

**Р. А. Халитов, И. М. Сабиров, Р. Х. Фазуллин,  
Е. С. Воробьев**

### **ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВИХРЕВОЙ КОЛОННЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ**

*Ключевые слова: отработанная серная кислота, вихревая колонна, вихревая контактная ступень, гидравлическое сопротивление, относительный брызгоунос, удерживающая способность по жидкой фазе.*

*В статье предлагается решение интенсификации работы вихревой колонны концентрирования серной кислоты, позволяющее достичь суточной производительности по 92 %-ной кислоте на уровне 100 т и выше. Приведена конструкция модернизированной контактной ступени вихревого типа. Данная конструкция имеет повышенную пропускную способность колонны по газовой и жидкой фазам. С целью уменьшения материалоемкости конструкции было принято решение отказаться от использования контактного патрубка, а для интенсификации процесса по сравнению с промышленным аналогом были увеличены диаметр газопроемного отверстия и сечения щелей завихрителя. Дополнительно ступень оснастили патрубками для подвода и отвода жидкости. Приводятся результаты экспериментального определения гидродинамических параметров работы вихревой контактной ступени (ВКС). На основе полученных данных построены графики и выведены эмпирические уравнения, отражающие зависимость гидравлического сопротивления, брызгоуноса и удерживающей способности от нагрузок по газу и жидкости. Установлено, что сопротивление ступени растет по мере увеличения скорости газа в щелях завихрителя, что соответствует турбулентному течению двухфазного потока в устройстве. Исследования показали, что увеличение расхода жидкости приводит к незначительному увеличению гидравлического сопротивления ступени. Экспериментально установлено, что значения брызгоуноса не приводят к образованию тумана. Анализ удерживающей способности показал ее обратную зависимость от расхода газа и прямую — от расхода жидкости. В интервале рабочих скоростей газа в щелях завихрителя (10–20 м/с) ступень сохраняет высокую способность удерживать жидкость. ВКС устойчиво функционирует в широком диапазоне изменения нагрузок по обеим фазам. Разработанная конструкция ступени легла в основу модернизированной вихревой колонны для концентрирования серной кислоты с увеличенной производительностью.*

**R. A. Khalitov, I. M. Sabirov, R. Kh. Fazullin,  
E. S. Vorob'yov**

### **IMPROVING THE PERFORMANCE OF THE VORTEX COLUMN CONCENTRATION OF SULFURIC ACID**

*Keywords: spent sulfuric acid, vortex column, vortex contact stage, hydraulic resistance, relative spray loss, holding capacity in the liquid phase.*

*The article considers a solution to the problem of increasing the productivity of a vortex column of sulfuric acid concentration in the resulting 92% sulfuric acid to 100 t/day and above. The design of the upgraded vortex contact stage is presented, which makes it possible to increase the throughput capacity of the vortex column through the gas and liquid phases. To increase the throughput through the gas phase and reduce the material consumption, the stage is made without a contact pipe. At the same time, in comparison with the vortex stage of an industrial column, the diameter of the gas passage opening of the plate and the area of the swirler slots have been increased, and additional liquid inlet and outlet pipes from the stage have been installed. The results of experimental studies of the hydrodynamic characteristics of a vortex contact stage (VCS) are presented in the form of graphical dependencies and equations describing changes in hydraulic resistance, spray flow, and retention capacity from the flow rates of the gas and liquid phases. The hydraulic resistance of the vortex stage increases with increasing gas velocity in the vortex slots, which satisfies the turbulent motion of the two-phase flow in the vortex device. With increasing fluid flow, there is a slight increase in hydraulic resistance. It is determined that during the operation of the vortex stage, the necessary liquid spray is provided for the fog-free operation of the column. The retention capacity of the liquid phase decreases with an increase in the flow rate of the gas phase, and increases with an increase in the flow rate of the liquid. In the operating velocity range of the gas flow in the vortex slots (10-20 m/s), the vortex stage has a high retention capacity in the liquid phase. The vortex stage is operable in a wide range of load variations in the gas and liquid phases. The VCS design was used as a working stage in the development of an upgraded sulfuric acid concentration vortex column with increased productivity.*

#### **Введение**

На кафедре «Оборудования химических заводов» ФГБОУ ВО «КНИТУ» разработана и внедрена в процессе регенерации отработанных кислотных смесей экологически безопасная технология концентрирования отработанной серной кислоты в вихревой колонне из ферросилида [1]. Отработанная 68 %-ная

серная кислота получается при денитрации кислотных смесей [2]. Данная слабая кислота не является товарным продуктом и направляется на концентрирование до товарной 92 %-ной серной кислоты, соответствующей ГОСТ [3]. Процесс выпаривания воды организован в вихревой ферросилидовой колонне [4] в режиме, исключающем туманообразование [5, 6].

Конструктивные элементы вихревой колонны изготавливаются из высококремнистого чугуна (ферросилида марки ЧС-15) методом литья. Производство осуществляется либо классическим способом (в песчано-глинистые формы), либо с использованием прогрессивной технологии - литью по газифицируемым моделям [7]. Сама колонна концентрирования, а также колонны денитрации (конструкций Варваричева, ГБХ, Степанова) унифицированы по внутреннему диаметру и равны 1,0 м [8, 9]. В качестве перспективного направления направления рассматривается увеличение диаметра колонн до 1,5 м. Однако их выпуск сопряжен с необходимостью технического переоснащения литейных участков и значительными капиталовложениями в приобретение оборудования для отливки, термической обработки и механической доводки деталей большего диаметра.

В связи с ростом объемов отработанной серной кислоты, направляемой на концентрирование, требуется наращивание производственных мощностей. Простое увеличение количества колонн концентрирования влечет за собой значительные капитальные затраты на приобретение целого комплекса дополнительного оборудования: воздуходувок, нагревательных топок, холодильников и брызгоуловителей.

Наиболее экономически оправданным путем является модернизация действующих колонн, позволяющая поднять их суточную производительность с 80 до 100 т и более.

### Аналитическая часть

На рисунке 1 изображена вихревая контактная ступень, применяемая в промышленной вихревой ферросилидовой колонне концентрирования серной кислоты. Конструкция включает две последовательно соединенные царги: нижнюю 1 и верхнюю 2. В нижней царге на тарелке размещен завихритель 3 с лопатками 4, а верхняя царга оснащена отбортовкой с контактными патрубком 5 [10].

Ступень оборудована одиночными патрубками для входа 6 и выхода 7 жидкости. Повышение производительности колонны может быть достигнуто путем расширения проходных сечений для газа и жидкости.

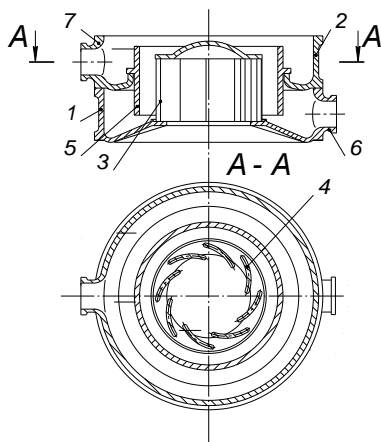


Рис. 1 – Промышленная вихревая контактная ступень

Fig. 1 – Industrial vortex contact stage

Разработана новая вихревая контактная ступень (рис. 2), спроектированная таким образом, чтобы наиболее эффективно задействовать полезное пространство колонны для процессов тепломассообмена. Ее конструкция включает корпус 1 и тарелку 2 с центральным отверстием, на которой установлен завихритель 3, имеющий на боковой поверхности вертикальные тангенциальные лопатки 4.

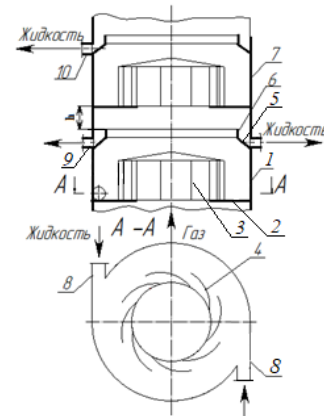


Рис. 2 – Вихревая контактная ступень

Fig. 2 – Vortex contact stage

На верхней части корпуса установлен конус 5, на верхнем срезе которого расположена цилиндрическая обечайка 6. Над рабочей зоной с зазором  $h$  к верхнему срезу цилиндрической обечайки расположена брызгоуловительная ступень 7. Подвод жидкости организован на тарелку 2 через нижние тангенциальные патрубки 8, а отвод жидкости осуществляется из кармана образованного корпусом, конической и цилиндрической обечайками через патрубки 9. Уловленная в брызгоуловительной ступени жидкость отводится через патрубок 10.

Для повышения герметичности колонны за счет уменьшения стыков между царгами, новая конструкция рабочей ступени по сравнению с промышленной вихревой ступенью отличается в виде единой царги. Для интенсификации газового потока и уменьшения металлоемкости ступень выполнена без отдельного контактного патрубка. Теперь закручивание газожидкостной смеси происходит непосредственно о стенки корпуса, выполняющего роль контактного патрубка. Это позволило расширить центральное отверстие тарелки и увеличить суммарное сечение щелей завихрителя. Пропускная способность по жидкой фазе возросла благодаря установке двух входных и двух выходных патрубков для жидкости.

### Экспериментальная часть

На экспериментальном стенде, оснащённом разработанными вихревыми ступенями, были выполнены исследования гидравлического сопротивления, брызгоуноса и удерживающей способности вихревой контактной ступени в зависимости от изменения расходов газа и жидкости. Полученные результаты и построенные на их основе математические модели представлены далее.

На рисунке 3 показана зависимость числа Эйлера (Eu) от числа Рейнольдса (Re) для ступени в сухом (неорошаемом) режиме работы, а также при орошении жидкостями с различной плотностью.

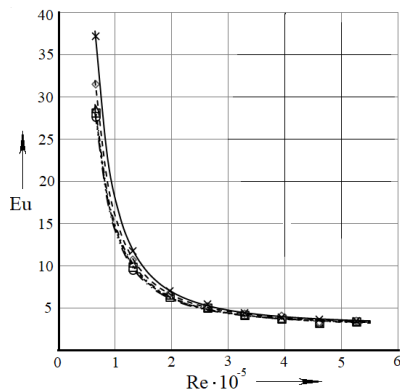


Рис. 3 – Зависимость числа Эйлера (Eu) от числа Рейнольдса (Re) для разных плотностей орошения ступени L, м³/м²·ч: ○ – 0,9; □ – 1,4; Δ – 1,9; ◇ – 2,4; x – 2,9; ---- - расчетные линии

Fig. 3 – Relationship between the Euler number (Eu) and the Reynolds number (Re) for different irrigation densities of stage L, m³/m²·h: ○ – 0,9; □ – 1,4; Δ – 1,9; ◇ – 2,4; x – 2,9; ---- - calculation lines

Аппроксимация полученной зависимости выполнена с помощью полинома второй степени, содержащего один параметр:

$$Eu = 537,86 + 16,274 \cdot Re + 2,812 \cdot Re^2$$

$$Eu = 2,82 + 1,56E10 \cdot Re - 1,827 \cdot Re^2$$

Анализ графиков показывает, что на рост гидравлического сопротивления основное влияние оказывает увеличение скорости газа в щелях завихрителя. При этом энергия газового потока в основном расходуется на раскрутку и подъем жидкости между завихрителем и корпусом аппарата, а с увеличением расхода жидкости наблюдается незначительный рост гидравлического сопротивления.

Важным параметром работы массообменных аппаратов является унос жидкости газом в виде капель. Согласно литературным данным, допустимое значение относительного брызгоуноса со ступени не должно превышать  $\varepsilon \leq 0,1$  [11, 12]. Зависимости относительного брызгоуноса от нагрузок по фазам приведены на графиках (рис. 4).

Установлено, что увеличение скорости газа в щелях завихрителя ведет к росту брызгоуноса жидкости из вихревой ступени. При проектировании массообменных аппаратов стремятся к снижению брызгоуноса жидкости со ступени, так как он приводит к снижению эффективности и производительности аппарата. Главная проблема используемых в промышленности концентраторов серной кислоты барботажного («Хемико») и распылительного типов («труба

Вентури») заключается в образовании в них тумана серной кислоты.

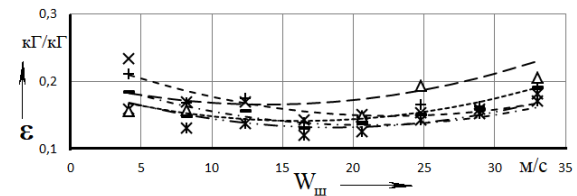


Рис. 4 – Зависимость относительного брызгоуноса (ε) от скорости газа в щелях завихрителя (Wщ) для разных плотностей орошения ступени L, м³/м²·ч: x – 1,2; + – 1,4; - – 1,6; \* – 1,9; Δ – 2,1; ◇ – 2,4; ---- - расчетные линии

Fig. 4 – Relationship between the relative spray loss (ε) and the gas velocity in the swirl generator slots (Wщ) for different stage spray densities L, m³/m²·h: x – 1,2; + – 1,4; - – 1,6; \* – 1,9; Δ – 2,1; ◇ – 2,4; ---- - calculation lines

Для улова тумана применяются громоздкие электрофилтры. Решение экологической проблемы предотвращения образования тумана серной кислоты в вихревом концентраторе возможно за счет организации повышенного уноса газовым потоком части жидкости в виде брызг и капель на вышележащую ступень. Это приводит к снижению производительности колонны, однако при этом не происходит образование тумана серной кислоты и решается крупная экологическая проблема [13]. Повышение производительности вихревой колонны достигается за счет модернизации конструкции вихревой ступени и максимального использования внутреннего пространства ступени для проведения процессов теплообмена. Взаимодействие фаз в вихревом потоке обеспечивает необходимый для безтуманной работы колонны перенос жидкости с нижележащей на вышележащую ступень [14]. Оптимальная величина относительного брызгоуноса, гарантирующая работу второй и последующих ступеней без туманообразования, составляет 0,1–0,2 кг/кг [15]. Представленные на рисунке 4 данные подтверждают, что разработанная вихревая ступень создает требуемый уровень брызгоуноса.

На основе экспериментальных данных получено уравнение регрессии (1), демонстрирующее высокую сходимость результатов.

$$\varepsilon = 6,22E-1 - 1,19E-2 \cdot W_{щ} - 4,82E-1 \cdot L + 1,75E-4 \cdot W_{щ} \cdot L + 3,36E-3 \cdot W_{щ}^2 + 1,34E-1 \cdot L^2$$

Зависимости, характеризующие удерживающую способность ВКС по жидкой фазе, приведены на рисунке 5.

Установлено, что удерживающая способность снижается при увеличении расхода газа и возрастает с повышением расхода жидкости. В интервале рабочих скоростей газа в щелях завихрителя (10–20 м/с) вихревая ступень демонстрирует высокие показатели удерживающей способности по жидкой

фазе. Отсутствие контактного патрубка в конструкции вихревой ступени позволяет удерживать между завихрителем и корпусом аппарата большее количество жидкости.

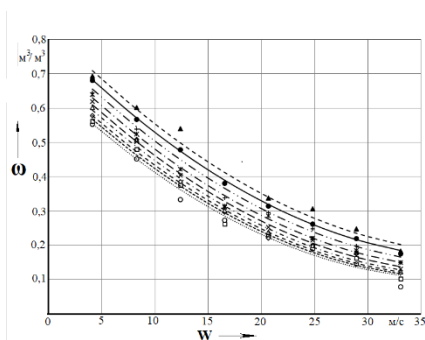


Рис. 5 – Зависимость объемной концентрации в жидкой фазе от скорости газа в щелях завихрителя для разных плотностей орошения ступени  $L$ ,  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{ч}$ :  $\circ$  – 0,9;  $\square$  – 1,2;  $\diamond$  – 1,4;  $\Delta$  – 1,6;  $\times$  – 1,9;  $\star$  – 2,1;  $+$  – 2,4;  $\bullet$  – 2,7;  $\blacktriangle$  – 2,9; ----- - расчетные линии

Fig. 5 – Dependence of the volume concentration in the liquid phase on the gas velocity in the swirl chamber slots for different spray densities in the stage  $L$ ,  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ :  $\circ$  – 0,9;  $\square$  – 1,2;  $\diamond$  – 1,4;  $\Delta$  – 1,6;  $\times$  – 1,9;  $\star$  – 2,1;  $+$  – 2,4;  $\bullet$  – 2,7;  $\blacktriangle$  – 2,9; ----- - calculation lines

По результатам обработки экспериментальных данных получено регрессионное уравнение, связывающее объемную концентрацию жидкости в вихревой ступени со скоростью газа в щелях завихрителя ( $W_{ш}$ ) и плотностью орошения ( $L$ ):

$$\omega = 2,69 - 0,12 \cdot W_{ш} + 0,07 \cdot L - 0,0045 \cdot W_{ш} \cdot L + 0,0016 \cdot W_{ш}^2 + 0,07 \cdot L^2$$

Разработанная конструкция вихревой ступени позволяет интенсифицировать работу колонны концентрирования серной кислоты за счет повышения ее пропускной способности как по газу, так и по жидкости. Для практической реализации предложенного решения разработаны технология литья деталей из ферросилида и комплект конструкторской документации на модернизированную вихревую колонну концентрирования серной кислоты.

## Выводы

1. Разработана конструкция модернизированной вихревой контактной ступени колонны концентрирования серной кислоты, позволяющая повысить производительность колонны по получаемой 92 %-ной серной кислоте до 100 т/сут и выше.

2. Разработана и смонтирована экспериментальная установка, на которой проведены экспериментальные исследования гидродинамических характеристик вихревой контактной ступени: гидравлического сопротивления, брызгоуноса и удерживающей способности по жидкой фазе.

3. Определено, что увеличение расхода жидкости не приводит к существенному повышению гидравлического сопротивления ВКС.

4. Вихревая ступень позволяет обеспечить необходимый брызгоунос жидкости между ступенями, обеспечивающий работу вихревой колонны без образования тумана серной кислоты.

5. Разработанная конструкция вихревой ступени обеспечивает высокую удерживающую способность по жидкой фазе.

## Литература

1. Р.А. Халитов, А.Ф. Махоткин, *Технология регенерации отработанных кислот в вихревых аппаратах*. КНИТУ, Казань, 2015. 384 с.
2. Р.А. Халитов, *Технология и оборудование процесса денитрации отработанных кислот производства нитратов целлюлозы*. ИПК Бриг, Казань, 2020. 143 с.
3. ГОСТ42184-2013. Серная кислота регенерированная.
4. Авт. свид. СССР 1713155 (1991)
5. Р.А.Халитов, О.В.Царева, Е.А.Махоткина, *Вестник Технологического университета*, 10, 293 – 299 (2010).
6. Пат. РФ 2016842 (1994).
7. В. С. Шуляк, *Литьё по газифицируемым моделям*. НПО «Профессионал», Санкт-Петербург, 2007. 408 с.
8. А.Я. Лебедев, *Установки денитрации и концентрирования серной кислоты*. Химия, Москва, 1972. 270 с.
9. И.Н. Степанов, Р.А. Халитов, А.Ф. Махоткин, *Вестник Технологического университета*, 23, 57 – 59 (2013).
10. Р.А. Халитов, И.Н.Степанов, А.Ф.Махоткин, *Вестник Технологического университета*, 17, 1, 263 – 265 (2014).
11. Е. А. Дмитриев, Р. В. Комляшев, Е. П. Моргунова, А. М. Трушин, А. В. Вешняков, Л. С. Сальникова, *Аппаратура процессов разделения гомогенных и гетерогенных систем*. РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, 2016. 104 с.
12. В.И. Петров, А.С.Бальбердин *Вестник Технологического университета*, 6, 109 – 113 (2006).
13. Р.А.Халитов, А.Ф.Махоткин, А.Ш.Шарипов, *Вестник БГТУ*, 8, 204 – 205 (2004).
14. Р.А.Халитов, А.Ш.Шарипов, А.Ф.Махоткин, *Вестник Технологического университета*, 21, 194 – 199 (2011).
15. Р.А.Халитов, А.Ш.Шарипов, А.Ф.Махоткин, *Вестник Технологического университета*, 21, 199 – 203 (2011).

## References

1. R.A. Khalitov, A.F. Makhotkin, *Technology for the Regeneration of Spent Acids in Vortex Reactors*. KNITU, Kazan, 2015. 384 pp.
2. R.A. Khalitov, *Technology and Equipment for the Denitration of Spent Acids in Cellulose Nitrate Production*. IPK Brig, Kazan, 2020. 143 pp.
3. GOST 42184-2013. Regenerated Sulfuric Acid.
4. USSR Author's Certificate No. 1713155 (1991)
5. R.A. Khalitov, O.V. Tsareva, E.A. Makhotkina, *Herald of Kazan Technological University*, 10, 293–299 (2010).
6. Russian Federation Patent 2016842 (1994).
7. V. S. Shulyak, *Casting Using Gas-Generating Patterns*. NPO "Professional," St. Petersburg, 2007. 408 pp.
8. A.Y. Lebedev, *Sulfuric Acid Denitration and Concentration Plants*. Khimiya, Moscow, 1972. 270 pp.
9. I.N. Stepanov, R.A. Khalitov, A.F. Makhotkin, *Herald of Kazan Technological University*, 23, 57–59 (2013).
10. R.A. Khalitov, I.N. Stepanov, A.F. Makhotkin, *Herald of Kazan Technological University*, 17, 1, 263–265 (2014).
11. E. A. Dmitriev, R. V. Komlyashev, E. P. Morgunova, A. M. Trushin, A. V. Veshnyakov, L. S. Salknikova, *Equipment for the Separation of Homogeneous and Heterogeneous Systems*.

D. I. Mendeleev Russian Chemical-Technological University, Moscow, 2016. 104 pp.  
12. V. I. Petrov, A. S. Balyberdin *Herald of Kazan Technological University*, 6, 109–113 (2006).  
13. R.A. Khalitov, A.F. Makhotkin, A.Sh. Sharipov, *Bulletin of BSTU*, 8, 204–205 (2004).

14. R.A. Khalitov, A.Sh. Sharipov, A.F. Makhotkin, *Herald of Kazan Technological University*, 21, 194–199 (2011).  
15. R.A. Khalitov, A.Sh. Sharipov, A.F. Makhotkin, *Herald of Kazan Technological University*, 21, 199–203 (2011).

---

© **Р. А. Халитов** – д-р техн. наук, профессор кафедры Оборудования химических заводов (ОХЗ), Кавзанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, halitovra@mail.ru; **И. М. Сабиров** – аспирант кафедры ОХЗ, КНИТУ; **Р. Х. Фазуллин** – канд.техн.наук, доцент кафедры ОХЗ, КНИТУ; **Е. С. Воробьев** – канд.техн.наук, доцент кафедры ОХЗ, КНИТУ

© **R. A. Khalitov** – Doctor of Sciences (Technical Asc.), Professor of the Department of Equipment of Chemical Plants (ECP), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, halitovra@mail.ru; **I. M. Sabirov** – PhD-student of the ECP department, KNRTU; **R. H. Fazullin** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the ECP department, KNRTU; **E. S. Vorob'yov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the ECP department, KNRTU.

Дата поступления рукописи в редакцию – 06.04.26.

Дата принятия рукописи в печать – 26.05.26.