

Р. А. Халитов, И. Н. Степанов, А. Ф. Махоткин

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОЙ КОНТАКТНОЙ СТУПЕНИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ДЕНИТРАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ КИСЛОТ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА НИТРАТОВ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Ключевые слова: вихревая контактная ступень, денитрация отработанных кислот, гидравлическое сопротивление, брызгоунос, удерживающая способность.

Представлены результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления, брызгоуноса и удерживающей способности вихревой контактной ступени для интенсификации процесса денитрации отработанных кислотных смесей. Проведенные исследования показали, что разработанная конструкция вихревой контактной ступени обладает широким диапазоном устойчивой работы и большой пропускной способностью по газу и жидкости.

Keywords: vortex contact stage, denitration of waste acids, hydraulic resistance, entrainment, retention capacity.

Results of experimental studies of hydraulic resistance, entrainment and the holding capacity of vortex contact stage for an intensification of process denitration worked acid mixtures. Studies have shown that the developed design of the vortex contact stage has a wide range of stable work and high bandwidth for gas and liquid.

Приведенные в ранее опубликованных работах [1,2] результаты анализа физико-химических основ и путей интенсификации процесса денитрации отработанных кислот показали, что интенсификация процесса денитрации возможна за счет использования прямого закрученного движения взаимодействующих фаз, которое осуществляется в массообменных вихревых контактных устройствах (ВКУ).

Конструкция вихревого контактного устройства колонны денитрации отработанных кислот должна соответствовать следующим требованиям:

- возможности отливки деталей из коррозионно-стойкого чугуна - ферросилида марки ЧС-15 или изготовления из фторопласта.
- возможности работы в широком диапазоне изменения нагрузок по газовой (G) и жидкой (L) фазам ($L/G = 1 \div 12$);
- создания интенсивного гидродинамического режима взаимодействия газовой и жидкой фаз, позволяющего обеспечить интенсификацию тепломассообменных процессов, протекающие в колонне.

Конструкция разработанной вихревой контактной ступени представлена рис.1. Вихревая ступень состоит из рабочей царги 1, тарелки 2, на которой установлен завихритель газового потока 3 и контактного патрубка 4. Завихритель выполнен с тангенциально расположенными лопатками 5.

Между контактным патрубком и рабочей царгой установлена перегородка 6, разделяющая рабочую царгу на нижнюю и верхнюю зоны. Над контактным патрубком установлен тороидальный каплеотбойник 7. Над исследуемой рабочей ступенью расположена брызгоуловительная ступень 8. Подача жидкости на ступень осуществляется через патрубок 9, расположенный в нижней зоне рабочей царги, а выход жидкости со ступени – через патрубок 10 верхней зоны царги.

Исследование гидродинамических характеристик вихревой ступени проводились в широком диапазоне изменения массовых отношений расходов

газовой (G) и жидкой (L) фаз: $L/G = 1,5 \div 25$ кг/кг. Исследовалась масштабная модель ступени в соотношении 1:3 к промышленному образцу.

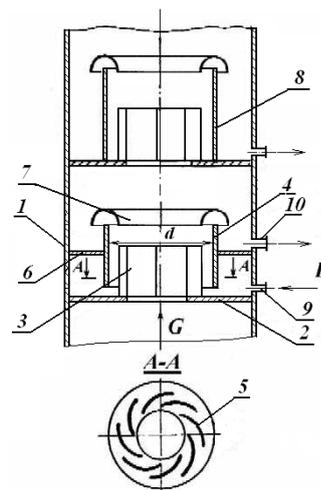


Рис. 1 - Вихревая контактная ступень

На рис.2 представлен график зависимости гидравлического сопротивления вихревой ступени от скорости газа в контактном патрубке в широком диапазоне изменения массовых отношений расходов фаз.

Анализ полученных зависимостей показывает, что с увеличением расходов газовой и жидкой фаз гидравлическое сопротивление ступени возрастает, и большее количество энергии газового потока затрачивается на турбулизацию жидкости. Сопротивление сухой тарелки пропорционально примерно квадрату скорости газа в контактной обечайке $\Delta P_{сх} \sim W_{кп}^2$, что соответствует автомодельному режиму однофазного потока. Для орошаемой ступени характерно существование двух режимов работы: при $W_{кп} < 10$ м/с гидравлическое сопротивление пропорционально $\Delta P_{оп} \sim W_{кп}^{0,75}$, что соответствует переходному режиму работы, а при скорости газа $W_{кп} > 10$ м/с - $\Delta P_{оп} \sim W_{кп}^{1,37}$, что характерно турбулентному режиму.

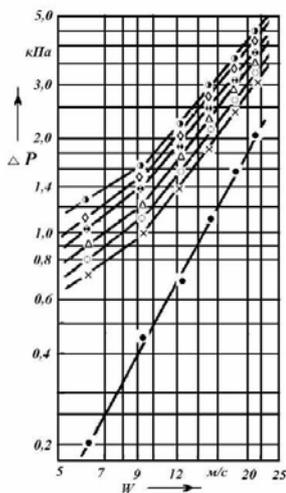


Рис. 2- Зависимость гидравлического сопротивления ВКУ (ΔP) от скорости газового потока в контактном патрубке ($W_{кп}$) при плотности орошения L ($\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$): \bullet - $\Delta P_{сух}$; \times - 30,0; \circ - 45,0; Δ - 69,0; \ominus - 90,0; \diamond - 117,0; \odot - 143,0

В результате обработки экспериментальных данных получены формулы, позволяющие рассчитать гидравлическое сопротивление для двух критических режимов работы орошаемой ступени в виде:

$$\text{при } Re_2 < 100000 \quad Eu_{2-ж} = 154,8 Re_2^{-0,65} Fr^{-0,3} \quad (1)$$

$$\text{при } Re_2 > 100000 \quad Eu_{2-ж} = 4,1 Re_2^{-0,35} Fr^{-0,18} \quad (2)$$

Безразмерные числа рассчитывали по формулам:

$$Eu_2 = \frac{\Delta P_{сух}}{\rho_2 W^2}, Re_2 = \frac{Wd}{\nu}, Fr = \frac{W^2}{g\delta}, Eu_{2-ж} = \frac{\Delta P_{оп}}{\rho_{2-ж} W_{2-ж}^2} \quad (3)$$

где $Eu_2, Eu_{2-ж}$ - числа Эйлера для газа и газожидкостной смеси; $\Delta P_{сух}, \Delta P_{оп}$ - гидравлические сопротивления сухого и орошаемого ВКУ, Па; W - скорость газа в контактном патрубке, м/с; $\rho_2, \rho_{2-ж}$ - плотности газа и газожидкостной смеси, Re_2 - число Рейнольдса для газа; d - внутренний диаметр контактного патрубка, м; ν - кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; Fr - число Фруда для газожидкостной смеси; $W_{2-ж}$ - скорость газожидкостной смеси в контактном патрубке, м/с.

Плотность газожидкостной смеси $\rho_{г-ж}$ рассчитывали по формуле:

$$\rho_{г-ж} = \frac{q}{V_{кп}} \quad (4)$$

где q - количество удерживаемой жидкости, $V_{кп}$ - объем газожидкостной смеси (объем контактного патрубка), м^3 .

Скорость газожидкостной смеси в контактном патрубке равна:

$$W_{г-ж} = \frac{L}{\pi\delta(D-\delta)}, \text{ м/с} \quad (5)$$

где L - объемная скорость жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; δ - толщина пленки жидкости в контактном патрубке.

Количественный учет межфазной турбулентности двухфазного потока производится при помощи безразмерного фактора гидродинамического состояния двухфазной системы f [3].

В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение, описывающее влияние изменения соотношения массовых расходов фаз в пределах $L/G = 1,5 - 25 \text{ кг/кг}$ на гидравлическое сопротивление вихревой ступени:

$$f = \frac{\Delta P_{сп} - \Delta P_{п\ddot{o}\ddot{o}}}{\Delta P_{п\ddot{o}\ddot{o}}} = 0,47 \left(\frac{L}{G} \right)^{0,53} \quad (6)$$

Результаты исследования брызгоуноса с вихревой контактной ступени в широком диапазоне изменения L/G представлены на рис.3. С увеличением скорости газа в контактном патрубке сначала наблюдается возрастание брызгоуноса, а затем при $W_{кп} > 13 \text{ м/с}$ - снижение.

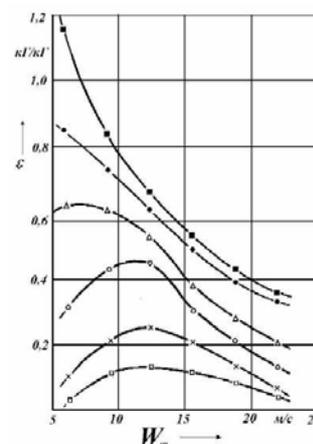


Рис. 3 - Зависимость уноса жидкости (ϵ) от скорости газового потока в контактном патрубке ($W_{кп}$) при плотности орошения L , ($\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$): \bullet - 30,0; \times - 45,0; \circ - 69,0; Δ - 90,0; \ominus - 117,0; \odot - 143,0

Увеличение расхода жидкости приводит к росту брызгоуноса. При $L > 90 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ и $W_{кп} = 5 \div 7 \text{ м/с}$ наблюдается максимум брызгоуноса. Это связано с тем, что с увеличением расхода жидкости толщина пленки жидкости в контактном патрубке становится больше ширины сепарирующего зазора и поэтому часть жидкости проскакивает под кромкой сепаратора и уносится газовым потоком.

Изменение относительного уноса жидкости от расходов фаз при $W_{кп} = 12 \div 25 \text{ м/с}$ выражается уравнением:

$$\epsilon_G = 0,37 \cdot W_{г\ddot{e}}^{-0,41} \cdot L^{0,11} \quad (7)$$

В широком диапазоне изменения нагрузок по фазам относительный брызгоунос жидкости со ступени находится в пределах допустимых значений 10%.

Исследование удерживающей способности вихревой контактной ступени проводили методом одновременной, синхронной отсечки газовой и жидкой фаз. На рис.4 представлена зависимость удерживающей способности (q) вихревой ступени от скорости газа в контактном патрубке ($W_{кп}$).

Высокая удерживающая способность ступени наблюдается при низких скоростях $W_{кр} = 5 \div 7$ м/с. При этих скоростях вихревая ступень находится в переходном режиме работы. В этом режиме наблюдается низкая турбулизация газожидкостного потока и увеличивается накопление жидкости в вихревой ступени.

С увеличением скорости газа в контактном патрубке свыше 10 м/с наблюдается постепенное снижение удерживающей способности. При этих режимах работы вихревая ступень обладает достаточно высокой удерживающей способностью и высокой степенью турбулизации газожидкостного потока. Увеличение расхода жидкости приводит к возрастанию удерживающей способности. С увеличением скорости газа в контактном патрубке повышается турбулизация газовой и жидкой фаз, степень обновления поверхности контакта фаз и транспорт жидкости из зоны контакта фаз.

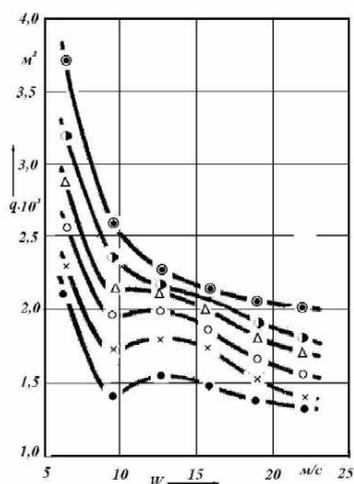


Рис. 4 - Зависимость удерживающей способности от скорости газа в контактном патрубке при различных расходах жидкости ($L \cdot 10^{-3}$, м³/с): • - 0,7; × - 1; ○ - 1,6; Δ - 2,1; ⊙ - 2,8; ⊚ - 3,4

Зависимость удерживающей способности от расходов газовой и жидкой фаз выражается уравнением:

$$q = 0,25W^{-0.4}L^{0.25} \quad (8)$$

Проведенные исследования показали, что разработанная конструкция вихревой контактной ступени обладает широким диапазоном устойчивой работы и большой пропускной способностью по газу и жидкости. Благодаря высокой степени турбулизации фаз и развития большой межфазной поверхности за счет постоянного обновления поверхности контакта фаз достигается значительная интенсификация массопередачи и высокая эффективность вихревой ступени.

Литература

1. Степанов И.Н. Анализ закономерностей процесса денитрации отработанных кислот в условиях производства нитратов целлюлозы /И.Н.Степанов, Р.А.Халитов, А.Ф.Махоткин // Вестник казанского технологического университета. – Казань: 2013. Т.16 – № 19 – С.116 - 118.
2. Степанов И.Н. Интенсификация процесса денитрации отработанных кислот в условиях производства нитратов целлюлозы /И.Н.Степанов, Р.А.Халитов, А.Ф.Махоткин // Вестник казанского технологического университета. – Казань: 2013. Т.16 – № 23 – С.57-60.
3. Кафаров, В.В. Основы массопередачи / В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1979. – 439 с.

© Р. А. Халитов – д-р техн. наук, проф. кафедры ОХЗ КНИТУ, oxzkstu@rambler.ru, И.Н.Степанов – асп. той же кафедры; А. Ф. Махоткин - д-р техн. наук, проф. зав. кафедры ОХЗ КНИТУ.