

УДК 66.015.23

## ВИХРЕВЫЕ СТУПЕНИ ДЛЯ ТЕПЛОМАСООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

© *А.В. Богаткова, А.С. Фролов, Д.А. Земцов, О.П. Жукова, Н.А. Войнов\**

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, пр. Мира, 82, Красноярск, 660049 (Россия),  
e-mail: n.a.voynov@mail.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамики и массообмена на вихревых ступенях в режиме барботажа, а также данные численного моделирования методом конечных элементов с использованием моделей  $k-\epsilon$  турбулентности и пузырькового течения. Это позволило установить наличие циркуляционного движения жидкости на ступени, определить профили скоростей фаз, получить величину начальной скорости движения газовой фазы, при которой наблюдается согласование экспериментальных и расчетных значений скорости жидкости. Расчетным путем показано влияние цилиндрической перегородки, установленной между завихрителем и стенкой ступени на профиль скорости жидкости и ее распределение в рабочем объеме. Предложено использовать полученные результаты численного моделирования при конструировании многоэлементных ступеней для обеспечения на ней требуемой гидродинамики.

Исследованы новые вихревые контактные устройства с кольцевыми каналами, обладающие меньшим гидравлическим сопротивлением в сравнении с тангенциальными устройствами и обеспечивающие развитую межфазную поверхность, стабильную, без флуктуаций, работу ступени при высоких расходах газа и жидкости.

Представлены данные для определения гидравлического сопротивления вихревой ступени, величины межфазной поверхности, коэффициентов массоотдачи и эффективности в исследуемом диапазоне нагрузок жидкости и газа  $L/G = 10-150$ .

Разработаны конструкции вихревых контактных ступеней для промышленной бражной колонны. Контактные устройства с кольцевыми каналами позволяют довести диссипацию энергии в газовой фазе в барботажно-кольцевом режиме до 5 Вт/кг, увеличить межфазную поверхность до  $2000 \text{ м}^2$  и достигнуть величины поверхностного коэффициента массоотдачи порядка  $(0.5-0.8) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ .

*Ключевые слова:* ректификация, бражная колонна, вихревая ступень, эффективность, коэффициент массоотдачи, сопротивление, межфазная поверхность.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Глубокой переработки растительного сырья» проекта «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья».*

### **Введение**

Контактные ступени большой производительности по жидкости и газу используются в технологических линиях переработки растительного сырья – в абсорберах, скрубберах, аэраторах, исчерпывающих ректификационных колоннах, в том числе в бражных колонных аппаратах при получении этанола из гидролизатов древесины [1, 2]. В связи со спецификой указанного производства в качестве ступеней в ректификационных колоннах в основном используются колпачковые устройства. Тарелки провального и ситчатого типа вследствие их нестабильной, неэффективной работы и потерь обрабатываемого продукта были заменены на

чешуйчатые. Последние ввиду повреждения чешуек при их очистке от отложений и накипи также были сняты с производства. Размещение нестандартных (большого размера) колпачков [3] на тарелках показало их работоспособность, но высокая металлоемкость, а также большие габариты колонн не позволяют рекомендовать их для новых производств и технологий.

---

*Богаткова Анастасия Викторовна* – магистрант,  
e-mail: Sonchic-Sveta@yandex.ru

*Фролов Александр Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, e-mail: frolov-a84@mail.ru

*Земцов Денис Андреевич* – кандидат технических наук,  
e-mail: denis\_zemtsov.92@mail.ru

*Жукова Ольга Петровна* – кандидат технических наук,  
доцент, e-mail: zhukovolga@yandex.ru

*Войнов Николай Александрович* – доктор технических наук, профессор, e-mail: n.a.voynov@mail.ru

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

Разработаны [3–10] тарелки с прямоточно вихревыми контактными ступенями, которые не зарекомендовали себя из-за высокой металлоемкости и не работают на загрязненных смесях. Наиболее перспективными в настоящее время являются вихревые устройства [11–13], выполненные на основе вихревых контактных ступеней и камер, работающие в кольцевом режиме при вращении газожидкостного слоя на поверхности кольцевых перегородок, что позволяет снизить габариты и металлоемкость оборудования и уменьшить количество жидкости на ступени. Однако при больших нагрузках по жидкости, достигающих 150–250 м<sup>3</sup>/час, происходит снижение угловой скорости вращающейся жидкости, что затрудняет поддержание кольцевого режима на ступени. Вихревые ступени в кольцевом режиме работоспособны в определенном диапазоне нагрузок по жидкости и предпочтительны для укрепляющих ректификационных колонн.

В этой связи при больших нагрузках целесообразно применять вихревые контактные устройства, работающие в режиме барботажа. В отличие от колпачковых и клапанных устройств, в каналах завихрителей обеспечиваются высокие скорости, что позволяет внедрять струи газа в жидкость, обеспечивать их дробление, устранять флуктуации газожидкостной смеси над поверхностью жидкости и достигать высоких соотношений потоков L/G. Из конструкций контактных устройств (завихрителей), устанавливаемых на ступенях, наиболее предпочтительными являются тангенциальные устройства с профилированными каналами, например, изученные в работах [14–16]. Из них наименьшее сопротивление и наибольшую межфазную поверхность обеспечивают ступени, снабженные завихрителями с кольцевыми каналами. Схемы таких устройств представлены на рисунке 1.

Цель настоящего исследования – разработка конструкции вихревых контактных ступеней для промышленной бражной колонны на основании полученных расчетных и экспериментальных данных.

### Экспериментальная часть

Размеры исследуемых завихрителей составили: наружный диаметр завихрителя  $D_s = 120–180$  мм, высота каналов завихрителя  $h = 5–10$  мм, ширина каналов  $b = 1–8$  мм, количество каналов  $n = 8–40$  шт.

Определение гидравлического сопротивления ступени, газосодержания, диаметр пузырьков, межфазной поверхности производилось согласно [12, 15, 16]. Массообмен на ступени изучался на примере абсорбции водой кислорода воздуха согласно [4]. Для исследования структуры потоков на ступени и получения полей скоростей жидкой и газовой фаз был применен метод численного моделирования в программе ComsolMultiphysics, которая является интерактивной средой, основанной на дифференциальных уравнениях в частных производных обобщенной версии уравнений Навье-Стокса [17].

Реализованная в программе модель турбулентности k-ε совместно с моделью пузырькового течения Шварца-Тернера, описывающей перемещение в воде воздушных пузырьков со средним диаметром 1–10 мм [18], позволила определить усредненные поля скоростей с учетом возникновения турбулентности за счет взаимодействия пузырьков газа и жидкости.

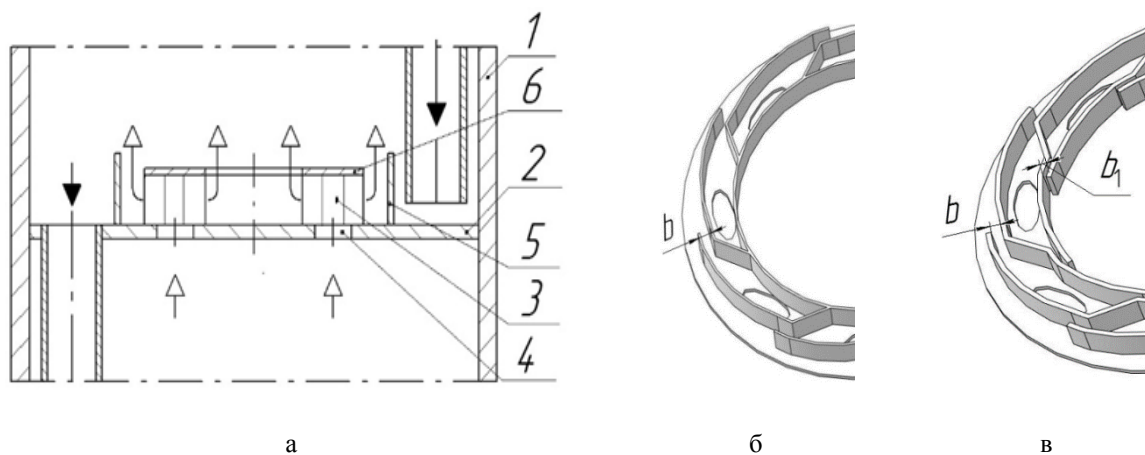


Рис. 1. Схема ступени (а) и завихрителей с кольцевыми каналами (б) и (в). 1 – корпус; 2 – тарелка; 3 – завихритель; 4 – каналы для прохода газа; 5 – гидрозатворный стакан; 6 – крышка;  $\blackrightarrow$  – жидкость;  $\blacktriangleright$  – газ

Программное обеспечение пакета поддерживает конечно-элементную технологию вместе с адаптивным построением сетки и контролем ошибок. В построении расчетной сетки были использованы треугольные элементы со стандартной сеткой типа Normal, обеспечивающей разбиение на элементы и увеличение их количества в зоне взаимодействия газа и жидкости. В параметрах решателя отвечающих за точность (Relativetolerance) было выбрано значение 0.001.

В начальных условиях расчета задавались параметры канала для выхода пузырьков газа ( $10 \times 10$ ) мм, начальная скорость газовой фазы  $u_{Go} = (0.2-0.8)$  м/с, диаметр пузырьков (5–10) мм. Диаметр ступени принимался равным 0.2–0.4 м, высота слоя жидкости на тарелке –  $H_o = 0.1$  м. Физические свойства жидкости (воды) и газовой фазы (воздуха) принимались при температуре 20 °С.

### Обсуждение результатов исследования

Расчетное распределение газовой фазы в объеме жидкости на ступени представлено на рисунке 2. Согласно данным, с увеличением начальной скорости пузырьков газа, выходящих из канала (позиция 2), газосодержание в жидкости возрастает и при  $u_{Go} = 0.8$  м/с достигается максимальная величина  $D_{Г-ж}$ , равная диаметру царги 0.4 м.

Согласно экспериментальным данным, с увеличением расхода подаваемого газа, высоты переливного устройства и наружного диаметра завихрителя величина  $D_{Г-ж}$  возрастает. Так, при высоте перегородки  $H_o = 0.095$  м и расходе газа  $Q = 0.018$  м<sup>3</sup>/с  $D_{Г-ж}$  равна 0.32 м, а при  $H_o = 0.057$  и 0.076 м –  $D_{Г-ж} = 0.18-0.27$  м.

Распределение скорости жидкости на ступени при разных значениях  $u_{Go}$  (рис. 3) показывает наличие циркуляционных контуров жидкой фазы, возникающих как у стенки царги, так и между соседними каналами 2 для выхода газа. Согласно полученным данным, с увеличением начальной скорости газовой фазы область циркуляции жидкости в царге увеличивается.

Характерные профили скорости жидкой фазы представлены на рисунке 4. Наибольшие скорости фаз наблюдаются по оси z. Наличие значений скорости  $U_z$  с отрицательным знаком подтверждает циркуляцию жидкости на ступени.

Согласно расчетным данным, с увеличением начальной скорости газа скорость жидкой фазы возрастает, что интенсифицирует процесс вовлечения пузырьков газа в жидкость и позволяет вовлекать пузырьки газа диаметром до 8 мм в жидкость [19, 20].

Скорость движения жидкости в циркуляционном контуре возрастает с уменьшением расстояния S от стенки царги до завихрителя.

Совпадение экспериментальных значений скорости жидкости, перемещающейся вдоль стенки царги (точки 1 и 2 на рисунке 5) и расчетных значений скорости жидкости  $U_{Lz}$  (линии 3, 4) наблюдается при начальной скорости газа  $u_{Go}$ , равной 0.2 и 0.4 м/с, что соответствует скорости газа в каналах завихрителя 10 и 25 м/с соответственно.

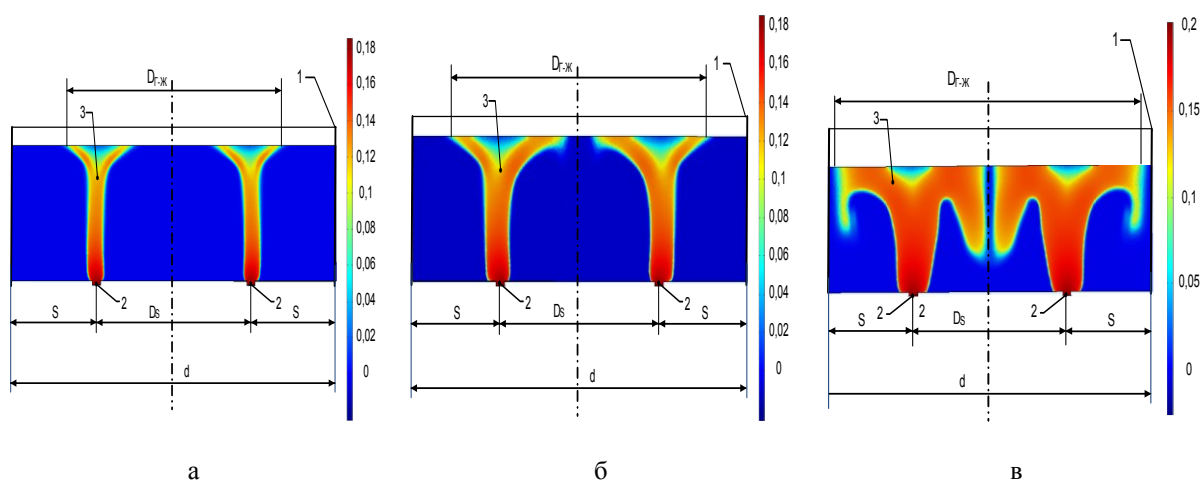


Рис. 2. Распределение газосодержания в жидкости при  $t = 5$  с. Расчетные данные (а–б): а)  $u_{Go} = 0.2$  м/с; б)  $u_{Go} = 0.4$  м/с; в)  $u_{Go} = 0.8$  м/с при диаметре пузырька  $d_b = 5$  мм,  $S = 0.1$  м;  $H_o = 0.05$  м;  $D_s = 0.2$  м;  $d = 0.4$  м: 1 – царга; 2 – канал выхода газовой фазы; 3 – газораспределение

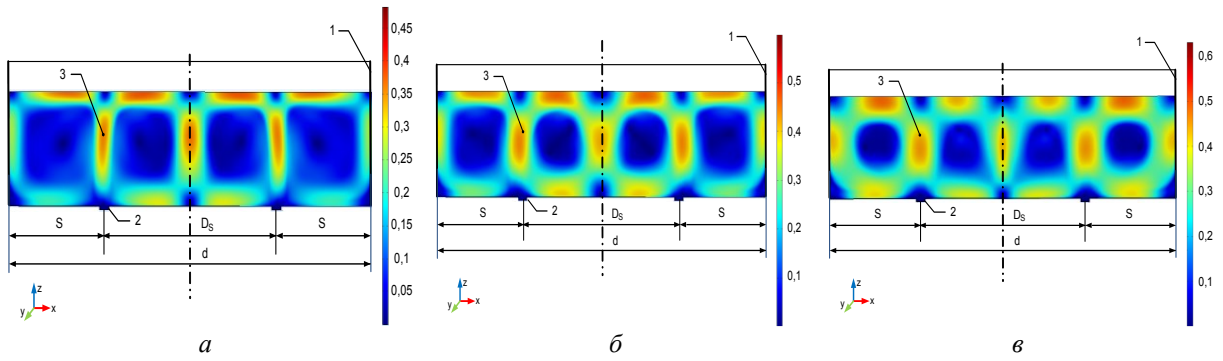


Рис. 3. Изменение скорости жидкости по высоте ступени при  $H_0 = 0.05$  м,  $S = 0.1$  м,  $d = 0.4$  м,  $d_b = 10$  мм, время  $t = 5$  с. При а)  $u_{G0} = 0.2$  м/с; б)  $u_{G0} = 0.4$  м/с, в)  $u_{G0} = 0.8$  м/с: 1 – царга; 2 – канал выхода газовой фазы; 3 – распределение скорости жидкости

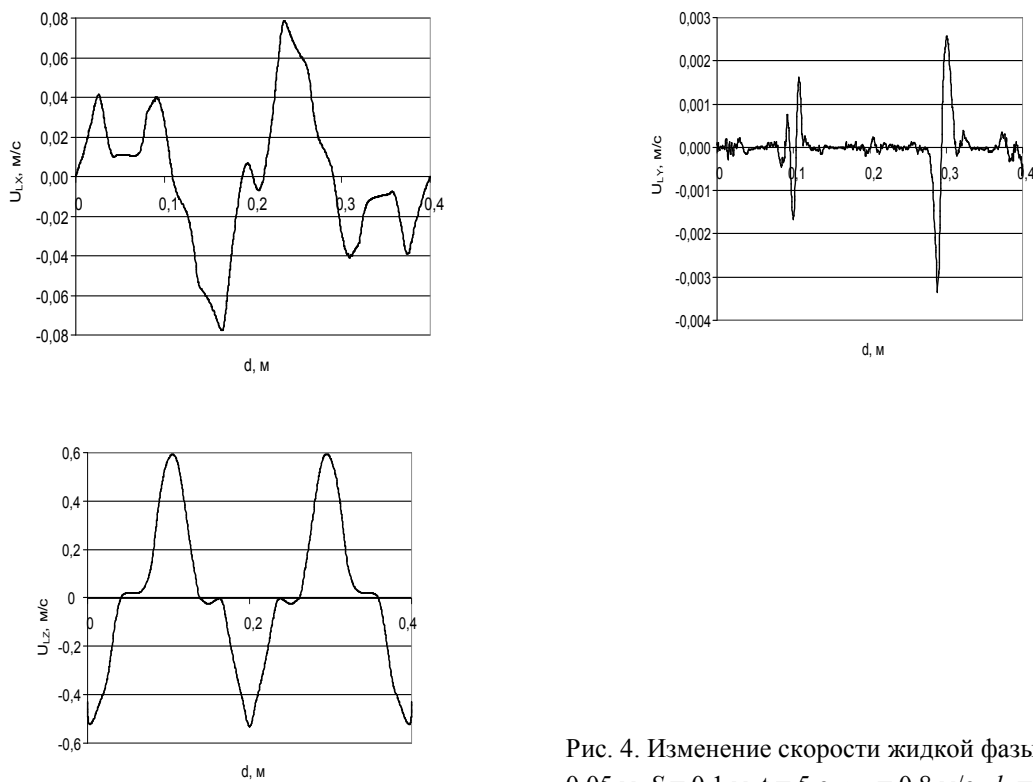


Рис. 4. Изменение скорости жидкой фазы при  $H_0 = 0.05$  м,  $S = 0.1$  м,  $t = 5$  с,  $u_{G0} = 0.8$  м/с,  $d_b = 10$  мм

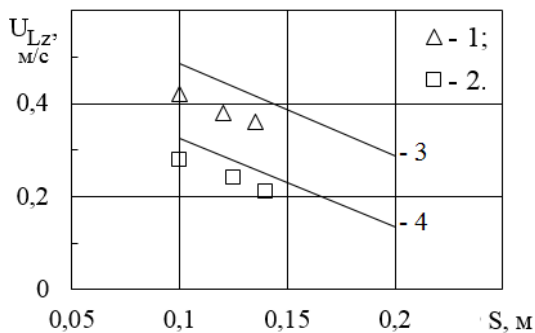


Рис. 5. Изменение скорости жидкости  $U_{Lz}$  от расстояния  $S$ . Экспериментальные точки (1-2): 1 – при скорости газа в каналах завихрителя 25 м/с; 2 – при скорости газа в каналах завихрителя 10 м/с. Линии (3, 4) расчет: 3 – при  $u_{G0} = 0.4$  м/с, 4 – при  $u_{G0} = 0.2$  м/с

Установка перегородки 3 (рис. 6) приводит к изменению профиля скорости жидкости, но не исключает ее циркуляцию, что позволяет использовать цилиндрические перегородки расчетного диаметра и высоты на многоступенчатых ступенях с целью обеспечения требуемой гидродинамики.

Экспериментальные исследования позволили выявить характерные режимы взаимодействия газа и жидкости на ступени: барботажный, струйный и барботажно-кольцевой режим. Наиболее предпочтительным режимом является барботажно-кольцевой, при котором образуется развитая межфазная поверхность без флуктуаций на поверхности жидкости.

Гидравлическое сопротивление ступени с вихревыми контактными устройствами с кольцевыми каналами, в рабочем диапазоне скоростей газа 15–40 м/с и высоте слоя жидкости 0.057–0.114 м составило 500–2500 Па.

Расчет гидравлического сопротивления ступени рекомендуется проводить по зависимости

$$\Delta P_{\text{общ}} = \left( \left( \xi \cdot \frac{\rho_g \cdot u^2}{2} \right) + (\rho_{\text{ж}} (1 - \varphi) \cdot g \cdot H) \right) \quad (1)$$

где  $\xi$  – величина коэффициента гидравлического сопротивления (определяется согласно [15]);  $u$  – средне-расходная скорость газа в канале завихрителя, м/с;  $\rho_g, \rho_{\text{ж}}$  – плотность газа и жидкости соответственно;  $\varphi$  – газосодержание;  $H$  – высота слоя жидкости на ступени, м.

$$\xi = A \cdot \text{Re}^{-0,28} \cdot \left( \frac{h}{b} \right)^{-0,25} \quad (2)$$

где  $\text{Re} = (u \cdot b \cdot \rho) / \mu$  – число Рейнольдса газа;  $A = 13.2$  для кольцевого канала с шириной канала 5–8 мм.

Величина межфазной поверхности в жидкости составила 400–1000 м<sup>2</sup>, что в 3 раза выше по сравнению с колпачковыми устройствами, а диссипация энергии на вихревой ступени по расчетам достигает 5 Вт/кг, тогда как на колпачковой тарелке эта величина не превышает 0.3 Вт/кг.

Величина поверхностного коэффициента массоотдачи, согласно экспериментальным данным, составила 2–4 м/ч, что в 2–4 раза превышает эту величину для колпачковой и клапанной ступеней.

Зависимость объемного коэффициента массоотдачи (ч<sup>-1</sup>) получена согласно [21] в виде

$$\beta = A [\varepsilon^{0.6} a^{0.8}]^{0.45} \quad (3)$$

где  $A = 136$  для вихревой ступени с кольцевыми каналами;  $\varepsilon$  – диссипация энергии, Вт/кг;  $a$  – межфазная поверхность, м<sup>-1</sup>.

Это выражение с относительной погрешностью 25% обобщает полученный массив экспериментальных данных.

Представленные значения межфазной поверхности и величины коэффициента массоотдачи позволяют проводить расчет эффективности ступени [22].

С увеличением скорости в каналах завихрителя и снижением расхода жидкости эффективность ступени возрастает. Значение эффективности стандартного колпачкового устройства диаметром 80 мм значительно ниже в сравнении с вихревой тарелкой и резко снижается с увеличением L/G. Ступень с двойными и внешними кольцевыми каналами обладают примерно одинаковой эффективностью ( $E_x = 0.75–0.9$ ).

На основании полученных данных проведены расчеты вихревой ступени бражной колонны при расходах бражки 80 м<sup>3</sup>/ч, пара с концентрацией этанола 3% об. – 1.88 кг/с.

Схема многоэлементной ступени представлена на рисунке 7а, схема одноэлементной ступени – на рисунке 7б.

Диаметр колонны многоэлементной ступени (рис. 7а) составил 1.4 м при наличии семи контактных устройств, на которых установлены кольцевые перегородки диаметром 0.37 м и высотой 0.045 м. Диаметр контактных устройств составил 0.27 м при количестве наружных каналов 15 шт и внутренних 10 шт при высоте 0.05 м и ширине канала 0.01 м.

Диаметр одноэлементной ступени составил 1.4 м (рис. 7б). Диаметры периферийного завихрителя составили 0.7 м и 0.9 м при количестве каналов 40 шт. Диаметры центрального завихрителя – 0.4 и 0.25 м соответственно при количестве каналов 20 шт. При этом высота каналов принималась равной 0.05 м и ширина – 0.01 м.

Зависимость эффективности вихревой ступени, рассчитанной на основе экспериментальных данных, от фактора скорости, представлена на рисунке 8. Согласно данным, наблюдается высокая эффективность ступени в сравнении известными промышленными барботажными тарелками.

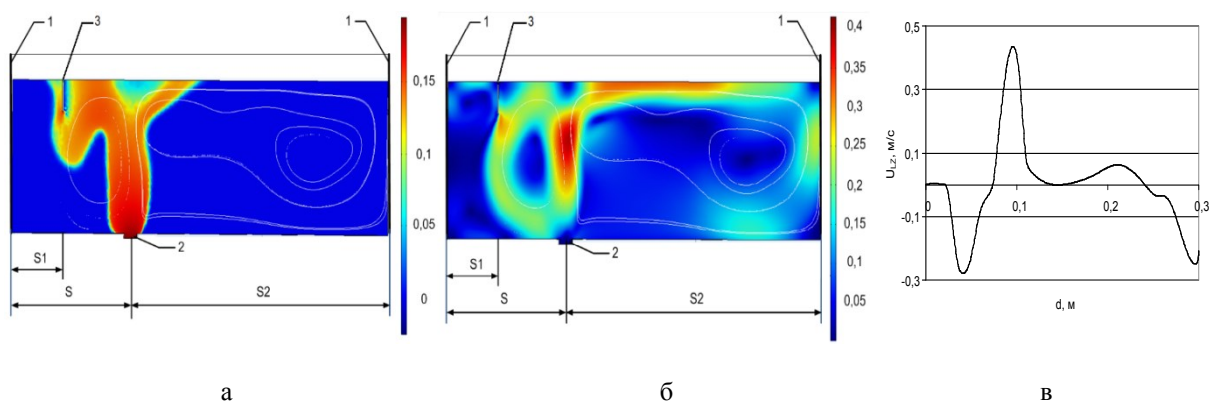


Рис. 6. Изменение газосодержания (а), скорости жидкости (б) и профиля скорости в жидкости при наличии перегородки при  $H_0 = 0.05$  м,  $S = 0.1$  м,  $S1 = 0.02$  м,  $d_b = 10$  мм,  $t = 5$  с,  $u_{G0} = 0.4$  м/с, 1 – царга; 2 – канал выхода газовой фазы; 3 – перегородка

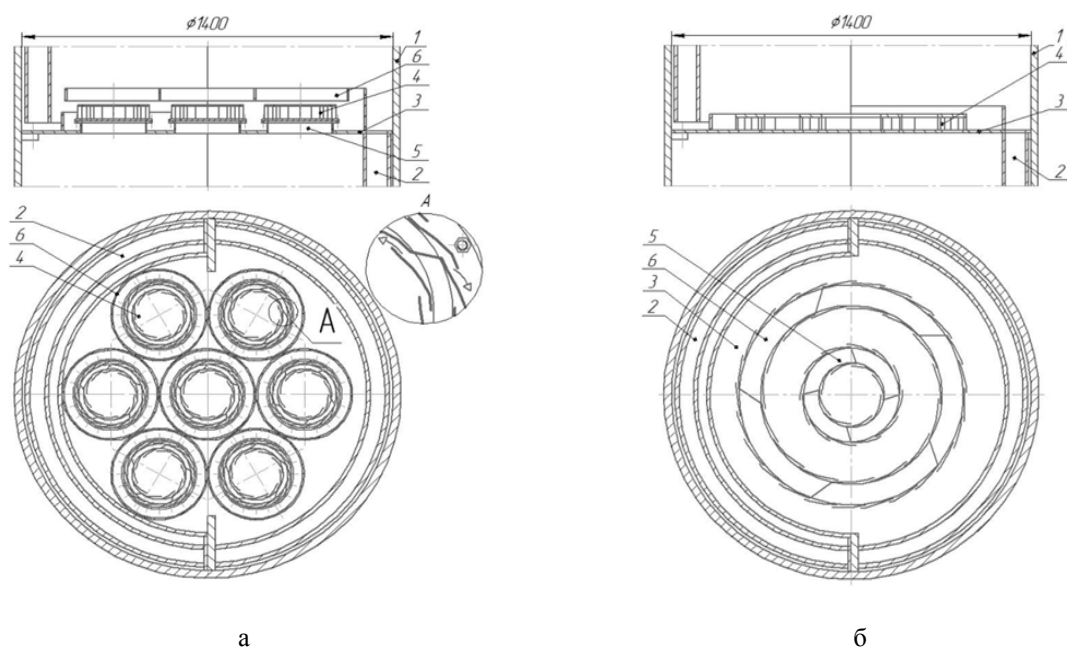


Рис. 7. Схемы многоэлементной (а) и одноэлементной (б) вихревой ступени, работающей в режиме барботажа: 1 – корпус; 2 – переток; 3 – перегородка; 4 – вихревые устройства; 5 – газовый патрубков; б) 5 – центральный завихритель; 6 – периферийный завихритель

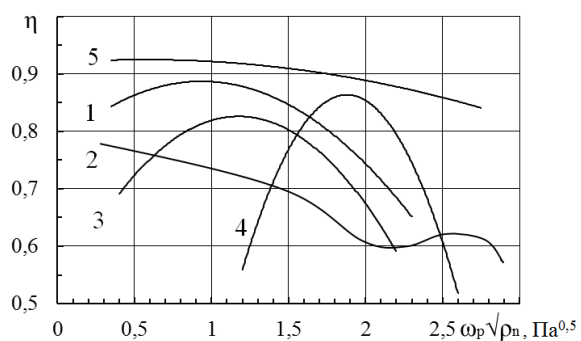


Рис. 8. Изменение эффективности ступени от фактора скорости (линии (1–4)), данные [23]: 1 – колпачковая, 2 – ситчатая, 3 – капсульная, 4 – решетчатая; 5 – вихревая ступень – данные авторов

Применение вихревых контактных ступеней в режиме барботажа в колоннах в сравнении с известными бражными колоннами [3, 13] позволяет снизить диаметр колонны, количество контактных устройств, уменьшить застойные зоны в жидкости и повысить эффективность.

### *Заключение*

Полученные данные будут востребованы при конструировании теплообменных аппаратов с вихревыми ступенями, работающими в режиме барботажа. Численное моделирование позволяет определить структуру потоков и произвести компоновку контактных устройств на ступени, а представленные данные по гидродинамике и массообмену – рассчитать эффективность исчерпывающей колонны.

### *Список литературы*

1. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств. М., 1989. 496 с.
2. Дёмин В.А. Технология и оборудование лесохимических производств. Сыктывкар, 2013. 119 с.
3. Войнов Н.А., Жукова О.П., Воронин С.М. Результаты внедрения и исследования контактных ступеней бражных колонн // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2011. №4. С. 93–98.
4. Wilkinson P., Vos E., Konijn G., Kooyman H., Mosca G., Tonon L. Distillation Trays that Operate Beyond the Limits of Gravity by Using Centrifugal Separation // Chem. Eng. Res. Des. 2007. Vol. 85. Pp. 130–135.
5. Summers D. Defying the force of gravity: Ultra-high-capacity ConSep trays // Sulzer Tech. Rev. 2005. Vol. 87. Pp. 29–31.
6. De Villiers W., Bravo J., Wilkinson P., Summers D. Fluid flow: Further advances in light hydrocarbon fractionation // Petroleum Technology Quarterly. 2004. Vol. 9. Pp. 129–133.
7. Penciak J., Nieuwoudt I., Spencer G. High-Performance Trays: Getting the Best Capacity and Efficiency // Symposium series. 2006. N152. Pp. 311–316.
8. Litvinov V., Shtork S.I., Kuibin P.A., Alekseenko S.V., Hanjalic K. Experimental study and analytical reconstruction of precessing vortex in a tangential swirler // Int. J. Heat Fluid Flow. 2013. Vol. 42. Pp. 251–264.
9. Тутубалина В.П., Короткова Е.Г., Маминов О.В. Гидравлическое сопротивление аппарата с тангенциальными пластинчатыми завихрителями // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1983. №7. С. 21–22.
10. Olujić Ž., Jödecke M., Shilkin A., Schuch G., Kaibel B. Equipment improvement trends in distillation // Chemical Engineering and Processing. Process Intensif. 2009. Vol. 48. Pp. 1089–1104.
11. Войнов Н.А., Жукова О.П., Ледник С.А., Николаев Н.А. Массоотдача в газожидкостном слое на вихревых ступенях // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47. №1. С. 62–67.
12. Войнов Н.А., Жукова О.П., Николаев Н.А. Гидродинамика вихревой ступени с тангенциальными завихрителями // Теоретические основы химической технологии. 2010. Т. 44. №2. С. 225–232.
13. Войнов Н.А., Ледник С.А., Жукова О.П. Вихревая контактная ступень для бражных колонн // Химия растительного сырья. 2011. №4. С. 295–300.
14. Овчинников А.А. Динамика двухфазных закрученных турбулентных течений в вихревых сепараторах. Казань, 2005. 288 с.
15. Войнов Н.А., Земцов Д.А., Жукова О.П., Богаткова А.В. Гидравлическое сопротивление тангенциальных завихрителей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. №1. С. 31–33.
16. Войнов Н.А., Жукова О.П., Коновалов Н.М. Гидродинамика и теплоотдача при кипении во вращающемся газожидкостном слое // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 52. №6. С. 689–697.
17. Abd Al K.M. CFD simulation of bubbly flow through a bubble column // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2014. Vol. 5. N4. Pp. 904–910.
18. Schwarz M.P., Turner W.J. Applicability of the Standard k-ε Turbulence Model to Gas-stirred Baths // Applied Mathematical Modelling. 1988. Vol. 12. Pp. 273–279.
19. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. В 5 т. Т. 2: Механические и гидромеханические процессы / под ред. А.М. Кутепова. М.: Логос, 2002. 599 с.
20. Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб.: Наука, 2000. 358 с.
21. Войнов Н.А., Алашкевич Ю.Д., Вырина Е.Е., Лукачева О.Н. Интенсификация процесса насыщения воды кислородом в азротенке // Экология и промышленность России. 2015. №11. С. 10–12.
22. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 656 с.
23. Поникаров И.И., Гайнулин М.Г. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки: учебник. М.: Альфа-М, 2006. 605 с.

*Поступила в редакцию 18 апреля 2019 г.*

*После переработки 22 октября 2019 г.*

*Принята к публикации 5 ноября 2019 г.*

**Для цитирования:** Богаткова А.В., Фролов А.С., Земцов Д.А., Жукова О.П., Войнов Н.А. Вихревые ступени для теплообменных аппаратов // Химия растительного сырья. 2020. №1. С. 347–354. DOI: 10.14258/jcrpm.2020015478.

*Bogatkova A.V., Frolov A.S., Zemtsov D.A., Zhukova O.P., Voynov N.A.* \* SWIRL STAGES FOR HEAT AND MASS EXCHANGE EQUIPMENT

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, pr. Mira, 82, Krasnoyarsk, 660049 (Russia), e-mail: n.a.voynov@mail.ru*

The results of experimental studies of hydrodynamics and mass exchange at vortex stages in bubbling mode are presented, as well as data of numerical simulation by finite element method using models of k-ε. This made it possible to establish the presence of circulation movement of liquid at the stage, to determine profiles of phase speeds, to obtain the value of initial speed of gas phase movement, at which coordination of experimental and design values of liquid speed is observed. The design method shows the effect of the cylindrical partition installed between the swirler and the stage wall on the fluid velocity profile and its distribution in the working volume. It is proposed to use the obtained results of numerical modeling when designing multi-element stages to provide the required hydrodynamics on it.

New vortex contact devices with annular channels, having lower hydraulic resistance compared to tangential devices and providing a developed interfacial surface, stable without fluctuations, operation of the stage at high gas and liquid flow rates, have been investigated.

Data are presented for determination of hydraulic resistance of vortex stage, value of interfacial surface, coefficients of mass output and efficiency in investigated range of loads of liquid and gas  $L/G = 10-150$ .

Designs of vortex contact stages for industrial brew column have been developed. Contact devices with ring channels allow to bring dissipation of energy in a gas phase in the bubbling and ring mode to 5 W/kg, to increase an interphase surface to 2000 m<sup>2</sup> and to reach the size of superficial coefficient of a massotdacha about (0.5-0.8) · 10<sup>-3</sup> of m/s.

*Keywords:* rectification, frit column, vortex stage, efficiency, mass transfer coefficient, resistance, interfacial surface.

### References

1. Khol'kin Yu.I. *Tekhnologiya gidroliznykh proizvodstv.* [Technology of hydrolysis production]. Moscow, 1989, 496 p. (in Russ.).
2. Domin V.A. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesokhimicheskikh proizvodstv.* [Technology and equipment for wood chemical production]. Syktyvkar, 2013, 119 p. (in Russ.).
3. Voynov N.A., Zhukova O.P., Voronin S.M. *Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal*, 2011, no. 4, pp. 93–98 (in Russ.).
4. Wilkinson P., Vos E., Konijn G., Kooijman H., Mosca G., Tonon L. *Chem. Eng. Res. Des.*, 2007, vol. 85, pp. 130–135.
5. Summers D. *Sulzer Tech. Rev.*, 2005, vol. 87, pp. 29–31.
6. De Villiers W., Bravo J., Wilkinson P., Summers D. *Petroleum Technology Quarterly*, 2004, vol. 9, pp. 129–133.
7. Penciak J., Nieuwoudt I., Spencer G. *Symposium series*, 2006, no. 152, pp. 311–316.
8. Litvinov V., Shtork S.I., Kuibin P.A., Alekseenko S.V., Hanjalic K. *Int. J. Heat Fluid Flow.*, 2013, vol. 42, pp. 251–264.
9. Tutubalina V.P., Korotkova Ye.G., Maminov O.V. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye.* 1983, no. 7, pp. 21–22 (in Russ.).
10. Olujić Ž., Jödecke M., Shilkin A., Schuch G., Kaibel B. *Chemical Engineering and Processing. Process Intensif.*, 2009, vol. 48, pp. 1089–1104.
11. Voynov N.A., Zhukova O.P., Lednik S.A., Nikolayev N.A. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2013, vol. 47, no. 1, pp. 62–67 (in Russ.).
12. Voynov N.A., Zhukova O.P., Nikolayev N.A. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2010, vol. 44, no. 2, pp. 225–232 (in Russ.).
13. Voynov N.A., Lednik S.A., Zhukova O.P. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2011, no. 4, pp. 295–300 (in Russ.).
14. 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.).
15. Voynov N.A., Zemtsov D.A., Zhukova O.P., Bogatkova A.V. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye*, 2019, no. 1, pp. 31–33 (in Russ.).
16. Voynov N.A., Zhukova O.P., Konovalov N.M. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2018, vol. 52, no. 6, pp. 689–697 (in Russ.).
17. Abd Al K.M. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 904–910.
18. Schwarz M.P., Turner W.J. *Applied Mathematical Modelling*, 1988, vol. 12, pp. 273–279.
19. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. Yavleniya perenos, makrokinetika, podobiye, modelirovaniye, proyektirovaniye. V 5 t. T. 2: Mekhanicheskiye i gidromekhanicheskiye protsessy* [Processes and devices of chemical technology. Transport phenomena, macrokinetics, similarity, modeling, design. In 5 volumes. Vol. 2: Mechanical and hydro-mechanical processes], ed. A.M. Kutepov. Moscow, 2002, 599 p. (in Russ.).
20. Ostrovskiy G.M. *Prikladnaya mekhanika neodnorodnykh sred.* [Applied mechanics of heterogeneous media]. St. Petersburg, 2000, 358 p. (in Russ.).
21. Voynov N.A., Alashkevich Yu.D., Vyrina Ye.Ye., Lukacheva O.N. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2015, no. 11, pp. 10–12 (in Russ.).
22. Ramm V.M. *Absorbtsiya gazov.* [Gas absorption]. Moscow, 1976, 656 p. (in Russ.).
23. Ponikarov I.I., Gaynulin M.G. *Mashiny i apparaty khimicheskikh proizvodstv i neftegazopererabotki: uchebnik.* [Machines and apparatus for chemical production and oil and gas refining: a textbook]. Moscow, 2006, 605 p. (in Russ.).

*Received April 18, 2019*

*Revised October 22, 2019*

*Accepted November 5, 2019*

**For citing:** Bogatkova A.V., Frolov A.S., Zemtsov D.A., Zhukova O.P., Voynov N.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 1, pp. 347–354. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprn.2020015478.

\* Corresponding author.