

66
134

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

БЕЛОРУССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ С. М. КИРОВА

На правах рукописи

ЛЕВДАНСКИЙ ЭДУАРД ИГНАТЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ
ПРИМЕНЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ТАРЕЛОК С
ПРЯМОТОЧНО-ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

05.17.08. – Процессы и аппараты
химической технологии

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 1975

66
134

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ БССР

Белорусский технологический институт имени С.М.Кирова

На правах рукописи

ЛЕВДАНСКИЙ ЭДУАРД ИГНАТЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ
КОНТАКТНЫХ ТАРЕЛОК С ПРЯМОУГОЛЬНО-ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ

05.17.08. - Процессы и аппараты химической
технологии

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 1975.

3642 ар

БИБЛИОТЕКА БТИ
ИМЕНИ С. М. КИРОВА

Работа выполнена на Гродненском химическом комбинате
имени С.О.Притыцкого

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент И.М.ПЛЕХОВ

Официальные оппоненты: член - корреспондент АН БССР
доктор технических наук, профессор САЛМАТОВ И.И.
кандидат технических наук, доцент ИСАКОВ В.П.

Ведущее предприятие: (ГИАП) Государственный научно-иссле-
дательский и проектный институт азотной
промышленности и продуктов органическо-
го синтеза

Автореферат разослан " 8 " февраля 1975г.

Защита диссертации состоится " 12 " марта 1975г.

в 10⁰⁰ час. на заседании Ученого Совета Белорусского техноло-
гического института им.С.М.Кирова (220630, г.Минск 50,
ул.Свердлова 13а, корп.4, ауд.220).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
института.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук


/Е.А.ГРУШЕВСКАЯ/.

Значительный прирост выпуска продукции в химической и нефтехимической промышленности достигается за счет повышения производительности труда и, главным образом, путем интенсификации технологических процессов. Решение этих задач сдерживается во многих производствах ограниченной пропускной способностью существующих массообменных аппаратов по газовой фазе. Производительность большинства ступенчато-противоточных колонных аппаратов повышается, как правило, путем увеличения их диаметра, что не всегда экономически выгодно, а в ряде случаев по техническим причинам и невозможно.

Переход к прямоточному взаимодействию фаз на контактных ступенях массообменных аппаратов является одним из путей решения данной проблемы. Применение закрученного прямотока дополнительно способствует увеличению скорости взаимодействующих фаз, интенсификации процессов массообмена и обеспечивает достаточно полную сепарацию фаз после их взаимодействия.

Исследованиям массообменных устройств с закрученным прямотоком в последнее время уделяется должное внимание во многих заинтересованных организациях, однако широкого внедрения в производство они не получили. Последнее объясняется тем, что большинство исследований проведено на моделях лабораторного типа и результаты зачастую противоречивы.

Практика показывает, что для скорейшего применения новой совершенной аппаратуры в производство, необходимо проведение исследований на опытных образцах, имеющих размеры близкие реальным, с последующей проверкой в промышленных условиях. Это и являлось основной задачей исследований в настоящей работе.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы и приложения, состоящего из основных экспериментальных данных и актов внедрения исследуемой конструкции на промышленных установках.

В первой главе дан информационный обзор литературы по гидродинамике и массообмену в осевом и закрученном прямотоке, а также по основным конструкциям контактных тарелок. Показано, что осуществление взаимодействия фаз в осевом и особенно закрученном прямотоке позволяет резко интенсифицировать процессы массообмена.

Во второй главе выполнен анализ работы прямоточно-центробежных контактных устройств и предложена их классификация на осно-

ве следующих признаков:

- 1) направления движения потоков в зоне контакта,
- 2) способа организации вихревого движения фаз,
- 3) компоновки контактных ступеней,
- 4) способа сепарации газо-жидкостного потока на контактной ступени после взаимодействия фаз,
- 5) наличия или отсутствия рециркуляции жидкости через контактный элемент,
- 6) способа подвода жидкости в зону контакта.

Анализ работы и классификация по приведенным признакам наглядно показывает, что контактные устройства с взаимодействием фаз в восходящем закрученном потоке, хотя и обладают несколько повышенным гидравлическим сопротивлением, обеспечивают более высокую эффективность массообмена, чем с нисходящим прямотоком. Кроме того конструкция тарелки с восходящим прямотоком проще и аппарат в целом компактнее. При выборе завихрителей предпочтение следует отдавать осевым, а затем тангенциальным, как наиболее простым в изготовлении и надежным в работе. Степень закрутки двухфазного потока является функцией массообменных и гидродинамических характеристик контактной ступени. Поскольку увеличение диаметра контактных элементов отрицательно влияет на сепарацию фаз и на эффективность массообмена, в аппаратах большой производительности целесообразнее применять контактные тарелки многоэлементной конструкции. Для достижения высоких скоростей газовой фазы при низком межтарельчатом уносе жидкости необходимо применение двухстадийной сепарации фаз: на первой стадии сепарация капель в радиальном направлении в поле центробежных сил и на второй - отделение пленки жидкости от газового потока с помощью инерционных отсекателей. Для увеличения времени контакта фаз при проведении процессов хемосорбции, ректификации трудноразделимых смесей, абсорбции газов дорогостоящим абсорбентом, десорбции хорошо растворимых газов следует осуществлять многократную рециркуляцию жидкости на контактной ступени. Жидкость следует подводить в центр контактного элемента (в зону пониженного давления), что обеспечивает развитую поверхность межфазного контакта.

Разработка конструкции контактной тарелки с прямоточно-центробежными элементами

Всесторонний анализ известных работ и классификация тарелок по приведенным выше признакам позволили создать более совершенный конструктивный вариант контактной тарелки с прямоточно-центробежными элементами, схема которой представлена на рис. 1. Тарелка состоит из трубчатых контактных патрубков 1, жестко закрепленных в полотне тарелки 2 и снабженных статическими многолопастными завихрителями 3 на входе и отбойными колпачками 4 на выходе. Жидкость с полотна тарелки в зону контакта поступает по U-образной трубке питания 5. При работе аппарата газ(пар) направляется в контактные патрубки, на входе которых с помощью завихрителей формируется закрученный поток. За счет вращения потока, в центре патрубка выше завихрителя образуется зона пониженного давления, что позволяет работать при меньшем уровне жидкости на тарелке. Кроме того, подвод жидкости в центр контактного элемента обеспечивает ее дробление на мелкие капли, которые в поле центробежных сил пересекают газовый поток от центра к периферии, образуя развитую поверхность контакта. Достигнув внутренней стенки, капли сливаются в турбулизованную пленку, которая увлекается газовым потоком по стенке контактного патрубка вверх. Наличие двух зон контакта позволяет достичь высокой эффективности массообмена. Сепарация газо-жидкостной системы осуществляется вначале за счет центробежных сил, а затем путем отсечки пленки жидкости от газового потока. Наличие двух стадий сепарации обеспечивает высокую степень разделения фаз и работоспособность массообменной тарелки при относительных нагрузках на контактный элемент до

$$\frac{G}{K} = 5.$$

Работа новой тарелки может осуществляться как с рециркуляцией жидкой фазы через контактные элементы (рис. 1а), так и без нее (рис. 1б). В первом случае (а) подвод жидкости в контактные патрубки осуществляется с полотна этой же тарелки, а переток с тарелки на тарелку - по специальным переливным трубам. Благодаря рециркуляции увеличивается время контакта фаз, что зачастую

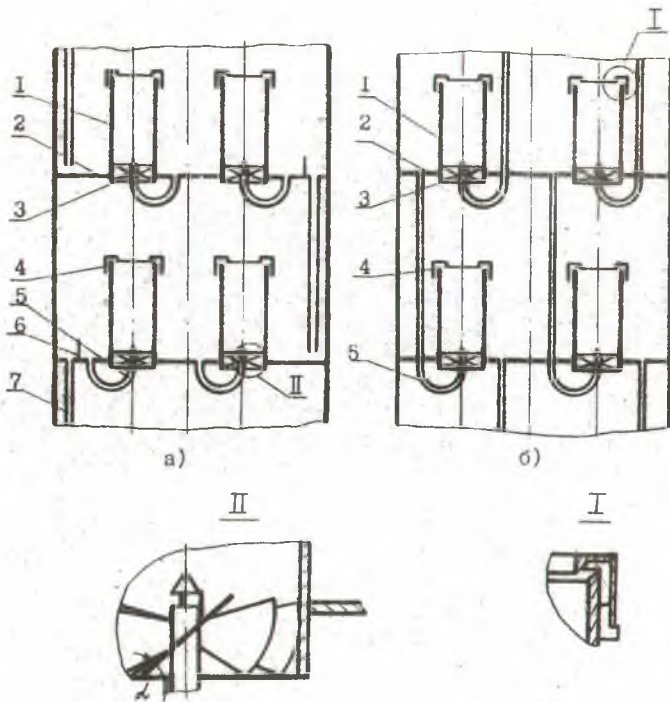


Рис. I. Конструкция контактной тарелки с тангентно-центробежными элементами.

- а) с рециркуляцией жидкости;
- б) без рециркуляции жидкости.

- I. Патрубок. 2. Плотное тарелки. 3. Завихритель.
- 4. Отбойный колпачок. 5. Питательная трубка.
- 6. Переливной порог. 7. Переточная труба.

положительно сказывается на разделительной способности. Во втором случае (б) подвод жидкости осуществляется трубками питания с полотно вышележащей тарелки, исключающими применение специальных переливных устройств в аппарате. Подвод жидкости в зону пониженного давления позволяет снизить межтарельчатое расстояние и тем самым уменьшить высоту аппарата. Контактная тарелка проста в изготовлении и может выполняться как цельной, так и из отдельных сегментов, что очень важно при реконструкции существующих аппаратов, когда монтаж тарелок необходимо производить через люк-лаз.

Исследование гидродинамических характеристик.

В задачу исследований входило изучение гидравлического сопротивления сухой и орошаемой тарелки, эффективности сепарации фаз, количества циркулирующей жидкости через элементы, равномерности распределения фаз по контактным элементам тарелки и определение границ устойчивой работы. Все исследования проводились в два этапа: вначале на стенде диаметром 200мм изучалась гидродинамика одного контактного элемента промышленных размеров, а затем полученные данные проверялись в аппарате диаметром 1м при наличии на тарелке большого количества контактных элементов. Гидравлическое сопротивление неорошаемой одноэлементной контактной тарелки изучалось при изменении скорости газа в контактом элементе от 5 до 30м/сек и угла наклона лопастей завихрителя α от 15 до 45°. При этом диаметр контактного патрубка выбирался $D_n = 50, 72, 100, 129$ и 150 мм, а его длина $L_n = (1+6) D_n$. Плотность воздуха изменялась от 1,2 до 4,8 кг/м³.

Согласно исследованиям во всем диапазоне изменения нагрузок и плотности газа наблюдается зависимость $\Delta P_{сух} \sim \rho \cdot W^2$, характерная для автомоделного режима движения потоков. Заметного влияния диаметра и длины контактного патрубка на гидравлическое сопротивление тарелки в исследуемом интервале не обнаружено. При изменении угла наклона лопастей от 15° до 45° коэффициент сопротивления изменяется от 26,5 до 4,9.

В результате обработки опытных данных была получена зави-

симость для определения сопротивления сухой тарелки.

$$\Delta P_{\text{сух}} = 4,9 (\operatorname{tg} \alpha)^{-1,3} \frac{\rho \cdot W_r^2}{2}, \quad \text{Н/м}^2 \quad (1)$$

Так как при малых углах наклона лопастей коэффициент сопротивления достигает больших величин, что неожиданно в промышленных условиях, то в дальнейшем опыты с углом $\alpha < 30^\circ$ не проводились.

Гидравлическое сопротивление орошаемой контактной тарелки исследовалось при тех же параметрах, что и для сухой тарелки, а соотношение расходов $\frac{K}{G}$ изменялось в пределах 0 : 5.

Результаты обработки опытных данных (рис.2) показывают наличие двух гидродинамических режимов в исследуемом интервале работы контактной тарелки. Первый режим, который назван пульсационным, является неустановившимся и наблюдается при низких скоростях газовой фазы. В этом режиме происходит периодическое выбрасывание больших порций жидкости из контактного элемента, что приводит к значительному межтарельчатому уносу. При более высоких скоростях газа наблюдается режим развитой турбулентности, который характеризуется устойчивым волновым движением пленки жидкости по стенке контактного элемента. Так как пульсационный режим является неустойчивым, то обработка опытных данных проводилась только для устойчивого турбулентного режима. Исследования устойчивого турбулентного режима показывают, что при нагрузках на контактный элемент $\frac{K}{G} < 0,6$ коэффициент сопротивления контактной тарелки почти не изменяется и даже несколько ниже коэффициента сопротивления сухой тарелки. Поэтому сопротивление тарелки в диапазоне изменения расходов $\frac{K}{G}$ от 0 до 0,6 следует принимать как для неорошаемой. Наиболее вероятной причиной такого явления следует считать частное гашение каплями жидкости газовой фазы. При $\frac{K}{G} > 0,6$ значение f возрастает пропорционально росту этого отношения за счет увеличения затрат энергии на транспортировку жидкости. На основании опытных данных для диапазона изменения соотношения расходов $\frac{K}{G}$ от 0,6 до 5 получено эмпирическое уравнение:

$$f = 4,9 (\operatorname{tg} \alpha)^{-1,3} \frac{K}{G} \quad (2)$$

Полученная зависимость для одноэлементной контактной тарелки была проверена при исследовании многоэлементной тарелки диаметром

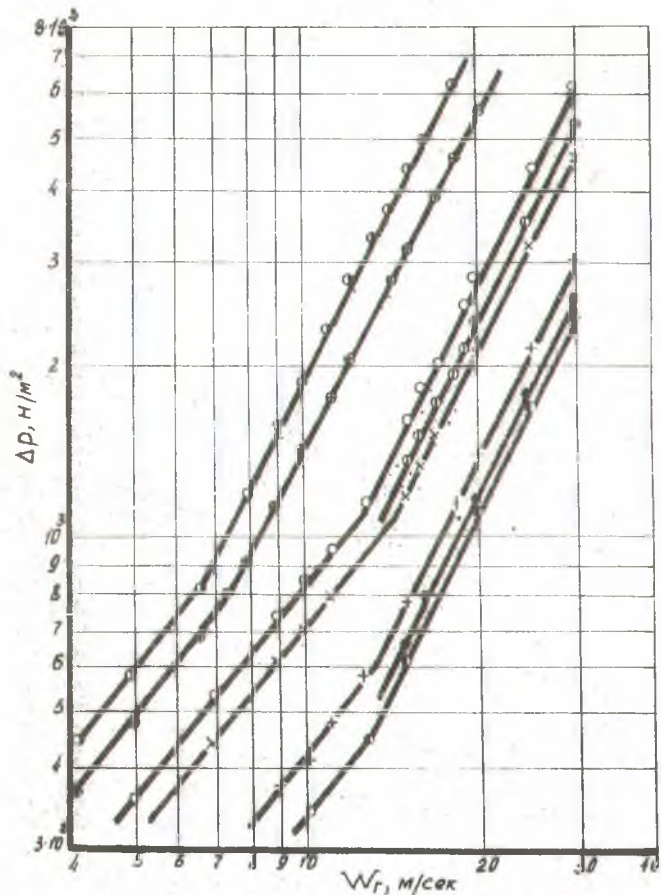


Рис.2. Гидравлическое сопротивление тарелки.

- $\alpha = 45^\circ$, $\frac{h}{\delta} = 0,5$, $\rho_f = 1,2 \text{ кг/м}^3$; ○ $\alpha = 30^\circ$, $\frac{h}{\delta} = 0$, $\rho_f = 1,2 \text{ кг/м}^3$;
- $\alpha = 45^\circ$, $\frac{h}{\delta} = 0$, $\rho_f = 1,2 \text{ кг/м}^3$; ○ $\alpha = 30^\circ$, $\frac{h}{\delta} = 2$, $\rho_f = 1,2 \text{ кг/м}^3$;
- + $\alpha = 45^\circ$, $\frac{h}{\delta} = 1$, $\rho_f = 1,2 \text{ кг/м}^3$; ○ $\alpha = 37,5^\circ$, $\frac{h}{\delta} = 1$, $\rho_f = 3,6 \text{ кг/м}^3$;
- × $\alpha = 45^\circ$, $\frac{h}{\delta} = 4$, $\rho_f = 1,2 \text{ кг/м}^3$; ○ $\alpha = 37,5^\circ$, $\frac{h}{\delta} = 1$, $\rho_f = 4,8 \text{ кг/м}^3$.

Им. Исследования показали полную адекватность гидравлического сопротивления одно- и многоэлементной контактной тарелки.

Исследование межтарельчатого уноса жидкости методом непосредственного замера количества уносимой жидкости, при котором последняя собирается на специальной сепарационной тарелке, показало, что с увеличением диаметра патрубка при постоянном $\frac{u}{G}$ сепарация жидкости ухудшается. Из условий наилучшей сепарации фаз выявлено, что длина контактного элемента, равная $2,5D$, является оптимальной. Характер изменения брызгоуноса в зависимости от скорости газа имеет две области, зависящие от гидродинамической обстановки в контактной трубке. При пульсационном режиме наблюдается наибольший унос, который по мере увеличения скорости газовой фазы резко падает. При скорости газовой фазы в элементе $14 + 22$ м/сек наблюдается наименьший унос жидкости. При больших скоростях газовой фазы появляется вторичный унос жидкости с полотна тарелки, который становится значительным при скорости газа выше 30 м/сек. Исследования показывают, что брызгоунос с увеличением угла наклона лопастей, а также величины $\frac{u}{G}$ возрастает. Однако, как следует из опытов, в устойчивом турбулентном режиме при $\frac{u}{G} = 4$, угле наклона лопастей $\alpha = 45^\circ$ и диаметре патрубка 150 мм унос жидкости не превышает $4 + 6\%$, что является вполне допустимым для большинства процессов массообмена. При соотношении нагрузок $\frac{u}{G} < 1$ и $\alpha = 30^\circ$ унос жидкости с тарелки практически не наблюдается, что позволяет использовать ее во многих технологических процессах как прямоточно-центробежный сепаратор.

Диапазон работы контактной тарелки обычно определяется устойчивой гидродинамической обстановкой, допустимым уносом жидкости с тарелки и величиной гидравлического сопротивления. Установлено, что верхняя граница устойчивой работы контактной тарелки зависит от плотности и скорости газовой фазы и определяется из выражения:

$$\rho_r W_r^2 = 900 - 1200, \quad \text{Н/м}^2 \quad (3)$$

Нижней границей устойчивой работы контактной ступени является переход от пульсационного режима в элементе к устойчивому турбулентному. Выявлено, что переход от одного режима ко второму зависит от плотности газа, угла наклона лопастей завихрите-

ля и соотношения нагрузок. Обработка опытных данных позволила получить эмпирическую зависимость для определения скорости перехода пульсационного режима к устойчивому турбулентному:

$$W_{r \text{ пер}} = 14,3 \rho_r^{-0,5} (\operatorname{tg} \alpha)^{0,2} \left(\frac{d}{\delta}\right)^{0,08}, \quad \text{м/сек} \quad (4)$$

Расход жидкости через контактный элемент обусловлен уровнем на тарелке, диаметром питательной трубки, а также разрежением, возникающим при движении газа в центре патрубка выше завихрителя в месте ввода жидкости. Проведенные исследования позволили получить уравнение расхода жидкости через контактный элемент:

$$V_w = \varphi \sqrt{2g} \left[H \cdot 0,543 \cdot 10^{-7} \frac{\rho_r W_r^2}{\operatorname{tg} \alpha (d^2 \sqrt{H})^{0,85}} \right]^{1/2}, \quad \text{м}^3/\text{сек} \quad (5)$$

Сопоставление опытных данных с расчетными по уравнению (5) показывает хорошее их совпадение. Среднее отклонение не превышает 6%.

При работе промышленного аппарата важное значение имеет равномерность распределения жидкости и газа по контактным элементам, которая зависит от точности изготовления элементов, их монтажа, горизонтальности установки тарелки в аппарате и т.д.

Исследование равномерности распределения фаз по контактными элементами в зависимости от точности изготовления элементов и угла наклона тарелки проводились на установке диаметром 1 м. При этом использовались тарелки, предназначенные для промышленных внедрений с 12-ю контактными патрубками диаметром 102,5 мм. Исследования проводились в диапазоне изменения скорости газа в контактных элементах от 1 до 30 м/сек. Опытами установлено, что отклонения расхода жидкости через каждый элемент от среднего значения не превышает 6%, причем с увеличением скорости газа эта неравномерность уменьшается.

Изучение влияния негоризонтальности монтажа тарелки проводились при скорости газа в патрубках $W_r = 25$ м/сек. Изменения расхода жидкости через элементы центрального ряда показывают, что при угле наклона тарелки 1^0 максимальное отклонение от среднего расхода не превышает 3%, при 2^0 - 6,5%, а при 3^0 отклонения достигают 10%. Однако при монтаже не составляет слес-

ности устанавливать тарелку с отклонением от горизонтали не более $1^{\circ} + 2^{\circ}$ и, таким образом, будет обеспечиваться достаточно равномерное распределение жидкости по элементам.

Исследование массообмена.

Изучение массообмена проводилось в 2 этапа.

На первом этапе исследовалась эффективность массообмена одного контактного элемента в зависимости от его геометрических размеров.

На втором этапе проводились исследования эффективности массообмена многоэлементной контактной тарелки на полупромышленной установке диаметром 500 мм.

Все исследования проводились при ректификации смеси уксусная кислота-вода при полном возврате шлеغمы.

Исследования эффективности массообмена контактного элемента проводились без рециркуляции жидкости, т.е. подвод жидкости в зону контакта осуществлялся питательной трубкой с выходящей тарелки.

Влияние скорости газовой фазы на эффективность контактного элемента при различной степени закрутки газового потока показано на рис.3. При устойчивом турбулентном режиме наблюдается высокая эффективность контактного элемента в широком диапазоне изменения скоростей пара. Только при скорости пара выше 30 м/сек начинается снижение эффективности, которое объясняется уменьшением времени контакта фаз и вторичным уносом жидкости. При малых скоростях газовой фазы (пульсационный режим) наблюдается унос и провал жидкости, поэтому эффективность контактной ступени низкая.

Влияние угла наклона лопастей завихрителя на эффективность контактной ступени при устойчивом режиме видно из рис.4. С уменьшением степени закрутки газового потока, т.е. с увеличением угла наклона лопастей завихрителя, эффективность контактного элемента уменьшается. Однако, если при изменении угла наклона лопастей завихрителя от 30° до 37° наблюдается незначительное уменьшение эффективности контактного элемента, то при дальнейшем увеличении угла до 45° снижение эффективности становится более заметным.

Исследование влияния длины контактного патрубка на эф-

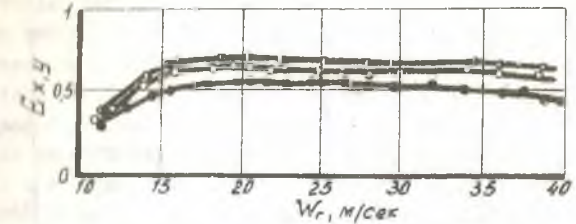


Рис.3. Влияние скорости пара в патрубке на его эффективность. $D_n = 72 \text{ мм}$, $l_n = 2,5 D_n$

● - $\alpha = 45^{\circ}$; ○ - $\alpha = 37,5^{\circ}$; ● - $\alpha = 30^{\circ}$.

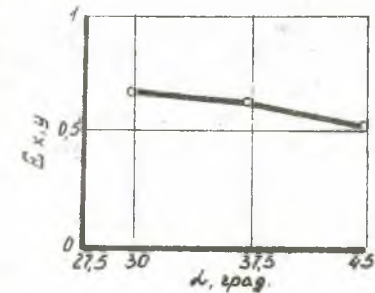


Рис.4. Влияние угла наклона лопастей завихрителя на эффективность элемента. $D_n = 72 \text{ мм}$, $l_n = 2,5 D_n$

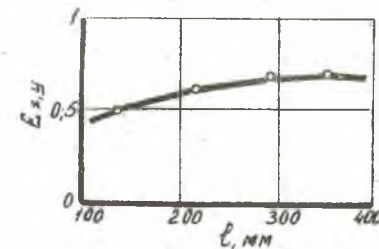


Рис.5. Влияние длины патрубка на его эффективность. $D_n = 72 \text{ мм}$, $\alpha = 37,5^{\circ}$.

Эффективность массообмена проводилась на патрубке диаметром 72 мм с углом наклона лопастей завихрителя $37 + 38^{\circ}$. Длина патрубка изменялась от $2 D_n$ до $5 D_n$. При длине контактного патрубка, равной $2 D_n$, капли жидкости, двигаясь от центра, достигали стенки почти у верхнего среза. Следовательно, основная доля массообмена в контактном элементе происходила при движении капель диспергированной жидкости от центра к стенке патрубка и при ударе капель о поверхность жидкостного кольца. При длине контактного патрубка более $2 D_n$ появляется дополнительная зона контакта фаз при совместном движении турбулизованной пленки жидкости и газа вверх. Из графика (рис.5) следует, что основной массообмен между жидкостью и газом происходит в нижней части контактного элемента. Длина контактного элемента мало влияет на эффективность. Следовательно, как было отмечено при исследовании брызгоуноса, длина контактного патрубка, равная $2,5 D_n$, является оптимальной.

Применение в промышленных аппаратах контактных патрубков больших диаметров является всегда желательным, так как упрощается изготовление и уменьшается вес массообменной тарелки. Эффективность контактного элемента в зависимости от диаметра патрубка показана на рис.6, откуда видно, что с увеличением диаметра патрубка эффективность контактного элемента несколько падает. Из графиков можно предположить, что при $D_n > 200$ мм эффективность элемента будет ниже 0,45.

По результатам исследований гидродинамических характеристик и эффективности массообмена контактного элемента можно сделать вывод, что оптимальными размерами контактного элемента для промышленных аппаратов являются:

диаметр патрубка - $D_n = 70 + 150$ мм;

высота патрубка - $L_n = 2 + 3 D_n$;

угол наклона лопастей завихрителя - $\alpha = 35 + 40^{\circ}$.

При этом эффективность контактного элемента будет в пределах $0,5 + 0,65$.

Исследование эффективности многоэлементной контактной ступени проводилось на тарелке с семью контактными элементами диаметром 102,5 мм каждый. На тарелке осуществлялась рециркуляция жидкости через контактные элементы. Соотношение расходов фаз через каждый контактный элемент изменялось в пределах - $\frac{G}{G} = 2,5 + 4$.

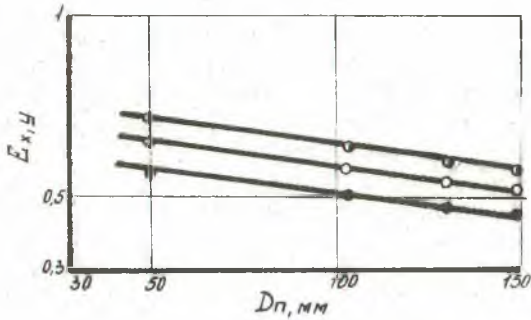


Рис.6. Влияние диаметра патрубка на его эффективность

$$l_n = 2,5 D_n$$

- - $\alpha = 30^\circ$; ○ - $\alpha = 37,5^\circ$; ● - $\alpha = 45^\circ$.

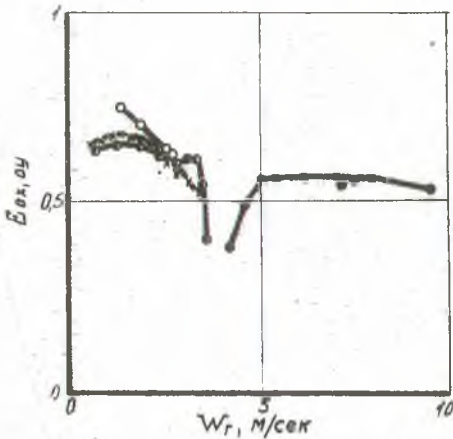


Рис.7. Влияние скорости пара на эффективность тарелок.

- - аппарат с ситчатыми тарелками (по данным Дж.Перри);
- - аппарат с колпачковыми тарелками (по данным Дж.Перри);
- × - аппарат с ситчатыми тарелками (наши исследования);
- - аппарат со скоростными прямоточно-центробежными тарелками.

На рис.7 приведен график зависимости эффективности многоэлементной контактной тарелки от скорости газовой фазы, отнесенной к полному сечению аппарата. Из графика видно, что при установленном режиме эффективность контактной тарелки достаточно высокая, $E_{0x} = E_{0y} = 0,57$, и остается почти постоянной в широком диапазоне изменения нагрузок по пару.

Промышленные внедрения тарелок с 16 + 20 контактными элементами показали, что их эффективность почти не отличается от эффективности одноэлементной тарелки.

На рис.7 приведены результаты исследований по эффективности ситчатой тарелки, полученные нами на этой же установке, и данные по эффективности ситчатой и колпачковой тарелки диаметром 500 мм, взятые из литературы. ("Справочник инженера-химика". Дл.Перри). Анализ кривых показывает, что эффективность колпачковой тарелки и тарелки с прямоточно-центробежными элементами одинаковая, эффективность ситчатых тарелок в небольшом диапазоне несколько выше. Однако, если ситчатая и колпачковая тарелки могут работать при скоростях пара, не превышающих 2,5 м/сек, то в аппарате со скоростными тарелками можно достичь скорости пара 10 м/сек. Таким образом, исследования массообмена показывают, что при одинаковой эффективности контактные тарелки с прямоточно-центробежными элементами позволяют повысить производительность колонн в 3 + 5 раз по сравнению с широко применяемыми в промышленности колпачковыми и ситчатыми тарелками.

Промышленные испытания и результаты внедрения.

Комплексные исследования контактных тарелок с прямоточно-центробежными элементами позволили перейти к стадии промышленных испытаний и внедрению их на Гродненском химкомбинате и других предприятиях азотной промышленности.

Одна из первых колонн с прямоточно-центробежными контактными тарелками изготовлена и внедрена в отделении ректификации производства капролактама. Колонна имеет 30 тарелок с контактными элементами диаметром 100 мм и предназначена для извлечения целево-

го продукта циклогексанола из спиртовой фракции, поступающей на сжигание в цех переработки отходов. Применение в данной колонне контактных тарелок с прямоточно-центробежными элементами позволяет при высокой эффективности массообмена достигать скорости пара по сечению колонны 5,25 м/сек ($w/vp = 9$). Внедрение колонны позволило снизить содержание циклогексанола в спиртовой фракции с 45% до 2 + 5%.

На ряде установок производства капролактама произведена замена низкопроизводительных ситчатых тарелок на контактные тарелки с прямоточно-центробежными элементами. Так на установке выпарки лактама произведена реконструкция 6 колонн диаметром 1 метр, в которых вместо восьми ситчатых тарелок установлено по пять тарелок с 16-ю контактными элементами на каждой тарелке. Реконструкция колонн позволила значительно увеличить производительность установки, а содержание лактама в дистилляте снизилось с 4% до следов. Скорость пара по сечению колонн увеличилась до 6 м/сек.

Произведена частичная замена ситчатых тарелок в укрепляющей части колонны отгонки циклогексана диаметром 3,4 м, где на тарелках установлено по 50 прямоточно-центробежных элементов диаметром 150 мм каждый. Реконструкция позволила улучшить работу колонны и снизить содержание продуктов окисления в дистилляте.

Полная замена ситчатых тарелок на контактные тарелки с прямоточно-центробежными элементами произведена в колонне дистилляции бензола, что позволило увеличить ее производительность по дистилляту с 8 м³/час до 21 м³/час. При этом качество очистки бензола улучшилось.

Проведены испытания и внедрены контактные тарелки в скруббере очистки выбросов газов цеха аммиачной селитры от газообразного аммиака и мельчайших капель раствора солей. Орошение контактных тарелок скруббера кислым конденсатом позволило исключить потери аммиака и уменьшить содержание селитры в выбросном газе в 10 раз.

Высокую эффективность показывают контактные тарелки с прямоточно-центробежными элементами при использовании их в качестве сепараторов для отделения капель жидкости из газового потока. Внедрение сепараторов в 4 колоннах дистилляции карбамида позволило снизить содержание пива в газах дистилляции с 6% до следов.

В качестве сепараторов контактные тарелки внедрены также в цехе аммиака в 4 колоннах моноэтаноламиновой и щелочной очистки конвертированного газа, что позволило снизить унос дорогостоящих абсорбентов с газовым потоком в 12 раз.

В диссертации приведены результаты обследований работы контактных тарелок с прямоточно-центробежными элементами в промышленных условиях, а также акты их внедрения.

Простота конструкции элементов тарелки и небольшие размеры позволяют осуществлять быстрое внедрение силами предприятий при небольших затратах на изготовление и монтаж.

В ы в о д ы

1. Проведенный обзор работ и анализ конструкций контактных устройств с взаимодействием фаз в закрученном потоке позволили определить основные направления для разработки новых более оптимальных конструкций.

2. Разработана новая конструкция контактной тарелки с прямоточно-центробежными элементами в двух вариантах: с рециркуляцией и без рециркуляции жидкости.

3. В результате исследований гидродинамики контактной тарелки получены расчетные уравнения для определения гидравлического сопротивления, расхода жидкости и диапазона устойчивой работы.

4. Установлена высокая эффективность сепарации в контактных элементах при широком диапазоне изменения нагрузок по жидкости и газу, это позволяет использовать их не только для массообмена, но и в качестве сепараторов.

5. Исследования по равномерности распределения фаз на многоэлементной тарелке показали, что точность изготовления элементов и монтажа тарелки не оказывают существенного влияния на расходы фаз по элементам.

6. Изучение массообмена в одиночных контактных элементах и на многоэлементной тарелке, а также сравнительные испытания типовых тарелок показало, что эффективность новой конструкции практически не отличается от типовых (ситчатые, колпачковые),

а производительность в 3 + 5 раз выше.

7. На основании исследований гидродинамики и массообмена определены оптимальные геометрические размеры контактных элементов и диапазоны нагрузок по фазам.

8. Разработанная методика расчета контактных тарелок с прямооточно-центробежными элементами позволила перейти к их промышленному внедрению на различных установках Гродненского химкомбината и других предприятиях химической промышленности.

9. Внедрение контактных тарелок обеспечивает различные эффекты: увеличение производительности аппарата, улучшение степени разделения компонентов, снижение потерь ценных продуктов, уменьшение загрязнения воздушного бассейна и сточных вод. Экономический эффект от внедрения только на Гродненском химкомбинате составил около 600 тыс.руб. в год.

Основные обозначения.

- G - весовой (массовый) расход жидкости, кг/с
- G - весовой (массовый) расход газа, кг/сек;
- α - угол наклона лопастей завихрителя, град.;
- $D_{\text{вн}}$ - внутренний диаметр патрубка, м;
- $L_{\text{п}}$ - длина патрубка, м;
- $\Delta P_{\text{сух}}$ - гидравлическое сопротивление сухой тарелки, н/м²;
- $\Delta P_{\text{пол}}$ - полное гидравлическое сопротивление тарелки, н/м²;
- $\rho_{\text{г}}$ - плотность газа (пара), кг/м³;
- $W_{\text{ср}}$ - средняя скорость газа в расчете на полное сечение контактного элемента, м/сек;
- k - коэффициент гидравлического сопротивления;
- $W_{\text{пер}}$ - средняя скорость газа в контактном элементе при переходе от пульсационного режима к турбулентному, м/сек;
- $V_{\text{ср}}$ - объемный расход жидкости через контактный элемент, м³/сек
- φ - коэффициент расхода;
- F - площадь сечения питательной трубки, м²;
- g - ускорение свободного падения, м/сек²;
- H - уровень жидкости на тарелке, м;
- d - внутренний диаметр питательной трубки, м;
- $E_{\text{ж}}, E_{\text{г}}$ - эффективность контактного элемента по жидкой и газовой фазе;
- $W_{\text{гк}}$ - скорость газа (пара) по сечению колонны, м/сек;
- $E_{\text{ж}}, E_{\text{г}}$ - эффективность тарелки по жидкой и газовой фазе.

Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих работах:

1. Э.И.Левданский, И.М.Плехов, В.А.Иванов, А.И.Ершов.
Исследование скоростной ректификации в аппаратах с прямоточно-центробежными контактными устройствами. В сб. "Ш Всесоюзная конференция по теории и практике ректификации", часть II, Северодонецк, 1973 г.
2. И.М.Плехов, Э.И.Левданский, А.И.Ершов, В.А.Иванов.
Применение скоростной ректификации для разделения ряда систем в производстве капролактама. В сб. "Ш Всесоюзная конференция по теории и практике ректификации", часть II, Северодонецк, 1973г.
3. Э.И.Левданский, А.И.Карпович, И.М.Плехов, А.И.Ершов.
Исследование причин уноса с реакционными газами продуктов окисления циклогексана и возможность их улавливания. "Азотная промышленность", вып. I. Реферат.сб. изд. НИИТЭХИМ, Москва, 1973г.
4. Э.И.Левданский, И.М.Плехов. Центробежный сепаратор для мокрой очистки газа. "Азотная промышленность", вып. 6. Реферат.сб. изд. НИИТЭХИМ, 1973 г.
5. А.И.Ершов, И.М.Плехов, Э.И.Левданский. Прямоточно-центробежный сепаратор элементного типа для тепло-массообменных установок. Сб. "Оборудование, его эксплуатация, ремонт и защита от коррозии в хим.пром.", вып. 3, НИИТЭХИМ, Москва, 1973 г.
6. И.М.Плехов, Э.И.Левданский, А.И.Карпович, И.И.Гавриленкова.
Прямоточно-центробежные сепараторы для комплексной очистки газов. Сб. "Охрана труда и техника безопасности, очистка сточных вод и отходящих газов в хим.пром.", вып. 8, НИИТЭХИМ, Москва, 1974 г.
7. Э.И.Левданский, З.В.Поддymiикова, А.И.Карпович.
Применение центробежных сепараторов в производстве синтетического аммиака. "Азотная промышленность", вып. 3. Реферат. сб. изд. НИИТЭХИМ, 1974 г.
8. Э.И.Левданский, И.М.Плехов, В.А.Иванов, А.И.Ершов.
Применение контактных тарелок с прямоточно-центробежными элементами для интенсификации массообменных процессов. "Азотная промышленность", вып. 6. Реферат. сб. изд. НИИТЭХИМ, Москва, 1974 г.

Содержание основных разделов диссертации
докладывалось и обсуждалось на:

1. III Всесоюзной конференции по теории и практике ректификации. Северодонецк, октябрь 1973 г.
2. Всесоюзном семинаре по обобщению опыта пуска и освоения производства капролактама. Гродно, ноябрь 1972 г.
3. Всесоюзном научно-техническом совещании по интенсификации технологических процессов и совершенствованию оборудования для массообмена, обезвоживания и грануляции минеральных удобрений. Сумы, март 1973 г.
4. Отчетных научно-технических конференциях Белорусского технологического института им. С.М.Кирова в апреле 1973 и 1974 г.

ЛТ 11562 Зак. 70. Тир. 140 экз. Объем 1 п.л. Подписано
к печати 7/2-75г. Стпечатано на ротапринте БТИ имени
С.М.Кирова, г. Минск, Свердлова 13.