. M., Kustov A. V. Koeffitsient gidravlicheskogo soprotivleniya vihevoj kontaktnoy stupeni rektifikatsionnoj kolonny // Aktualnye problemy nauki i tekhniki. 2023. S. 30–33.
13. Bayandina M. M., Kustov A. V. Koeffitsient gidravlicheskogo soprotivleniya vihevnykh kontaktnykh stupeney rektifikatsionnoj kolonny // Nauchnoe tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu. 2024. S. 397–701.
14. Bayandina M. M., Kustov A. V. Issledovanie gidravlicheskogo soprotivleniya vihevnykh kontaktnykh stupeney rektifikatsionnykh kolonn // Innovatika-2024. 2024. S. 153–157.
15. Kustov A. V., Kornev V. M., Alashkevich Yu. D. Issledovanie gidravlicheskogo soprotivleniya vihevnykh rektifikatsionnykh stupeney // Himiya rastitelnogo syrya. 2020. № 4. S. 529–537.

© Баяндина М. М., Кустов А. В., Гончарова Я. С.,
Межов В. Г., Голубев И. В., 2025