

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 прямооточного 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 коррозионностойкого 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 $\Delta P_{\text{сух}} \sim W_{\text{кп}}^2$, что соответствует автомодельному режиму однофазного потока. Для орошаемой ступени характерно существование двух режимов работы: при $W_{\text{кп}} 10$ м/с гидравлическое сопротивление пропорционально $\Delta P_{\text{ор}} \sim W_{\text{кп}}^{0,75}$, что соответствует переходному режиму работы, а при скорости газа $W_{\text{кп}} > 10$ м/с - $\Delta P_{\text{ор}} \sim W_{\text{кп}}^{1,37}$, что характерно турбулентному режиму. Рис. 2- Зависимость гидравлического сопротивления ВКУ (ΔP) от скорости газового потока в контактном патрубке ($W_{\text{кп}}$) при плотности орошения L ($\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$): • - $\Delta P_{\text{сух}}$; x -

30,0; ○ - 45,0; Δ - 69,0; [- 90,0; ◇ - 117,0; ✕ - 143,0 В результате обработки экспериментальных данных получены формулы, позволяющие рассчитать гидравлическое сопротивление для двух критических режимов работы орошаемой ступени в виде: при $Re_{г-ж} < 100000$ $Eu_{г-ж} = 154,8 Re_{г-ж}^{-0,65} Fr^{-0,3}$ (1) при $Re_{г-ж} > 100000$ $Eu_{г-ж} = 4,1 Re_{г-ж}^{-0,35} Fr^{-0,18}$ (2) Безразмерные числа рассчитывали по формулам: (3) где $Eu_{г}$, $Eu_{г-ж}$ числа Эйлера для газа и газожидкостной смеси; $\Delta P_{сух}$, $\Delta P_{ор}$ гидравлические сопротивления сухого и орошаемого ВКУ, Па; W скорость газа в контактном патрубке, м/с; $\rho_{г}$, $\rho_{г-ж}$ - плотности газа и газожидкостной смеси, $Re_{г}$ число Рейнольдса для газа; d внутренний диаметр контактного патрубка, м; ν - кинематическая вязкость воздуха, м²/с; Fr - число Фруда для газожидкостной смеси; $W_{г-ж}$ скорость газожидкостной смеси в контактном патрубке, м/с. Плотность газожидкостной смеси $\rho_{г-ж}$ рассчитывали по формуле: (4) где q количество удерживаемой жидкости, $V_{кп}$ - объем газожидкостной смеси (объем контактного патрубка), м³. Скорость газожидкостной смеси в контактном патрубке равна: м/с (5) где L - объемная скорость жидкости, м³/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 $L/G = 1,5 - 25$ кг/кг на гидравлическое сопротивление вихревой ступени: (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 $W_{кп} > 13$ м/с - снижение. Рис. 3 - Зависимость уноса жидкости (ϵ) от скорости газового потока в контактном патрубке ($W_{кп}$) при плотности орошения L , (м³/м²·ч): • - 30,0; ✕ - 45,0; ○ - 69,0; Δ - 90,0; [- 117,0; ✕ - 143,0 Увеличение расхода жидкости приводит к росту брызгоуноса. При $L > 90$ м³/м²·ч и $W_{кп} = 5 \div 7$ 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 $W_{кп} = 12 \div 25$ м/с выражается уравнением: (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 $W_{кп} = 5,7$ 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 контактной 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 контактной 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 контактной патрубке при различных расходах жидкости ($L \times 10^{-3}$, м/с): • - 0,7; × - 1; ○ - 1,6; D - 2,1; [- 2,8; x - 3,4 Зависимость удерживающей способности от расходов газовой и жидкой фаз выражается уравнением: (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.