

УДК 66.015.23

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВИХРЕВЫХ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ СТУПЕНЕЙ

© *А.В. Кустов**, *В.М. Корнев*, *Ю.Д. Алашкевич*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, пр. имени газеты Красноярский рабочий, 31, Красноярск, 660014 (Россия), e-mail: alexkust@rambler.ru

В статье рассматривается вопрос исследования гидравлического сопротивления вихревых контактных ступеней для ректификационного оборудования, применяемого для разделения спиртосодержащих растворов, полученных на основе гидролизата растительного сырья. На основе проведенных исследований получены зависимости для определения коэффициента гидравлического сопротивления для осевых и тангенциальных завихрителей. Показано, как влияют конструктивные параметры на изменение коэффициента гидравлического сопротивления. Гидравлическое сопротивление является важной гидродинамической характеристикой контактных ступеней, которая характеризует затраты энергии газового потока на проведение процесса массообмена и обуславливает область его применения на практике. 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. Так, коэффициенты гидравлического сопротивления сухих аппаратов автомодельны по расходу газовой фазы.

Ключевые слова: этанол, ректификация, контактная ступень, гидравлическое сопротивление, коэффициент сопротивления.

Введение

Этанол, получаемый на основе гидролизата растительной массы, как нельзя лучше подходит для организации технологии получения топлив из возобновляемых источников сырья. Использование спиртов в составе бензинов, помимо чисто технических задач, связанных с получением композиций, имеющих соответствующие октановые числа, позволяет существенно улучшить и экологические показатели топлива за счет уменьшения содержания бензола и ароматических углеводородов, что приводит к снижению содержания токсичных веществ в продуктах сгорания. Установлено, что добавление абсолютного этилового спирта к бензину повышает антидетонационные свойства моторного топлива, что позволяет применять более высокие степени его сжатия. Кроме того, реализуется более полное сгорание спиртовых топлив, что не только повышает КПД, но и ослабляет такие вредные явления, как разжижение смазки и образование нагаров, и этим значительно удлиняет срок работы мотора [1].

Основной технической проблемой, связанной с использованием этанола в бензине, является присутствие в нем воды, которая способна приводить к разрушению гомогенности раствора с образованием двух

Кустов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: alexkust@rambler.ru
Корнев Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: kornevvm@sibsau.ru
Алашкевич Юрий Давыдович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов промышленных технологий, e-mail: alashkevichud@sibsau.ru

равновесных фаз водно-спиртовой и углеводородно-спиртовой. Практика потребления автомобильных бензинов показывает, что при использовании топливного этанола, содержащего 4–5% воды при температуре окружающей среды ниже +20 °С, наблюдается разрушение гомогенности раствора.

* Автор, с которым следует вести переписку.

В этой связи для обеспечения агрегатной устойчивости товарного бензина требуется использование этанола концентрацией не менее 99.5%об. основного вещества, тогда как промышленный этиловый спирт содержит 96.4–96.7% об. этанола, так как это содержание этилового спирта отвечает его содержанию в азеотропе, образуемом спиртом с водой при нормальном давлении [1].

Ректификация широко используется: 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 основном ректификации подлежат многокомпонентные смеси, как правило, азеотропные, имеющие близкую температуру кипения, что обуславливает использование для их разделения многоступенчатых ректификационных колонн. При этом применяются различные способы ректификации, такие как азеотропная, экстрактивная, молекулярная, дробная, парциальная. Поэтому вопросы повышения эффективности ректификационного оборудования являются актуальными. Анализ возможных путей интенсификации массопередачи в системе газ-жидкость показывает, что использование для проведения этих процессов конструкций барботажных аппаратов не обеспечивает существенного повышения производительности и эффективности. В связи с этим применение центробежного ускорения является наиболее простым способом интенсификации массообмена. Вращение потока способствует дроблению пузырьков пара на ступени и предотвращает капельный унос за счет действия инерции. При этом вихревые контактные ступени обладают низким гидравлическим сопротивлением, что позволяет вести процесс разделения при вакууме, а также уменьшить потребление электроэнергии.

В настоящее время наметилась тенденция использования вихревых контактных теплообменных ступеней для проведения процессов абсорбции и ректификации в технологических линиях, в частности по переработке растительного сырья. Вихревые колонны не уступают по своим массообменным параметрам самым эффективным аппаратам насадочного типа, однако более производительны, менее металлоемки и масштабируемы. А также имеют сравнительно невысокое гидравлическое сопротивление, что позволяет использовать их для ведения процесса под вакуумом.

Согласно [2–4], где исследованы массообменные аппараты с осевым завихрителем с углом наклона 45–75°, 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° [5] выявило наличие двух аэродинамических режимов работы вихревого аппарата:

- при первом режиме, турбулентном (скорость газа по сечению <math><20\text{ м/с}</math>), 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 [6]. В отличие от работы [7], 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 газожидкостного 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 [7], 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.

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. Фотографии исследованных завихрителей представлены на рисунке 1.

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 работы [8] 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 газожидкостный 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.

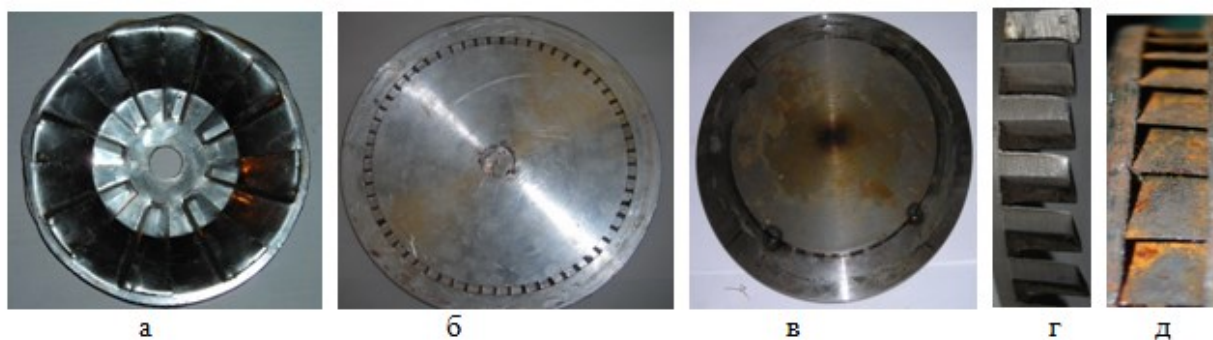


Рис. 1. Фотографии исследованных завихрителей: а – осевой многолопастной завихритель; б – осевой завихритель; в – тангенциальный завихритель; г, д – кромки тангенциального завихрителя

Например, используется расчет гидравлического сопротивления ступени, исходя из закона аддитивности по формуле

$$\Delta P = \Delta P_{\text{сух}} + \Delta P_{\text{м}}. \quad (1)$$

Сопротивление сухой ступени

$$\Delta P_{\text{сух}} = \xi \frac{\rho_{\text{г}} u^2}{2}.$$

Сопротивление орошаемой ступени

$$\Delta P_{\text{м}} = \rho g H (1 - \varphi) + \Delta P_{\lambda} + \Delta P_{\sigma},$$

где ξ – коэффициент сопротивления сухой ступени; u – среднерасходная скорость газа на выходе из каналов, м/с; ΔP_{λ} – потери напора, вызванные касательными напряжениями на межфазной поверхности и трением о стенки, Па; ΔP_{σ} – сопротивление, возникающее при преодолении сил поверхностного натяжения, Па.

Для вычисления перепада давления в вихревом аппарате М.А. Гольдштик [9] предложил учитывать силу трения и центробежную силу, возникающую при вращении потока, следующее уравнение:

$$Eu = B \cdot \frac{3 \cdot \varphi \cdot \rho_{\text{г-ж}}}{8 \cdot \psi \cdot (1 - \varphi_s) \cdot h^2 \cdot \bar{d}_s \cdot \rho_{\text{г}}} \cdot \left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) + \frac{u_{\text{г-ж}}^2}{2} \cdot \frac{\rho_{\text{г-ж}}}{\rho_{\text{г}}} \cdot (1 - \xi^2) + \frac{A}{4 \cdot z^2 \cdot \sin^2 \alpha}, \quad (2)$$

где $Eu = \Delta P / \rho_{\text{г}} \cdot u_o^2$ – критерий Эйлера; $\rho_{\text{г-ж}}$ – плотность газожидкостного слоя; A, B – коэффициенты, зависящие от конструкции завихрителя; ψ – минимальная относительная площадь; h – безразмерная высота аппарата; \bar{d}_s – безразмерный диаметр пузырей; ξ – безразмерное расстояние от оси до границы слоя.

Однако расчет критерия Эйлера через среднерасходную скорость газа по сечению аппарата является недостаточно точным методом.

Экспериментальная часть

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 вверх, 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 газожидкостного слоя [10].

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 ($u_{\text{кр}}$) наблюдается кольцевой режим, сопровождающийся вращением газожидкостного слоя с начальной полостью, визуальной фиксируемой при диаметре у основания – 20 мм.

Характерные режимы течения на контактной ступени с тангенциальным завихрителем представлены на рисунке 2.

Сопротивление контактной ступени определялось по зависимости

$$\Delta P = \Delta P_{\text{сух}} + \Delta P_{\text{м}}. \quad (3)$$

Сопротивление орошаемой ступени определялось как

$$\Delta P_{\text{м}} = \rho g H (1 - \varphi) + \Delta P_{\lambda}, \quad (4)$$

где ΔP_λ – потери напора, вызванные касательными напряжениями на межфазной поверхности, Па; H – высота газожидкостного слоя, м; φ – газосодержание.

Основная часть

Ступень с осевым многолопастным завихрителем. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления сухой ступени с осевым многолопастным завихрителем и плоским днищем представлена на рисунке 3.

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления сухой ступени с осевым многолопастным завихрителем и коническим днищем показана на рисунке 4.

Коэффициент сопротивления ступени $\xi \sim \delta_0^{0,8} n^{0,5} R_3^{-2,5}$ не зависит от длины канала ($l=10-36$ мм), при этом слабо изменяется с увеличением скорости газа ($u > u_k$).

Как установлено, угол наклона полотна осевого завихрителя не оказывает существенного влияния на общее гидравлическое сопротивление. С увеличением объема жидкости на ступени гидравлическая составляющая возрастает. Эффект снижения ΔP при низких объемах жидкости на контактной ступени, обсуждаемый в работе [10], не наблюдался.



Рис. 2. Режимы газожидкостной смеси на ступени. Режимы: а – пенный; б – кольцевой; в – пленочный. $D_c = 114$ мм $R_3 = 44$ мм

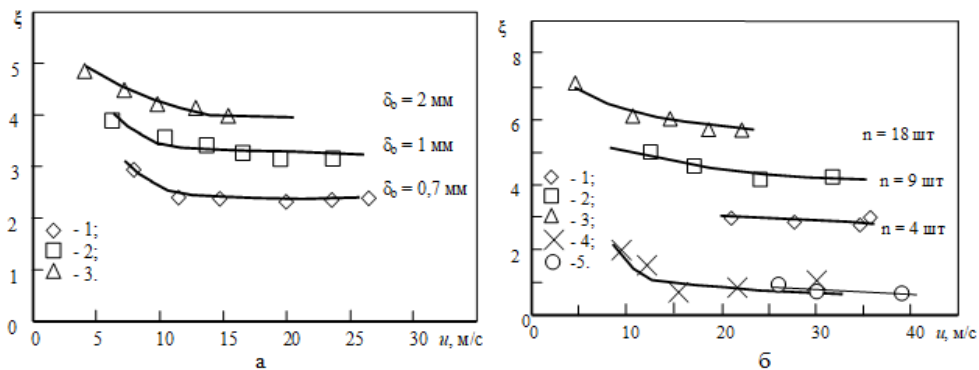


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления осевого завихрителя ($l = 10$ мм) от скорости газа. $R_3 = 30$ мм, $D_c = 100$ мм: а – точки при $n = 36$ шт.: 1 – $\delta_0 = 0,7$ мм; 2 – 1; 3 – 2; б – точки при $\delta_0 = 2$ мм: 1 – $n = 4$ шт.; 2 – 9; 3 – 18; 4 – $n = 60$, $\delta_0 = 1$; 5 – $n = 30$, $\delta_0 = 1$

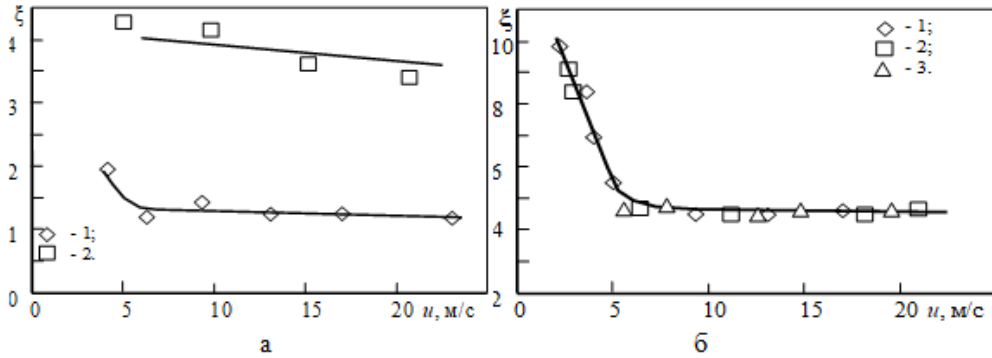


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления конического осевого завихрителя от скорости газа
 а – точки при $n = 16, l = 26$ мм, точки: 1 – $\delta_0 = 0.7$ мм; 2 – 1; б – $\delta_0 = 1,5$ мм; $n = 16$ шт.; 1 – $l = 34$ мм;
 2 – 25; 3 – 4

Гидравлическое сопротивление ступени с тангенциальным завихрителем. Характерные значения гидравлического сопротивления сухой ступени представлены на рисунке 5. Зависимости коэффициента сопротивления от скорости газа представлены на рисунке 6. Для исследуемых ступеней с тангенциальным завихрителем гидравлическое сопротивление и коэффициент сопротивления ξ возрастает с увеличением количества каналов завихрителя и их ширины и при $Re > 1500$ слабо изменяется с увеличением скорости газа. Влияние ширины канала на коэффициент сопротивления связано с изменением масштаба турбулентности (размера вихрей) и лобового сопротивления струи.

Увеличение ξ с повышением количества каналов обусловлено турбулентностью потока и совместным влиянием струй на характер распределения вихрей. Как установлено экспериментально, коэффициент сопротивления тангенциального завихрителя $\xi \approx \alpha^{0.75}$, что согласуется с данными работ [11, 17] и $\xi \approx R_3^{-2.5}$. Конструктивные параметры завихрителя α и R_3 определяют величину крутящего момента, вызванного вращательным движением газа, который с увеличением радиуса вращения и уменьшением угла наклона каналов возрастает, что приводит к дроблению вихрей и снижению их масштаба, а следовательно, и к уменьшению коэффициента сопротивления контактной ступени.

Расчет коэффициента сопротивления по общепринятой зависимости

$$\xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} + \xi_{\text{г}}, \quad (5)$$

где

$$\xi_{\text{вх}} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{f}{F}\right)^{\frac{3}{4}}, \quad \xi_{\text{вых}} = \left(1 - \frac{f}{F}\right)^2$$

дает заниженные значения.

Обработка экспериментальных данных согласно зависимости

$$\xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} + \xi_{\text{г}} + \xi_{\text{тур}}, \quad (6)$$

позволила получить выражение для расчета коэффициента сопротивления ступени, вызванного турбулентностью потока ($Re_2 > 1500$) в виде [11, 13, 14, 16, 17]

$$\xi_{\text{тур}} = 1.36 \times 10^{-2} \alpha^{0.75} \delta_0^{1.3} n^{1.3} R^{-2.5}. \quad (7)$$

Величина коэффициента сопротивления, вызванная изменением направления движения потока газа, для завихрителя с параллельными каналами и плоской кромкой составила $\xi_{\text{г}} = 0.6$, а для завихрителя с каналами, выполненными из пластин на конус, – $\xi_{\text{г}} = 0.2$.

Зависимости коэффициента сопротивления ступеней с тангенциальным завихрителем от скорости газа при разной величине R_3 и формы каналов представлены на рисунке 7.

Для уменьшения величины гидравлического сопротивления ступени необходимо увеличивать площадь каналов (что снижает величину критической скорости газа) и радиус завихрителя, уменьшать угол наклона каналов и их ширину [10, 13, 17–20].

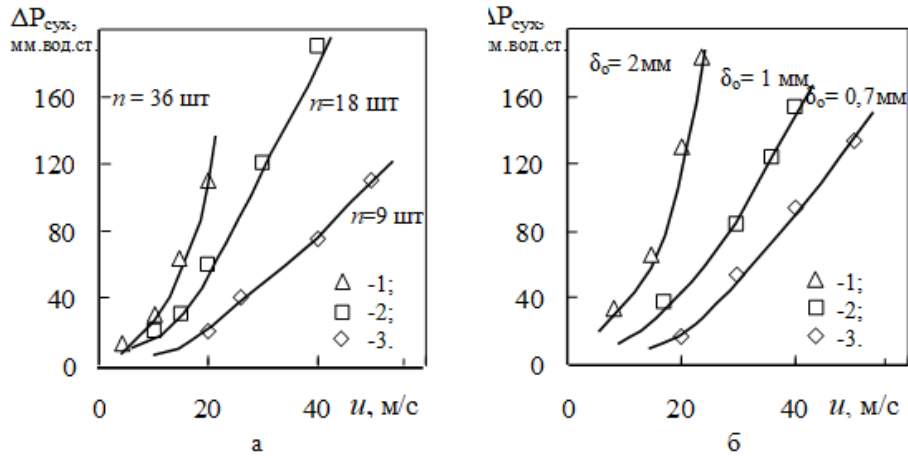


Рис. 5. Зависимость гидравлического сопротивления сухой тарелки с тангенциальным завихрителем от скорости газа в каналах $D_c = 120$ мм, $R_3 = 44$ мм, $l = 10$ мм, а – $\delta_0 = 1$ мм. Точки (1–3): 1 – $n = 36$ шт.; 2 – 18; 3 – 9. б – $n = 18$ шт. Точки (1–3): 1 – $\delta_0 = 2$ мм; 2 – 1; 3 – 0.7

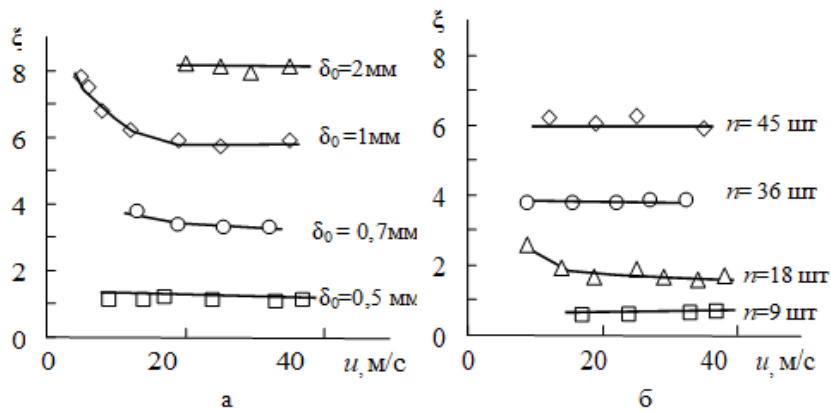
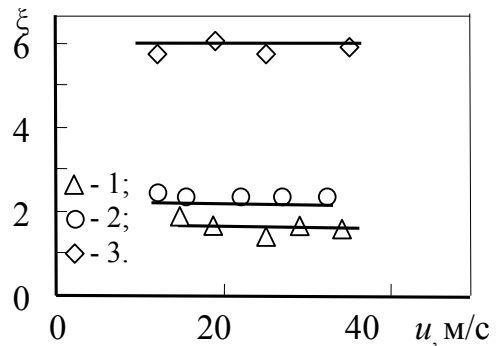


Рис. 6. Зависимость коэффициента сопротивления сухой ступени с тангенциальным завихрителем от скорости газа $D_c = 120$ мм, $R_3 = 44$ мм, $l = 8$ мм, $\alpha = 23^\circ$; а – $n = 45$ шт., б – $\delta_0 = 1$ мм

Рис. 7. Зависимость коэффициента сопротивления контактной ступени с тангенциальным завихрителем от скорости газа
 Экспериментальные точки (1–3): 1 – $R_3 = 65$ мм, каналы выполнены на конус; 2 – $R_3 = 65$ мм, параллельные каналы; 3 – $R_3 = 44$ мм, параллельные каналы



Выводы

Таким образом, было изучено гидравлическое сопротивление осевых и тангенциальных завихрителей и получена зависимость для определения коэффициента сопротивления, вызванного турбулентностью потока. Полученные в работе зависимости могут пригодиться для расчета сопротивления вихревых ректификационных колонн.

Список литературы

1. 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.
2. Кустов А.В. Гидродинамика и массообмен на вихревых ректификационных ступенях при переработки растительного сырья: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2009. 143 с.
3. Вязовкин Е.С. Исследование гидродинамики и эффективности вихревых контактных ступеней: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 1972. 24 с.
4. Марголин Е.В. Выбор оптимальных параметров вертикального каплеуловителя. М., 1976. №3. С. 11–13.
5. Мусташкин Ф.А. Гидродинамические закономерности в массообменном аппарате вихревого типа // Труды Казан. хим.-технол. ин-та. 1970. Вып. 45. С. 26–31.
6. Левданский Э.И. Исследование скоростной ректификации в аппаратах с прямоточно-центробежными контактными устройствами // 3-я Всес. конф. по теории и практике ректификации. Северодонецк, 1973. Ч. 2. С. 258–261.
7. Платонов В.М. Разделение многокомпонентных смесей. М., 1965. 368 с.
8. Ершов А.И. Новые конструкции сепараторов для очистки газов. Обзорная информация. Минск, 1973. 36 с.
9. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск, 2005. 358 с.
10. 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.
11. Овчинников А.А. Динамика двухфазных закрученных турбулентных течений в вихревых сепараторах. Казань: ЗАО «Новое знание», 2005. 288 с.
12. Кустов А.В., Шастовский П.С., Гончарова Я.С., Алашкевич Ю.Д., Сергиякова Ю.Т., Васильченко Е.С., Карелина А.А. Вихревые ректификационные ступени с низким гидравлическим сопротивлением // Химическая промышленность сегодня. 2017. №1. С. 34–41.
13. Кустов А.В., Артищева Н.А., Межов В.Г., Алашкевич Ю.Д. Исследование вихревых ректификационных ступеней // Химия растительного сырья. 2016. №3. С. 125–134.
14. Войнов Н.А., Николаев Н.А., Кустов А.В., Николаев А.Н., Тароватый Д.Н. Вихревые контактные ступени для ректификации // Химия растительного сырья. 2008. №3. С. 173–184.
15. Кустов А.В., Артищева Н.А., Карелина А.А., Литвинова М.М. Исследование вихревых ректификационных ступеней с низким гидравлическим сопротивлением // Химические технологии функциональных материалов: материалы V Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции. 2019. С. 307–309.
16. Литвинова М.М., Карелина А.А. Исследование коэффициента гидравлического сопротивления вихревой контактной ступени ректификационной колонны // Химические технологии функциональных материалов: материалы V Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции. 2019. С. 146–149.
17. Земцов Д.А. Разработка колонн термической ректификации в технологиях переработки растительного сырья: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2017. 112 с.
18. Воронин С.М. Повышение экологичности процессов переработки растительного сырья: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 1997. 200 с.
19. Трачук А.В. Исследование и разработка вихревых аппаратов с вращающимся многофазным слоем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2009. 25 с.
20. Voinov N.A. Hydrodynamics and Mass Exchange in Vortex Rectifying Column // Russian Journal of Applied Chemistry. 2009. Vol. 82. N4. Pp. 730–735.

Поступила в редакцию 27 февраля 2020 г.

После переработки 23 сентября 2020 г.

Принята к публикации 24 сентября 2020 г.

Для цитирования: Кустов А.В., Корнев В.М., Алашкевич Ю.Д. Исследование гидравлического сопротивления вихревых ректификационных ступеней // Химия растительного сырья. 2020. №4. С. 529–537. DOI: 10.14258/jcrpm.2020047390.

Kustov A.V.*, Kornev V.M., Alashkevich Yu.D. RESEARCH OF HYDRAULIC RESISTANCE OF VORTEX RECTIFICATION STAGES

Reshetntv siberian state university of science and technology, pr. Krasnoyarsky Rabochy, 31, Krasnoyarsk, 660014 (Russia), e-mail: alexkust@rambler.ru

The article deals with the issue of studying the hydraulic resistance of vortex contact stages for rectification equipment used for separation of alcohol-containing solutions obtained on the basis of hydrolysate of vegetable raw materials. Based on the conducted research, the dependences for determining the hydraulic resistance coefficient for axial and tangential swirlers are obtained. It is shown how the design parameters affect the change in the coefficient of hydraulic resistance. Hydraulic resistance is an important hydrodynamic characteristic of contact stages, which characterizes the energy consumption of the gas flow for the mass transfer process and determines the scope of its application in practice. Knowledge of the amount of hydraulic losses in the device is also necessary when calculating the schemes of technological strapping of the device. Currently, there are numerous data on the study of regularities in the domestic and foreign literature.

Keywords: ethanol, rectification, contact stage, hydraulic resistance, coefficient of resistance.

References

1. Voynov N.A., Kustov A.V., Nikolayev N.A. *Khvoynnye boreal'noy zony*, 2012, no. 3–4, pp. 373–378. (in Russ.).
2. Kustov A.V. *Gidrodinamika i massoobmen na vikhrevykh rektifikatsionnykh stupenyakh pri pererabotki rasti-tel'nogo syr'ya: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Hydrodynamics and mass transfer at vortex rectification stages during processing of plant raw materials: dis. ... Cand. tech. sciences]. Krasnoyarsk, 2009, 143 p. (in Russ.).
3. Vyazovkin Ye.S. *Issledovaniye gidrodinamiki i effektivnosti vikhrevykh kontaktnykh stupeney: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Research of hydrodynamics and efficiency of vortex contact stages: abstract of dis. ... Cand. tech. sciences]. Kazan', 1972, 24 p. (in Russ.).
4. Margolin Ye.V. *Vybor optimal'nykh parametrov vertikal'nogo kapleulovatelya.* [Selection of the optimal parameters for the vertical drop catcher]. Moscow, 1976, no. 3, pp. 11–13. (in Russ.).
5. Mustashkin F.A. *Trudy Kazananskogo khimiko-tehnologicheskogo instituta*, 1970, issue 45, pp. 26–31. (in Russ.).
6. Levanskiy E.I. *3-ya Vses. konf. po teorii i praktike rektifikatsii.* [3rd Vses. conf. on the theory and practice of rectification]. Severodonetsk, 1973, vol. 2, pp. 258–261. (in Russ.).
7. Platonov V.M. *Razdeleniye mnogokomponentnykh smesey.* [Separation of multicomponent mixtures]. Moscow, 1965, 368 p. (in Russ.).
8. Yershov A.I. *Novyye konstruksii separatorov dlya ochistki gazov. Obzornaya informatsiya.* [New designs of separators for gas cleaning. Survey information]. Minsk, 1973, 36 p. (in Russ.).
9. Gol'dshtik M.A. *Protssesy perenosa v zernistom sloye.* [Transfer processes in the granular layer]. Novosibirsk, 2005, 358 p. (in Russ.).
10. Voynov N.A., Nikolayev N.A., Kustov A.V. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 2008, vol. 85, no. 8, pp. 413–419. (in Russ.).
11. Ovchinnikov A.A. *Dinamika dvukhfaznykh zakruchennykh turbulentnykh techeniy v vikhrevykh separatorakh.* [Dynamics of two-phase swirling turbulent flows in vortex separators]. Kazan', 2005, 288 p. (in Russ.).
12. Kustov A.V., Shastovskiy P.S., Goncharova Ya.S., Alashkevich Yu.D., Sergiyakova Yu.T., Vasil'chenko Ye.S., Karelina A.A. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*, 2017, no. 1, pp. 34–41. (in Russ.).
13. Kustov A.V., Artishcheva N.A., Mezhev V.G., Alashkevich Yu.D. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2016, no. 3, pp. 125–134. (in Russ.).
14. Voynov N.A., Nikolayev N.A., Kustov A.V., Nikolayev A.N., Tarovaty D.N. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2008, no. 3, pp. 173–184. (in Russ.).
15. Kustov A.V., Artishcheva N.A., Karelina A.A., Litvinova M.M. *Khimicheskiye tekhnologii funktsional'nykh materialov. Materialy V Mezhdunarodnoy Rossiysko-Kazakhstanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* [Chemical technologies of functional materials. Materials of the V International Russian-Kazakh scientific-practical conference]. 2019, pp. 307–309. (in Russ.).
16. Litvinova M.M., Karelina A.A. *Khimicheskiye tekhnologii funktsional'nykh materialov. Materialy V Mezhdunarodnoy Rossiysko-Kazakhstanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* [Chemical technologies of functional materials. Materials of the V International Russian-Kazakh scientific-practical conference]. 2019, pp. 146–149. (in Russ.).
17. Zemtsov D.A. *Razrabotka kolonn termicheskoy rektifikatsii v tekhnologiyakh pererabotki rastitel'nogo syr'ya: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Development of columns for thermal rectification in technologies for processing plant raw materials: dis. ... Cand. tech. sciences]. Krasnoyarsk, 2017, 112 p. (in Russ.).
18. Voronin S.M. *Povysheniye ekologichnosti protsessov pererabotki rastitel'nogo syr'ya: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Improving the environmental friendliness of the processing of plant raw materials: dis. ... Cand. tech. sciences]. Krasnoyarsk, 1997, 200 p. (in Russ.).
19. Trachuk A.V. *Issledovaniye i razrabotka vikhrevykh apparatov s vrashchayushchimsya mnogofaznym sloyem: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Research and development of vortex devices with a rotating multiphase layer: abstract of thesis. ... Cand. tech. sciences]. Novosibirsk, 2009, 25 p. (in Russ.).
20. Voinov N.A. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2009, vol. 82, no. 4, pp. 730–735.

Received February 27, 2020

Revised September 23, 2020

Accepted September 24, 2020

For citing: Kustov A.V., Kornev V.M., Alashkevich Yu.D. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 529–537. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020047390.

* Corresponding author.

