

Недостатком действующих в промышленности колонн денитрации является невысокая степень отгонки азотной кислоты и оксидов азота на первой по ходу пара (газа) ступени [1,2]. Вытекающая из колонн денитрации отработанная серная кислота не должна содержать азотную кислоту и оксиды азота. Однако существующие колонны денитрации не обеспечивают полной отгонки соединений азота, особенно в первой по ходу пара (газа) ступени. Поэтому на заводах отрасли в технологических регламентах производств установлено содержание соединений азота в пределах 0,03-0,05 % масс. Для полного удаления соединений азота можно использовать денитрирующие агенты, восстанавливающие их до азота, однако процесс восстановительной денитрации является длительным (5-40 мин) и для его осуществления необходимо дополнительное оборудование. Кроме того, в процессе восстановительной денитрации серная кислота охлаждается, что приводит к увеличению расхода природного газа и снижению производительности концентратора серной кислоты [3]. В этой связи надо стремиться к максимальной отгонке соединений азота в колонне денитрации, особенно на первой по ходу пара (газа) ступени. На первую по ходу пара (газа) ступень подается перегретый пар при температуре 200-250°C, и полнота отгонки соединений азота в значительной степени зависит от способа взаимодействия газовой и жидкой фаз на этой ступени. Нами разработана новая конструкция вихревой колонны денитрации отработанных кислот [4], представленная на рис.1. Колонна изготовлена из высококремнистого чугуна – ферросилида марки ЧС – 15. Первая по ходу пара (газа) ступень колонны выполнена в виде вихревого устройства с двумя тангенциальными патрубками входа газа. Вторые и последующие по ходу газового потока ступени состоят из царг, на которых установлены завихрители и контактные патрубки. Описание конструкции этих ступеней представлено в работе [5]. Рис. 1 - Вихревая колонна денитрации: 1 – корпус; 2 – первая по ходу газа ступень; 3 – патрубок; 4 – каплеотбойник; 5 – патрубок входа кислоты; 6 – патрубок входа пара (газа); 7 – патрубок выхода кислоты; 8 – вихревая ступень; 9 – линия перетока кислоты. Первая ступень работает следующим образом. Отработанная серная кислота, содержащая остатки азотной кислоты и оксидов азота, по линии перетока кислоты 9 через патрубок 5 поступает на первую по ходу пара (газа) вихревую ступень колонны. Газовый поток входит в днище через патрубок 6. Серная кислота заполняет нижнюю часть днища, образуя при этом гидрозатвор и исключая проскок пара при работе колонны через зазор между контактным патрубком и днищем колонны. Газовый поток проходит через тангенциальные патрубки 3 вихревого устройства 2, приобретает вращательное движение и раскручивает при этом кислоту, поступающую в вихревое устройство. В области сопряжения корпуса вихревого устройства с тангенциальными патрубками происходит интенсивное взаимодействие пара с жидкостью. Газовый поток дробит жидкость на капли, которые движутся по пересекающимся траекториям,

сталкиваются между собой, сливаются и вновь дробятся. При этом развивается значительная площадь поверхности контакта фаз с высокой скоростью обновления. В верхней части вихревого устройства под каплеотбойником 4 происходит сепарация жидкости из закрученного газожидкостного потока. Вся кислота, поступающая в нижнюю часть днища, контактирует с газом и отводится из царги колонны через патрубок 7. Благодаря этому достигается повышение полноты отгонки азотной кислоты и оксидов азота из отработанной серной кислоты. Такая организация взаимодействия фаз в вихревом газожидкостном потоке позволяет повысить производительность колонны.

Проводились исследования следующих гидродинамических характеристик первой ступени: гидравлического сопротивления сухой и орошаемой ступени, брызгоуноса жидкости со ступени и удерживающей способности по жидкой фазе. Исследовалась масштабная модель ступени в соотношении 1:3 к промышленному образцу. Исследования проводились в широком диапазоне изменения режимных параметров: расход воздуха изменялся от 400-1200 м³/ч, что соответствовало изменению скорости газа в патрубках входа газа от 5 до 20 м/с; объемный расход подаваемой в вихревое устройство жидкости I изменялся в диапазоне 0,05 до 1,2 м³/ч, что соответствовало изменению плотности орошения тарелки ($Star = 0,0863 \text{ м}^2$), $L = I/Star$ от 0,63 до 13,78 м³/м²·ч. Соотношение нагрузок по фазам L/G изменялось от 0,1 до 6 кг/кг. Зависимость изменения гидравлического сопротивления вихревого устройства от скорости газа в щелях (патрубках входа газа) представлена на рис.2. Гидравлическое сопротивление сухой ступени $\Delta P_{\text{сух}}$ пропорционально $W_{\text{щ}}^{1,5}$, что соответствует развитому турбулентному режиму движения газового потока. Гидравлическое сопротивление орошаемой ступени ($\Delta P_{\text{ор}}$) возрастает с увеличением плотности орошения ступени. Гидравлическое сопротивление орошаемой ступени находится в пределах 0,7-2 кПа. При этом в вихревом устройстве наблюдается развитый турбулентный вихревой режим движения газожидкостного потока. На основе обработки экспериментальных данных получено уравнение для расчета гидравлического сопротивления орошаемой ступени: $\Delta P_{\text{ор}} = 0,167 + 0,04L + 0,052 W_{\text{щ}} + 0,167 L^2 - 0,002' W_{\text{щ}} \times L + 0,0011 W_{\text{щ}}^2$, кПа (1) Рис. 2 - Зависимость гидравлического сопротивления от скорости газа в щелях завихрителя при следующих плотностях орошения ступени (L, м³/м²·ч): " - 0,63; Δ - 2,19; × - 2,98; * - 3,77; • - 4,7; + - 7,25; ◇ - 10,42; ○ - 13,78; ▲ - $\Delta P_{\text{сух}}$ Результаты исследования брызгоуноса из вихревой ступени представлены на рис.3. Рис. 3 - Зависимость относительного брызгоуноса жидкости со ступени от скорости газа в щелях при следующих плотностях орошения ступени (L, м³/м²·ч): " - 0,63; j - 1,33; Δ - 2,19; × - 2,98; - 3,77; + - 7,25; ◇ - 10,42; ○ - 13,78 Брызгоунос жидкости на ступенях зоны денитрации нежелателен, так как он приводит к продольному перемешиванию жидкости в колонне и снижению движущей силы процесса. Величину межтарельчатого относительного уноса жидкости (e) (равную 0,1 кг жидкости

на 1 кг жидкости подаваемой на ступень) принимают за верхнюю границу оптимального режима работы контактной ступени [5]. Повышенный брызгоунос жидкости со ступени ($\epsilon > 0,1$) наблюдается при расходах жидкости $L 0,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ и газа $W_{\text{щ}} 10 \text{ м/с}$. При этом вихревое устройство работает в неустойчивом, пульсирующем режиме, основная часть жидкости движется в виде газожидкостного потока в центре вихревого устройства и уносится газовым потоком на вышележащую ступень. С увеличением скорости газа в патрубках наблюдается снижение относительного брызгоуноса со ступени. В диапазоне скоростей газа $W_{\text{щ}} = 12,0 - 20,0 \text{ м/с}$ наблюдается минимум брызгоуноса $\epsilon 0,05$. При этих скоростях газа и различных расходах жидкости наблюдается устойчивое вихревое вращательное движение газожидкостного потока по стенке вихревого устройства и надежная сепарация фаз в межтарельчатом пространстве. В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение для расчета относительного брызгоуноса со ступени: (при $L=2 - 14 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$) $\epsilon \times 10^3 = 285 - 14 \times L - 30 \times W_{\text{щ}} - 0,675 \times L^2 + 0,16 W_{\text{щ}} \times L + 0,88 W_{\text{щ}}^2$, кг/кг;

(2) Результаты исследования удерживающей способности вихревого устройства представлены на рис.4. Рис. 4 - Зависимость объемной концентрации жидкости от плотности орошения ступени при следующих скоростях газа в щелях ($W_{\text{щ}}$, м/с): $\circ$ - 7,25; $\downarrow$ - 9,66; Δ - 12,08; $\times$ - 14,49; $-$ 16,91; $\bullet$ - 19,32. Распределение жидкости и газа в газожидкостном потоке характеризуется удерживающей способностью по дисперсной фазе ω , под которой понимается количество дисперсной фазы (q , м³) удержанной в данный момент в единице объема (V , м³) сплошной фазы. Объемная концентрация жидкой фазы: $\omega = \frac{q}{V}$, где $V_{\text{ВКУ}}$ – объем вихревого контактного устройства. Удерживающая способность имеет большое значение для проведения процессов массопередачи, так как определяет величину поверхности контакта фаз и время контакта. Как видно из рис.4 с увеличением скорости газа в щелях наблюдается снижение объемной концентрации жидкости в вихревом устройстве. Увеличение плотности орошения ступени приводит к возрастанию объемной концентрации жидкой фазы. При скоростях газа в щелях вихревого устройства $W_{\text{щ}}=10-15 \text{ м/с}$ и плотностях орошения $L=0,3-14 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ достигается достаточно высокая объемная концентрация жидкой фазы в вихревом устройстве $\omega=0,2-0,3$. Этому же диапазону расходов газовой и жидкой фаз соответствует низкий брызгоунос жидкости со ступени $\epsilon 0,05$ и невысокое гидравлическое сопротивление $\Delta P = 1 - 1,5 \text{ кПа}$. В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение для расчета объемной концентрации жидкой фазы: $\omega \times 10^3 = 585 - 35,34 \times L - 62,5 \times W_{\text{щ}} - 1,16 \times L^2 - 0,6 W_{\text{щ}} \times L + 1,82 W_{\text{щ}}^2$, м³/м³

(3) Проведенные экспериментальные исследования показали устойчивую работу первого по ходу газа вихревого устройства в широком диапазоне изменения нагрузок по газовой и жидкой фазам.