

УДК 532.516

ВИХРЕВОЕ КОНТАКТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

© *Н.А. Войнов*, О.П. Жукова, Н.Ю. Кожухова, А.В. Богаткова*

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

Представлены результаты исследования вихревого контактного устройства тангенциального типа, предназначенного для сепарирования капель и очистки промышленных выбросов от газообразных включений в ректификационных и абсорбционных колоннах, гидролиз аппаратах, сушилках, испарителях, скрубберах, газожидкостных реакторах. В данном устройстве удаление дисперсных частиц из потока и поглощение компонентов газа осуществляется непосредственно во вращающемся газожидкостном слое абсорбента в области наибольшего воздействия сил инерции и скоростного напора газа. Это позволяет достигать высокую скорость движения газового потока и обеспечить улавливание капель до 0.4 кг на 1 кг воздуха. В работе исследовано два типа завихрителей и выявлены основные режимы взаимодействия газа с жидкостью – барботажный и кольцевой. Величина коэффициента гидравлического сопротивления контактного устройства составила 0.8–1.1, а доля брызгоуноса – менее 0.01. Установлено, что при расходе капель в потоке газа до 0.01 кг/с величина коэффициента сопротивления увеличилась в 1.25 раза. Значения поверхностного коэффициента массоотдачи при абсорбции газа жидкостью достигнуты до $0.9 \cdot 10^{-3}$ м/с, а межфазная поверхность составила $(0.1–0.9) \cdot 10^{-3}$ м/с.

Преимуществом указанного устройства является его устойчивая и эффективная работа в широком диапазоне нагрузок по газу и жидкости, сравнительно низкие гидравлическое сопротивление и небольшая металлоемкость. Представлены зависимости для определения газосодержания, угловой и линейной скорости, высоты вращающегося слоя жидкости и величины коэффициентов массоотдачи, позволяющие проводить расчет промышленных образцов соответствующего оборудования.

Ключевые слова: вихревое контактное устройство, сепаратор, скруббер, газ, капли, коэффициент гидравлического сопротивления, брызгоунос, газосодержание, угловая скорость, межфазная поверхность, поверхностный коэффициент массоотдачи.

Введение

Сепарация капель и очистка газовых выбросов является необходимой составляющей промышленных объектов и используется для повышения производительности и эффективности тепло- и массообменного оборудования, охраны окружающей среды в технологиях переработки растительного сырья. Устройствами для очистки газа снабжены различные типы установок: ректификационные и абсорбционные колонны, гидролиз аппараты, сушилки, конвективные печи, испарители, скрубберы, газожидкостные реакторы [1–4]. В связи с возрастающими требованиями к снижению величины выбросов производства, улучшению качества и выхода продуктов сепарационное оборудование постоянно обновляется и совершенствуется. Кроме того, неэффективная работа скрубберов и сепараторов обусловлена применением устаревших контактных устройств, которые не способны обеспечить требование к качеству процесса сепарации и подлежат замене.

Войнов Николай Александрович – профессор,
e-mail: n.a.voinov@mail.ru

Жукова Ольга Петровна – доцент,
e-mail: zhukovolga@yandex.ru

Кожухова Наталья Юльевна – доцент,
e-mail: sitkova72@mail.ru

Богаткова Анастасия Викторовна – студент,
e-mail: sonchik-sveta@yandex.ru

Совершенствование процессов очистки возможно на основе разработки новых высокоэффективных контактных устройств. Перспективным направлением в решении указанной проблемы является использование устройств вихревого типа. Достижение в них высокой скорости движения газового потока,

* Автор, с которым следует вести переписку.

которая на порядок превышает скорость движения газа в инерционных сепараторах и скрубберах, позволяет создать компактные установки с высокой эффективностью сепарирования и очистки газовых выбросов.

Однако внедрение вихревых контактных устройств сдерживается отсутствием совершенных и универсальных конструкций, а также надежных и доступных зависимостей для их расчета.

Целью работы является разработка вихревого контактного устройства для сепарации капель, очистки газа и получение зависимостей для расчета.

В настоящее время, согласно [5–8], наиболее эффективными контактными устройствами являются прямоточно-вихревые, сочетающие прямоточное движение с центробежным разделением фаз, в которых под действием центробежной силы капли или подвешенный на орошение абсорбент отводятся на поверхность цилиндрического корпуса и в виде пленки жидкости транспортируются потоком газа. Величина коэффициента сопротивления [9–14] таких контактных устройств составляет 5–16, а их высота достигает 0.4 м, рассматриваемые устройства чувствительны к изменениям нагрузок по газу и жидкости, что обуславливает высокую металлоемкость установок и недостаточно эффективное разделение фаз.

В этой связи авторами разработано и исследовано вихревое контактное устройство тангенциального типа, схема которого представлена на рисунке 1. Устройство обеспечивает устойчивую и эффективную работу в широком интервале изменения нагрузок по газу и жидкости, низкое гидравлическое сопротивление и металлоемкость оборудования.

При такой компоновке контактных устройств на капли, находящиеся в потоке газа, или абсорбент на ступени аппарата, действует нормальная сила инерции и сила, вызванная скоростным напором потока. В устройстве не образуется восходящий прямоток пленки жидкости, что снижает вторичный унос капель, повышает эффективность разделения. Это обеспечивает интенсивную очистку газа при колебаниях расхода по газу и жидкости, устраняет унос, снижает высоту устройства и металлоемкость аппарата.

Вследствие недостаточной изученности работы таких контактных устройств проведены всесторонние исследования их гидродинамики и массообмена.

Экспериментальная часть

Исследованные типы завихрителей контактного устройства, представлены на рисунке 2.

Диаметры цилиндрического корпуса контактного устройства составил 0.14–0.18 м, а завихрителя – 0.11 м. Устройство типа А8 имело высоту каналов 6 мм, ширину каналов в наименьшем сечении 10 мм, а завихритель V8 имел высоту каналов 11 мм, ширину каналов – 2.5 мм. Массообмен на ступени изучался на примере абсорбции кислорода воздуха водой согласно [15–17].

Величина коэффициента сопротивления определялась по формуле

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P_{\text{сyx}}}{u^2 \cdot \rho}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{сyx}}$ – гидравлическое сопротивление контактного устройства, Па; u – скорость газ в наименьшем сечении канала завихрителя, м/с; ρ – плотность газа, кг/м³.

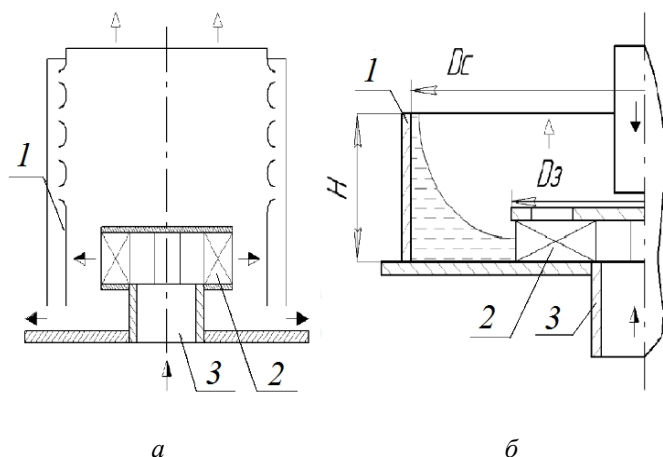


Рис. 1. Схемы контактных устройств для сепаратора (а) и скруббера (б): 1 – корпус контактного устройства; 2 – завихритель; 3 – газовый патрубок; \blacktriangleright – абсорбент (жидкость); \blacktriangleleft – очищенный газ; \blacktriangleright – загрязненный газ



Рис. 2. Схемы тангенциальных завихрителей типа А8 (а) и типа V8(б)

Величина брызгоуноса рассчитывалась согласно

$$E = \frac{L-L_k}{L}, \tag{2}$$

где L – начальный расход капель в потоке газа, кг/с; L_k – уловленный расход капель, кг/с.

Газосодержание во вращающемся слое определялось по зависимости

$$\varphi = \frac{V_{г-ж}-V_{ж}}{V_{г-ж}}, \tag{3}$$

где $V_{г-ж}$ – объем газожидкостного слоя, м³; $V_{ж}$ – объем жидкости, м³.

В результате исследований были определены значения коэффициента гидравлического сопротивления сухого контактного устройства (рис. 3).

Согласно полученным данным, при угле наклона профилированных пластин (рис. 2) $\alpha < 20^\circ$ коэффициент сопротивления устройства составил 0.8–1.1, что является сравнительно низкой величиной, и обусловлен безотрывным выходом газа с поверхности пластин завихрителя. При наличии капель в потоке газа (точки 3–4, рис. 3) величина коэффициента сопротивления увеличилась в 1.25 раза, что можно объяснить ламинаризацией газок капельного потока.

Согласно экспериментальным данным (рис. 4), величина брызгоуноса при среднерасходной скорости газа в корпусе сепаратора $u_o < 7$ м/с составила менее 1%.

В результате исследования гидродинамики вращающего слоя жидкости в контактном устройстве (рис. 1б) установлено, два основных режима взаимодействия газа с жидкостью – барботажный и кольцевой. В кольцевом режиме вращающаяся жидкость содержит пузырьки газа, которые влияют на эффективность работы устройства. В этой связи величина газосодержания представлена на рисунке 5. Согласно полученным данным, в барботажном режиме с увеличением скорости газа и массы жидкости во вращающемся газожидкостном слое величина газосодержания возрастает и становится максимальной в области перехода из барботажно-кольцевого в кольцевой режим. В кольцевом режиме с увеличением скорости газа в каналах завихрителя происходит снижение газосодержания вследствие дробления пузырьков газа и вытеснения их из жидкости силой инерции. На основе экспериментальных данных получена зависимость для определения газосодержания в кольцевом режиме в виде

$$\varphi = A \cdot \left(\frac{f}{F}\right)^{0,79} \cdot \left(\frac{u}{u_{кр}}\right)^{1,9} \cdot \left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^{0,25}, \tag{4}$$

где f – площадь сечения каналов завихрителя, м²; $F = 3.14 \cdot h \cdot D_s$ – поверхность завихрителя, на котором размещены каналы, м²; $u_{кр}$ – критическая скорость газа, характеризующая смену режима течения, м/с; σ – коэффициент поверхностного натяжения рабочей жидкости, Н/м; σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения воды при температуре 20 °С; A – коэффициент, для завихрителя типа А8 равен 5.0.

Величина критической скорости, входящей в уравнение (4), можно определить по зависимостям, представленным в работе [18].

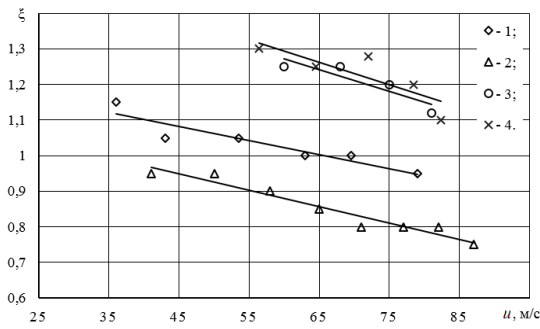


Рис. 3. Изменение коэффициента сопротивления контактного устройства от скорости газа в каналах завихрителя. Экспериментальные точки (1–2): газ без капель 1 – тип завихрителя А8, 2 – V8; (3, 4) газо-капельный поток – тип завихрителя V8, расход капель $L = 0.004–0.01$ кг/с

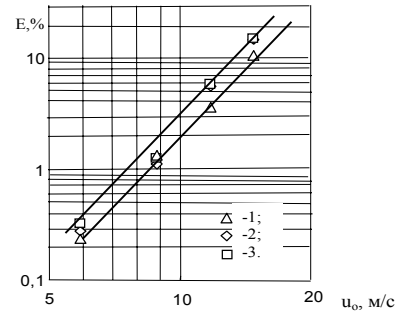


Рис. 4. Зависимость брызгоуноса от скорости газа в корпусе контактного устройства. Экспериментальные точки (1–3): 1 – $L = 0.004$ кг/с; 2 – $L = 0.008$ кг/с; 3 – $L = 0.01$ кг/с

Высота газожидкостного слоя, вращающегося на внутренней поверхности корпуса контактного устройства, рассчитывается согласно [19]:

$$H = \left(\frac{m \cdot \omega^2 \cdot R_{зав} + \frac{\rho_r \cdot u^2}{2} (\pi \cdot D_c \cdot h)}{\rho \cdot (1 - \varphi) \cdot g \cdot \pi \cdot D_{ст}} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

где H – высота газожидкостного слоя, м; h – высота каналов в завихрителе, м; φ – газосодержание; D_c – диаметр ступени, м; $R_{зав}$ – радиус завихрителя, м; u – скорость газа в каналах завихрителя, м/с; m – масса вращающейся жидкости, кг; ω – угловая скорость, c^{-1} ; ρ , ρ_r – плотность жидкости и газа, соответственно, $кг/м^3$.

Как установлено (рис. 6), максимальная высота слоя вращающейся жидкости в контактном устройстве составила 0.12 м.

Характерные результаты исследования угловой скорости вращающегося потока представлены на рисунке 7. Для ее расчета при массе жидкости во вращающемся слое $m > 0.6$ кг получена следующая зависимость:

$$\omega = A \cdot u \cdot m^{-0,75} D_c^{-0,7}, \quad (6)$$

где u – скорость газа в каналах завихрителя, м/с; m – масса жидкости в корпусе контактного устройства, кг; D_c – диаметр контактной ступени, м. Коэффициент A для завихрителя типа V8 равен 3 и типа А8 – 4.

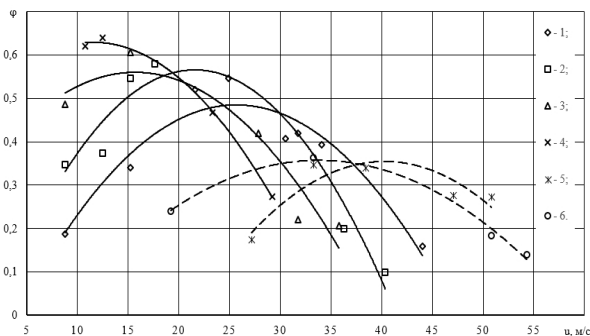


Рис. 5. Зависимость газосодержания от скорости в каналах завихрителя. Экспериментальные точки (1–6): завихритель типа А8: 1 – масса жидкости на ступени $m = 0.5$ кг; 2 – $m = 1.0$ кг; 3 – $m = 2.6$ кг; 4 – $m = 3.0$ кг; завихритель типа V8: 5 – $m = 0.5$ кг; 6 – $m = 1.0$ кг

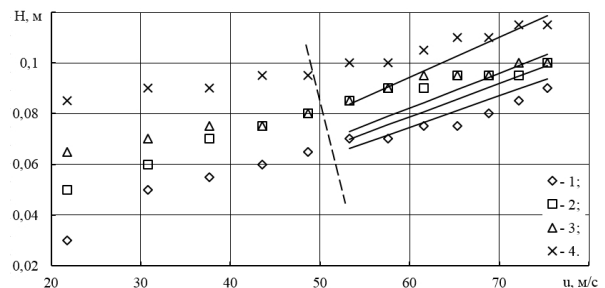


Рис. 6. Зависимость высоты слоя от скорости газа в каналах завихрителя при изменении объема жидкости V . Диаметр царги 0.18 м; тип завихрителя V8. Экспериментальные точки (1–5): 1 – $m = 0.5$ кг; 2 – $m = 0.75$ кг; 3 – $m = 1$ кг; 4 – $m = 1.5$ кг. Линии – расчет по (5). Пунктирная линия – граница смены течения в кольцевой режим

Величина коэффициента массоотдачи, согласно данным, представленным на рисунке 8, может быть рассчитана по зависимости

$$Sh = \frac{\beta_f \cdot d_n}{D} = 0,075 \left(\frac{H}{h}\right)^{2,0} \left(\frac{\omega \cdot R_3^2}{\nu}\right)^{0,5}, \tag{7}$$

где β_f – поверхностный коэффициент массоотдачи, м/с; d_n – диаметр пузыря, м; D – коэффициент диффузии газа в жидкости, м²/с; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с.

Величина поверхностного коэффициента массоотдачи β_f для кольцевого режима составила равной $(0.1–0.9) \cdot 10^{-3}$ м/с, а межфазная поверхность $a \approx u^{0,45}$ и в зависимости от уровня жидкости на ступени, оказалась равной $(0.4–1) \cdot 10^3$ м⁻¹.

Интенсивность массоотдачи на вихревой ступени в большей степени зависит от центробежного критерия Рейнольдса и высоты газожидкостного слоя и сопоставима со значениями β_f , достигаемыми в турбулентной стекающей пленке жидкости при восходящем и нисходящем прямотоке [20].

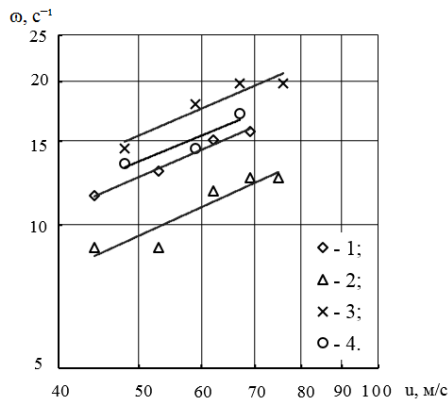


Рис. 7. Зависимость угловой скорости вращающейся жидкости от скорости газа в каналах завихрителя. Экспериментальные точки (1–3): завихритель V8, 1 – m = 0.15 кг; 2 – m = 1.5 кг; точки (4–6) завихритель A8, 3 – m = 0.15 кг; 4 – m = 1.5 кг

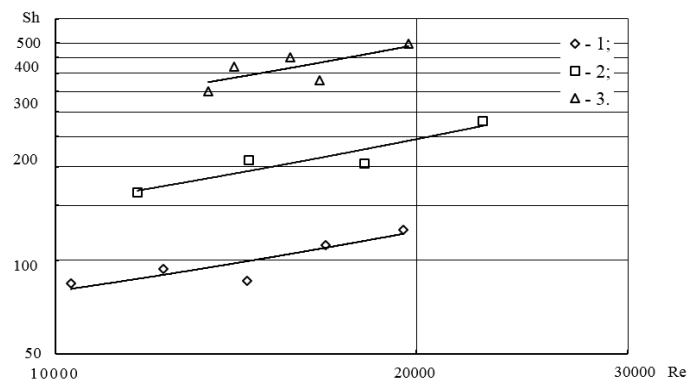


Рис. 8. Зависимость критерия Шервуда от центробежного критерия Рейнольдса на вихревой контактной ступени V8 при расходе абсорбента $4 \cdot 10^{-4}–5 \cdot 10^{-4}$ м³/с. Экспериментальные точки (1–4): 1 – H = 0.034 м; 2 – H = 0.055 м; 3 – H = 0.07 м

Заключение

Представленные зависимости для расчета газосодержания, угловой скорости, высоты вращающегося слоя жидкости и коэффициента массоотдачи позволяют проводить расчет вихревого контактного устройства, устанавливаемого в сепараторе или скруббере, и будут необходимы при разработке и конструировании рассмотренных типов аппаратов.

Список литературы

1. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств. М., 1989. 496 с.
2. Войнов Н.А., Сугак Е.В., Николаев Н.А., Воронин С.М. Пленочные биореакторы. Красноярск, 2001. 252 с.
3. Войнов Н.А. Николаев Н.А. Пленочные трубчатые газо-жидкостные реакторы. Казань, 2008. 272 с.
4. Сугак Е.В., Войнов Н.А., Николаев Н.А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. Казань, 2009. 224 с.
5. Лебедюк Г.К., Вальдберг А.Ю., Громов М.П., Приходько В.П. Каплеуловители и их применение в газоочистке. Обзорная информация. М., 1974. 63 с.
6. Приходько В.П., Сафонов В.Н., Лебедюк Г.К. Центробежные капле уловители с лопастными завихрителями. Обзорная информация. М., 1979. 50 с.
7. Овчинников А.А. Динамика двухфазных закрученных турбулентных течений в вихревых сепараторах. Казань, 2005. 288 с.
8. Николаев А.Н., Дмитриев А.В., Латыпов Д.Н. Очистка газовых выбросов ТЭС, работающих на твердом и жидком топливе. Казань, 2004. 136 с.

9. Николаев Н.А. Эффективность процессов ректификации и абсорбции в многоступенчатых аппаратах с прямоточно-вихревыми контактными устройствами. Казань, 2011. 116 с.
10. Собин В.М., Ершов А.И. Исследование структуры и гидравлического сопротивления турбулентного закрученного потока в коротких трубах // АН БССР. Сер. Физика энерг. наук. 1972. №3. С. 56.
11. Коротков Ю.Ф. Гидродинамические закономерности в массообменном аппарате вихревого типа // Труды Казанского химико-технологического института. 1970. Вып. 45. С. 26–31.
12. Ершов А.И., Плехов И.М., Бершевиц А.И. Новые конструкции сепараторов для очистки промышленных газов. Минск, 1973. 36 с.
13. Идельчик Е.И. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., 1992. 360 с.
14. Марголин Е.В. Выбор оптимальных параметров вертикального каплеуловителя. М., 1976. №3. С. 11–13.
15. 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. 1–6.
16. Войнов Н.А., Ледник С.А., Жукова О.П. Вихревая контактная ступень для бражных колонн // Химия растительного сырья. 2011. №4. С. 295–300.
17. Войнов Н.А., Ледник С.А., Жукова О.П. Теплообмен на вихревой контактной ступени // Химия растительного сырья. 2012. №4. С. 209–213.
18. Войнов Н.А., Ледник С.А. Гидродинамика и массообмен на ступени с профилированными тангенциальными каналами // Химическая промышленность. 2011. Т. 88. №5. С. 250–256.
19. Патент № 2580727 (РФ). Вихревой испаритель-конденсатор / Н.А. Войнов, О.П. Жукова, С.А. Ледник, Д.А. Земцов / 2016.
20. Николаев Н.А. Динамика пленочного течения жидкости и массоперенос в условиях сильного взаимодействия с газом (паром) при однонаправленном восходящем или нисходящем движении. Казань, 2011. 104 с.

Поступило в редакцию 23 ноября 2017 г.

После переработки 19 января 2018 г.

Для цитирования: Войнов Н.А., Жукова О.П., Кожухова Н.Ю., Богаткова А.В. Вихревое контактное устройство для очистки газовых выбросов // Химия растительного сырья. 2018. №2. С. 217–223. DOI: 10.14258/jcprm.2018023448

Voynov N.A., Zhukova O.P., Kozhukhova N.Yu., Bogatkova A.V. VORTEXGAS-LIQUIDSEPARATOR*

Siberian State Technological University, pr. Mira, 82, Krasnoyarsk, 660049 (Russia), e-mail: n.a.voynov@mail.ru

Results of a research of the vortex contact device of the tangential type intended for separation of drops and cleaning of industrial emissions of gaseous inclusions in rectifying and absorbing columns, hydrolysis devices, dryers, evaporators, scrubbers, gas-liquid reactors are presented. In which removal of disperse particles from a stream and absorption of components of gas is carried out directly in the rotating gas-liquid layer of absorbent in the field of the greatest influence of forces of inertia and a high-speed pressure of gas. What allows to reach the high speed of the movement of a gas stream and to provide catching of drops up to 0.4 kg on one kilogram of air. In work, two types of zavikhritel are investigated and the main modes of interaction of gas with liquid bubbling and ring are revealed. The size of coefficient of hydraulic resistance of the contact device was equal 0.8–1.1, and a share of a bryzgonous – less than 0.01. It is established that at an expense of drops in a gas stream up to 0.01 kg/s, the size of coefficient of resistance has increased by 1.25 times. Values of superficial coefficient of a massootdacha at gas absorption by liquid are reached equal to $0.9 \cdot 10^{-3}$ m/c., and the interphase surface has made equal $0.1–0.9 \cdot 10^{-3}$ m/c.

Advantage of the specified device is his steady and effective work in the wide range of loadings on gas, liquid, rather low hydraulic resistance, and small metal consumption. Dependences for determination of gas content, angular and linear speed, height of the rotating layer of liquid and size of coefficients of a massootdacha allowing to carry out calculation of industrial samples of the corresponding equipment are presented.

Keywords: vortex contact device, separator, scrubber, gas, drops, coefficient of hydraulic resistance, splash water, gas content, angular velocity, interfacial surface, surface mass transfer coefficient.

* Corresponding author.

References

1. Khol'kin Iu.I. *Tekhnologiia gidroliznykh proizvodstv*. [Technology of hydrolysis productions]. Moscow, 1989, 496 p. (in Russ.).
2. Voinov N.A., Sugak E.V., Nikolaev N.A., Voronin S.M. *Plenochnye bioreaktory*. [Film bioreactors]. Krasnoyarsk, 2001, 252 p. (in Russ.).
3. Voinov N.A., Nikolaev N.A. *Plenochnye trubchatye gazo-zhidkostnye reaktory*. [Film tubular gas-liquid reactors]. Kazan', 2008, 272 p. (in Russ.).
4. Sugak E.V., Voinov N.A., Nikolaev N.A. *Ochistka gazovykh vybrosov v apparatakh s intensivnymi gidrodinamicheskimi rezhimami*. [Purification of gas emissions in devices with intensive hydrodynamic regimes]. Kazan', 2009, 224 p. (in Russ.).
5. Lebediuk G.K., Val'dberg A.Iu., Gromov M.P., Prikhod'ko V.P. *Kapleuloviteli i ikh primeneniye v gazoочистке. Obzornaia informatsiia*. [Drip eliminators and their application in gas cleaning. Overview information]. Moscow, 1974, 63 p. (in Russ.).
6. Prikhod'ko V.P., Safonov V.N., Lebediuk G.K. *Tsentrobeznyye kaple uloviteli s lopastnymi zavikhriteliami. Obzornaia informatsiia*. [Centrifugal drop catchers with lobed swirlers. Overview information]. Moscow, 1979, 50 p. (in Russ.).
7. Ovchinnikov A.A. *Dinamika dvukhfaznykh zakruchennykh turbulentnykh techenii v vikhrevykh separatorakh*. [Динамика двухфазных закрученных турбулентных течений в вихревых сепараторах]. Kazan', 2005, 288 p. (in Russ.).
8. Nikolaev A.N., Dmitriev A.V., Latypov D.N. *Ochistka gazovykh vybrosov TES, rabotaiushchikh na tverdom i zhidkom toplive*. [Purification of gas emissions of TPPs operating on solid and liquid fuels]. Kazan', 2004, 136 p. (in Russ.).
9. Nikolaev N.A. *Effektivnost' protsessov rektifikatsii i absorptsii v mnogostupenchatykh apparatakh s priamotokhnovikhrevymi kontaktnymi ustroistvami*. [Efficiency of rectification and absorption processes in multistage apparatus with direct-vortex contact devices]. Kazan', 2011, 116 p. (in Russ.).
10. Sobin V.M., Ershov A.I. *AN BSSR. Ser. Fizika energ. nauk*, 1972, no. 3, p. 56. (in Russ.).
11. Korotkov Iu.F. *Trudy Kazanskogo khimiko-tekhnologicheskogo instituta*, 1970, no. 45, pp. 26–31. (in Russ.).
12. Ershov A.I., Plekhov I.M., Bershevits A.I. *Novye konstruksii separatorov dlia ochistki promyshlennykh gazov*. [New designs of separators for cleaning industrial gases]. Minsk, 1973, 36 p. (in Russ.).
13. Idel'chik E.I. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam*. [Reference book on hydraulic resistance]. Moscow, 1992, 360 p. (in Russ.).
14. Margolin E.V. *Vybor optimal'nykh parametrov vertikal'nogo kapleulovitel'ia*. [Selecting the optimal parameters for the vertical drop eliminator]. Moscow, 1976, no. 3, pp. 11–13. (in Russ.).
15. Voinov N.A., Zhukova O.P., Lednik S.A., Nikolaev N.A. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*, 2013, vol. 47, no. 1, pp. 1–6. (in Russ.).
16. Voinov N.A., Lednik S.A., Zhukova O.P. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2011, no. 4, pp. 295–300. (in Russ.).
17. Voinov N.A., Lednik S.A., Zhukova O.P. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2012, no. 4, pp. 209–213. (in Russ.).
18. Voinov N.A., Lednik S.A. *Khimicheskaiia promyshlennost'*, 2011, vol. 88, no. 5, pp. 250–256. (in Russ.).
19. Patent 2580727 (RU). 2016. (in Russ.).
20. Nikolaev N.A. *Dinamika plenochnogo techeniia zhidkosti i massoperenos v usloviakh sil'nogo vzaimodeistviia s gazom (parom) pri odnonapravlennom voskhodiashchem ili niskhodiashchem dvizhenii*. [Dynamics of film flow of a liquid and mass transfer under conditions of strong interaction with gas (steam) with unidirectional ascending or descending motion]. Kazan', 2011, 104 p. (in Russ.).

Received November 23, 2017

Revised January 19, 2018

For citing: Voinov N.A., Zhukova O.P., Kozhukhova N.Yu., Bogatkova A.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2018, no. 2, pp. 217–223. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2018023448

