

66
Б42

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С. М. КИРОВА

На правах рукописи

БЕКИБАЕВ Нурмаханбет Сейтмаханбетович

66.021.3

УДК 66.02.071.7

ГИДРОДИНАМИКА И МАССООБМЕН
В АППАРАТЕ С РЕГУЛЯРНОЙ ПОДВИЖНОЙ
ПЛАСТИНЧАТОЙ НАСАДКОЙ

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 — 1987



Работа выполнена в Казахском химико-технологическом институте.

Научные руководители:

доктор технических наук,
профессор **Балабеков О. С.**
кандидат технических наук,
доцент **Серманизов С. С.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
с. н. с. **Холпанов Л. П.**
кандидат технических наук,
доцент **Марков В. А.**

Ведущая организация:

Чимкентское ПО «Фосфор»

Защита диссертации состоится 1 декабря 1987 г. в 14 часов на заседании специализированного совета К 056.01.03 по присуждению ученой степени кандидата наук в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени технологическом институте имени С. М. Кирова. Адрес: 220630, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского ордена Трудового Красного Знамени технологического института имени С. М. Кирова.

Автореферат разослан « 24 » октября 1987 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
к. х. н., с. н. с.

ДЗЮБА Е. Д.

Актуальность проблемы. В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года подчеркнуто: "... усилить охрану атмосферного воздуха. В этих целях совершенствовать технологические процессы, оборудование и транспортные средства, улучшить качество сырья и топлива, внедрять высокоэффективные установки для очистки промышленных и других выбросов".

Причиной негативных влияний промышленных предприятий на состояние воздушного бассейна прежде всего является неудовлетворительная работа газоочистного оборудования вследствие низкой степени очистки и забиваемости конструктивных элементов (тарелок, насадок, распылителей жидкости и т.д.).

Этих недостатков лишены аппараты с подвижной насадкой (ПН), наиболее известными из которых являются аппараты со взвешенной и колеблющейся шаровой насадкой. Однако, сложность изготовления легких термо- и коррозионностойких шаров стала основной причиной отказа от дальнейшего продолжения исследований. В этом плане наиболее простым в изготовлении оказался аппарат с регулярной подвижной пластинчатой насадкой (РППН). Но отсутствие исследований и методов расчета этих массообменных и пылеулавливающих устройств препятствует их широкому промышленному использованию.

Работа выполнялась в соответствии с координационными планами научно-исследовательских работ АН СССР по направлению "Теоретические основы химической технологии" на 1981-1985г.г. (подраздел 2.27.2.621) и на 1986-1990 г.г. (подраздел 2.27.2.6.17), планом совместных работ Министерства по производству минеральных удобрений и вузов МВ и ССО Каз.ССР (раздел 2.14.45, подразделы 01±07) на 1981-1985 г.г. и межведомственным планом совместных научно-технических и поисковых работ, выполняемых организациями и предприятиями Минудобрений, институтами Академии наук и Минвуза Каз.ССР (раздел 1.14.45.06, подраздел Т.10) на 1986-1990 г.г., а также по тематическому плану НИР КазХТИ (№ 0182.1036960, 01840043113 и др.).

Целью работы явилось проведение теоретических и экспериментальных исследований гидродинамики и массообмена в слое регулярной подвижной насадки, создание на основе выявленных закономерностей высокоинтенсивного газоочистного аппарата с низким гидравлическим сопротивлением и научно обоснованной методики

расчета, а также внедрение в промышленность.

Научная новизна. Исходя из закономерностей взаимодействия вихрей, возникающих при обтекании последовательно и параллельно расположенных рядов пластин, выявлены условия интенсификации процессов массообмена. Предложен новый подход к определению фактора гидродинамического состояния двухфазной системы, основанный на модели изменения коэффициента сопротивления орошаемой насадки вследствие взаимодействия вихря со стекающей пленкой жидкости. На основании уравнения сохранения энергии для сплошного потока при его одномерном и установившемся течении получена зависимость для расчета капельной составляющей количества удерживаемой жидкости. Адекватность теоретических предпосылок по определению толщины пленки жидкости на пластине и среднего размера капель проверена с использованием метода "лазерного ножа". Для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе использован диссипативный подход, позволивший оценить глубину проникновения завихренности в сплошном потоке. С целью описания процесса массопередачи в слое регулярной пластинчатой насадки предложена ячеечная модель, учитывающая частичный обмен потоков между соседними ячейками.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Показана возможность регулирования эффективностью и гидравлическим сопротивлением аппарата на стадиях проектирования и пуско-наладочных работ изменением расстояния между пластинами. На основе анализа приведенных затрат выявлены оптимальные режимные и конструктивные параметры аппарата РППН, что позволило сформулировать рекомендации по проектированию промышленных конструкций. Разработан научно обоснованный и проверенный в производственных условиях метод расчета. На их основе разработаны исходные требования и техническое задание (ТЗ-3253-203-86) на разработку и освоение типоразмерного ряда скрубберов большой единичной производительности (разработчики - Запорожский филиал НИИОГАЗ, КазНИИГипрофосфор, КазХТИ). Результаты исследований и опытно-промышленных испытаний внедрены в производствах монокальцийфосфата и РК-удобрений Джамбулского ПО "Химпром" и сернистого натрия Актюбинского завода хромовых соединений. Эколого-экономический эффект только от снижения газовых выбросов производства монокальцийфосфата составил 243,588 тыс.руб.

Апробация работы. Результаты работы доложены на Всесоюзных конференциях: "Современные машины и аппараты химических производств" (Чимкент, 1977, 1980 г.г., Навои, 1983 г.), "Пути совершенствования, интенсификации и повышения надежности аппаратов в основной химии" (Сумы, 1980 и 1986 г.г.), "Химреактор - 8" (Чимкент, 1983 г.) и на республиканских конференциях "Использование отходов химической промышленности и создание безотходных технологических процессов" (Алма-Ата - Чимкент, 1980), "Внедрение научно-исследовательских и производственно-технических работ по химии и химической технологии" (Караганда, 1985 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Полный объем - 246 страниц, в том числе 48 рисунков, 4 таблиц, 139 страниц машинописного текста. Список литературы содержит 139 наименований. Приложения включают результаты экспериментальных исследований и документы, подтверждающие народнохозяйственное значение выполненной работы.

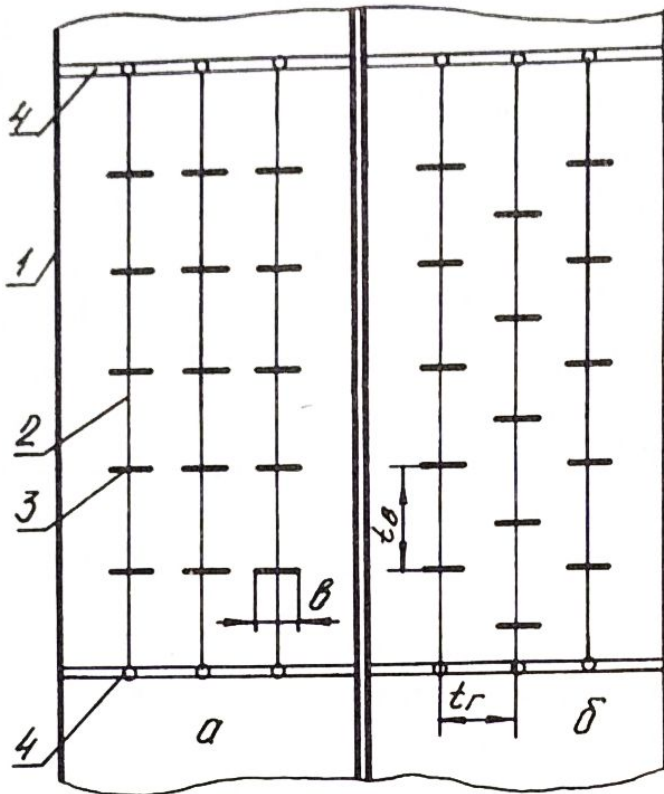
Содержание работы.

Во введении дано обоснование актуальности и сформулированы цель, научная новизна, практическая ценность и реализация работы.

В первой главе по литературным данным рассмотрены современные методы интенсификации процессов массообмена, проведен анализ основных разновидностей аппаратов с регулярной подвижной насадкой, результатов исследования их гидродинамических и массообменных характеристик. На их основании сформулированы задачи настоящей работы.

Во второй главе дано теоретическое описание взаимодействия фаз в противоточном аппарате с регулярной подвижной пластинчатой насадкой. В них пластины могут располагаться в один ряд, образуя гипотетическую тарелку, или в шахматном порядке (рис. I). Последнее расположение предпочтительно для проведения процессов массообмена, лимитируемых сопротивлением в газовой фазе, т.к. позволяет увеличить ее время пребывания и

Аппарат РПШН



а - расположение в ряд; б - шахматное расположение; 1 - корпус; 2 - струна; 3 - пластина; 4 - крепежная решетка.

Рис. 1.

не влияет на толщину пленки жидкости на пластине. Справедливость такого допущения подтверждается результатами экспериментальных исследований при скоростях газа до 7-8 м/с. Тогда, по аналогии с водосливами имеем:

$$\delta_{пл} = 0,5 \left(\frac{b \cdot W_{ж}}{\mu \sqrt{g}} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{\cos \alpha}{1 + \cos \alpha} \right)^{2/3} \quad (3)$$

где: $\mu = 0,32$ - коэффициент расхода, равный для водослива с широким порогом; α - угол наклона пластины.

Для расчета капельной составляющей КУЖ h_k , исходя из уравнения сохранения энергии газового потока при одномерном и установившемся течении его в элементарном объеме одной ячейки, получено уравнение:

$$h_k = \epsilon_n \frac{C_{0.н.}}{g \rho_{ж}} \cdot \frac{\rho_r W_r^2}{2} \cdot \frac{(2 - \epsilon_0)(1 - \epsilon_0^2)}{\epsilon_0^2} \quad (4)$$

снизить гидравлическое сопротивление по сравнению с первым.

Жидкость находится в слое насадки в виде пленки на поверхности пластин и капель. Предполагая равномерное распределение жидкости в объеме насадки, можно записать следующее уравнение для расчета количества удерживаемой жидкости (КУЖ):

$$k_0 = (k_{пл} + h_k) \frac{H}{t \delta} \quad (1)$$

Пленочная составляющая $k_{пл}$ определяется по следующей зависимости:

$$k_{пл} = \delta_{пл} b^2 / t_r^2 \quad (2)$$

Для определения толщины пленки $\delta_{пл}$ примем, что движение газового потока

Здесь: ϵ_0 - порозность ряда насадки, которая при расположении пластин по вершинам квадрата в горизонтальном сечении равна:

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{b}{t_r} \right)^2 \quad (5)$$

Исходя из закономерностей распада пленки жидкости на струйки и дробления последних газовым потоком на капли с учетом положений теории Колмогорова о локальной изотропной турбулентности, предложена зависимость для расчета среднего диаметра капель:

$$d_k = V_d \frac{\sigma^{0.9} \nu_{ж}^{0.3} \epsilon_0^{0.6}}{\theta_b^{0.4} \rho_{ж}^{0.2} \rho_r^{0.7} \nu_r^{0.2} g b^{0.3} \nu_{ж}^{0.3} \nu_r} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{\cos \alpha} \right)^{0.3} \quad (6)$$

Для определения коэффициента массоотдачи в газовой фазе, исходя из диссипативного подхода, получено:

$$\beta_{rV} = \left(\frac{3}{4} \right)^{1/4} C_{ш}^{1/4} \varphi^{1/2} \left(\frac{\theta_b}{\epsilon_0} \right)^{3/4} \frac{h_k^{1/4} W_r^{3/4}}{(t_b - h_{ml})^{1/4} t_b d_k^{1/4} \left(1 - \frac{h_k}{t_b} \right)} \frac{D_r^{1/2}}{\nu_r^{1/4}} \quad (7)$$

где: $C_{ш} = 0,4$ - коэффициент сопротивления капли шаровой формы; φ - коэффициент формы капли*.

При описании распределения концентрации газовой фазы по высоте контактной зоны аппарата РППН для абсорбции хорошо растворимых газов рассмотрена модель, состоящая из последующих чередующихся ячеек. Считая, что в зоне между насадками происходит идеальное смешение, а поток равномерно распределен для n - ячеек с учетом взаимодействия потоков между двумя соседними гирляндами насадки, записаны 2 n уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{2N h_r}{G} \frac{dy_i}{dt} &= y_{i-1} + z y_{i-1} - y_i (1+z) - \frac{2K_r}{G} H y_i \\ \frac{2N h_r}{G} \frac{dy_{i-1}}{dt} &= z y_i - y_{i-1} + y_{i-1} (1-z) - \frac{2K_r}{G} H y_{i-1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Здесь: H - высота контактной зоны аппарата, м; h_r - удерживающая способность по газу, кг/м³; G - удельный расход га-

* Балабеков О.С. Структурно-элементный подход к описанию процессов массообмена в колонных аппаратах. //Деп. в ВИНТИ, 1982, № 102.ХП-Д.82.

за, $\text{кг/м}^2\text{с}$; K_r - коэффициент массопередачи, $\text{кг/м}^3\text{с}$; Z - доля потока газа, поступающего из зоны с большей концентрацией.

Система уравнений решена при начальных условиях $t = 0$;

$$y_1 + y_n = y_0 ; y_{1b} + y_{nb} = y_0 .$$

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований гидродинамики аппаратов РППН.

Изучение гидродинамических и кинетических характеристик массообменного аппарата с регулярной подвижной пластинчатой насадкой проведены в лабораторных установках диаметром 200, 500 и 1000 мм, а также в колоннах прямоугольного сечения размерами 1500x150x150 мм и 1500x1500x150 мм.

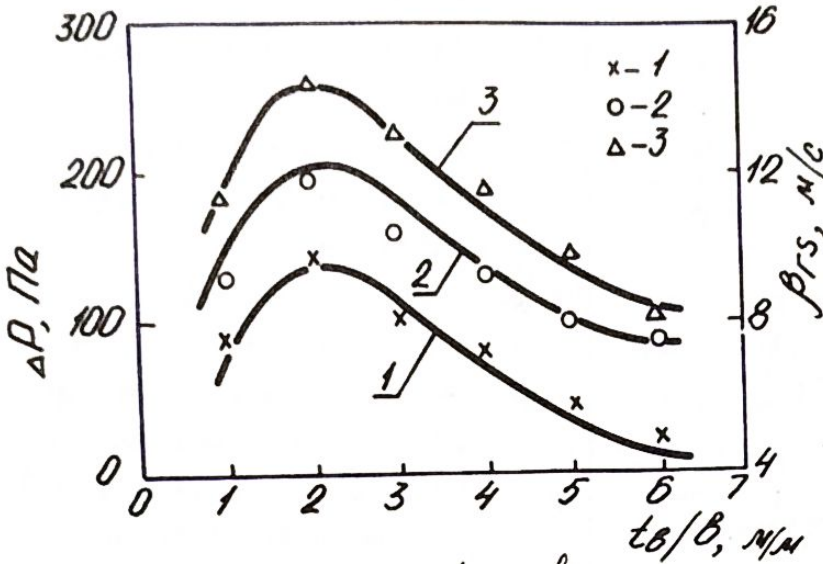
Исследования проведены в следующем диапазоне изменения режимных и конструктивных параметров: скорость газа $W_r = 1+6$ м/с, плотность орошения $\Delta = 0+100$ $\text{м}^3/\text{м}^2\text{ч}$, размеры насадки от 50x50x2 мм до 200x200x2 мм, шаг в вертикальном направлении $t_g = (1+6)b$, шаг в горизонтальном направлении $t_r = (1+3)b$.

Визуальными наблюдениями и фотографированием выявлено четыре гидродинамических режима взаимодействия фаз: пленочный, переходный, развитой турбулентности и интенсивного брызгоуноса. Из них наиболее предпочтительным для проведения процессов массообмена, лимитируемых сопротивлением в газовой фазе, является режим развитой турбулентности, характеризующийся высокими значениями количества удерживаемой аппаратом жидкости и развитой поверхностью контакта фаз.

Наличие опорно-распределительной решетки в аппаратах РППН вызывает значительный рост гидравлического сопротивления при незначительном увеличении равномерности потоков в поперечном сечении, что связано с высокой секционирующей ролью регулярной подвижной насадки. Это позволяет судить о рациональности использования безтарельчатого аппарата РППН для очистки газопылевых выбросов и абсорбции хорошо растворимых газов.

С увеличением рядов пластин в единице длины контактной зоны (при постоянном значении их количества в поперечном сечении) должно повышаться ΔP . Однако, такая зависимость наблюдается (рис.2) при снижении шага от $6b$ до $2b$ (b - ширина пластин), а при дальнейшем уменьшении эта тенденция нарушается - гидравлическое сопротивление резко падает. Такое и на первый взгляд anomальное явление объясняется только закономерностями образования, отрыва и движения вихрей. Из анализа литературных дан-

Зависимость гидравлического сопротивления и коэффициента массоотдачи в газовой фазе от безразмерного вертикального шага между насадочными телами.



Пластина 100x100x2 мм. $t_r = 1b$;
 $S_0 = 1 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $W_r = 4 \text{ м/с}$; 1 - β_{rs} ;
 3 - ΔP - при $\Delta = 25 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$; 2 - ΔP_c

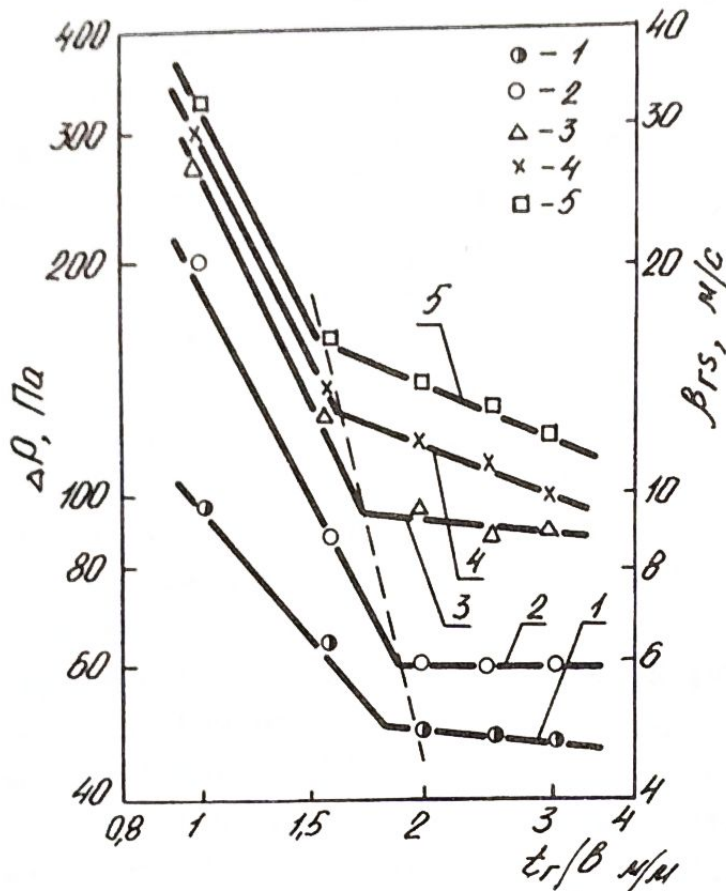
Рис. 2.

ных следует, что устойчивое движение вихревых цепочек должно соблюдаться при условии расположения пластин на расстоянии $t\delta = 2b$. В этом случае образование и срыв вихрей с каждой грани пластин происходит поочередно, но одновременно, что способствует максимальному вихреобразованию. При увеличении расстояния $t\delta > 2b$ создаются ус-

ловия для расширения вихревого следа больше ширины последующего обтекаемого тела, что препятствует воспроизводимости вихрей, образованных за предыдущей пластиной и снижению гидравлического сопротивления. Все это является причиной появления пика давления при $t\delta = 2b$, когда происходит максимальное наложение энергии вихрей в исследованном диапазоне изменения расхода жидкости и скорости газа.

С увеличением t_r от $1b$ до $1,9b$ для сухой насадки (рис. 3, кривая 2) гидравлическое сопротивление резко падает, а при дальнейшем повышении горизонтального шага его величина практически не изменяется. Таким образом, если $t_r > t_{r,кр} = \sim 1,9b$, то отсутствует взаимное влияние вихревых дорожек, образованных за пластинами на соседних струнах. При $t_r < t_{r,кр}$ возникает их стесненное движение. Причем, вихри соседних в поперечном сечении пластин имеют противоположное направление, что безусловно приведет к дополнительной затрате энергии. С ростом Δ величина критического значения горизонтального шага смещается в сто-

Зависимость гидравлического сопротивления и коэффициента массоотдачи в газовой фазе от безразмерного вертикального шага между струнами.



Пластина 100x100x2 мм; $t_b = 2b$;
 $S_0 = 1 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $W_r = 4 \text{ м/с}$. 1 - β_{rs}
 при $\Delta = 25 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$; 2 - ΔP_c ;
 3, 4, 5 - ΔP при $\Delta = 25, 50, 75 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$,
 соответственно.

Рис. 3.

необходимости соответствующей корректировки уравнения (4).

В соответствии с принятой моделью РПН рассматривали как контактную зону, состоящую из отдельных рядов (ячеек). Следовательно, каждую ступень можно представить как гипотетическую тарелку со свободным сечением ϵ_0 . Тогда, для расчета гидравлического сопротивления сухого аппарата РПН, имеем следующую зависимость:

$$\Delta P_c = \zeta \theta_b \frac{\rho_r W_r^2}{2\epsilon_0^2} \cdot \frac{H}{t_b}, \quad (9)$$

рону низких значений и при $\Delta = 75 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ $t_{r,кр} \approx 1,5b$. Таким образом, выявлено критическое значение расстояния между струнами, разграничивающее интенсивную и неинтенсивную области взаимодействия вихревых потоков в поперечном сечении. Его значение в зависимости от плотности орошения составляет $t_{r,кр} = (1,9+1,5)b$.

Аналогичные закономерности наблюдали при анализе зависимости количества удерживаемой жидкости от t_b и t_r .

Выявлено, что чем крупнее пластины, тем выше их сопротивление и количество удерживаемой жидкости. Также обнаружено существование зависимости коэффициента $C_{0,н}$ от размера пластин, что свидетельствует о необходимости

где $\zeta = 1,1$ - коэффициент сопротивления прямоугольной плоской пластины.

Параметр, учитывающий влияние расположения элементов насадки на струне, определим по выражению:

$$\theta_6 = \frac{2bt_6}{4b^2 - 2bt_6 + t_6^2} \quad (10)$$

Толщина пленки на элементах РППН практически не должна отличаться на величине $\Delta\rho$. Значит, разница $\Delta\rho - \Delta\rho_c$ затрачивается на изменение свободного сечения ξ_0 между пластинами одного горизонтального ряда за счет стекания в это пространство жидкости, что приведет к изменению коэффициента сопротивления. Для определения этого параметра, исходя из предложенной модели взаимодействия вихрей с пленкой жидкости, стекающей с кромки пластины, получено:

$$C_{г.ж} = \left(1 + \frac{\bar{U}_{кр} \cdot \xi_0}{Sl \cdot W_r}\right)^2, \quad (11)$$

где: Sl - число Струхала, равное для пластин 0,15; $\bar{U}_{кр}$ - средняя скорость течения пленки по кромке пластины, которая определена из равенства расходов жидкости, поступающей на пластину и стекающей с ее кромки:

$$\bar{U}_{кр} = 0,44 \frac{b^{2/3} U_{ж}^{2/3} g^{1/3}}{v_{ж}^{1/3}} \left(\frac{\cos\alpha}{1 + \cos\alpha}\right)^{2/3} \quad (12)$$

Обработкой опытных данных получено:

$$\Delta\rho = \Delta\rho_c (1 + f) \quad (13)$$

где $f = 0,14 \cdot C_{г.ж}$ - фактор гидродинамического состояния двухфазной системы.

Максимальная погрешность определения $\Delta\rho$ по этой зависимости не превышала $\pm 15\%$.

Опытные значения толщины пленки на пластине, замеренные методом "лазерного ножа", отличались от расчетных по уравнению (3) незначительно (в пределах от 20 до $-8,5\%$). Обработка опытных данных КУЖ дала значение $\beta_2 = 4,1$ в уравнении (4) при следующем значении коэффициента сопротивления орошаемой насадки

$C_{о.н} = \zeta \cdot \theta_6 \cdot f$. Погрешность определения КУЖ по уравнению (1) не превышает $14,5\%$.

В четвертой главе приведены описания методик исследований

массообменных характеристик аппарата РППН, размеров капель, образующихся в слое насадки, анализ и обобщение полученных результатов. Для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, отнесенных к поперечному сечению β_{rS} и объему β_{rV} насадочной зоны, был использован широко применяемый метод, основанный на адиабатическом испарении воды в воздушный поток. Адекватность модели изменения концентрации газовой фазы по высоте насадки проверяли на примере абсорбции H_2 водой.

В режиме развитой турбулентности были достигнуты высокие значения поверхности капель α_k , рассчитанной по измерениям размерам капель, и коэффициентов массоотдачи. Так, β_{rV} , α_k и ΔP аппарата РППН без решетки ($S_0 = 1 \text{ м}^2/\text{м}^2$) возрастают соответственно в 2,53, 3,7 и 2,5 раза при росте скорости газа от 3 до 5 м/с. Таким образом получается, что энергия газового потока почти полностью затрачивается на интенсификацию процесса массообмена, что свидетельствует о высоком к.п.д. исследуемого устройства. Это объясняется не только вихревым взаимодействием фаз, но и особенностью конструкции насадки, позволяющей многократно собирать капли на пластинках, а затем распылять пленку жидкости сперва на струйки, потом на капли. Причем, достижению такого процесса способствует и энергия падающей жидкостной пленки и струйки. Кроме того, обеспечиваются условия постоянного взаимодействия (коагуляции, дробления) капель и самопроизвольного изменения их формы из-за внутренней турбулентности. Этими факторами объясняется значительное приращение α_k по сравнению с гидравлическим сопротивлением. Повышение плотности орошения приводит к незначительному росту коэффициента массоотдачи в газовой фазе.

Наличие решетки ($S_0 = 0,45 \text{ м}^2/\text{м}^2$) привело к росту β_{rV} и ΔP соответственно в 1,15 и 1,4 раза по сравнению с $S_0 = 1 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Это подтверждает мнение о целесообразности использования для осуществления процессов массообмена, лимитируемых сопротивлением в газовой фазе, аппаратов РППН без распределительной решетки. Кривые зависимости β_{rS} от t_g (рис.2), как и ΔP от t_g , имеют пик при $t_g \approx 2b$, что свидетельствует о значительном влиянии устойчивости вихревого следа и на массообмен.

Зависимости β_{rV} и ΔP от горизонтального шага (рис.3) также аналогичны. Имеются критические значения горизонтального шага,

разграничивающие области интенсивного ($t_r < t_{r,кр}$) и неинтенсивного ($t_r > t_{r,кр}$) взаимодействия вихревых потоков в поперечном сечении контактной зоны.

При увеличении размера пластин от 50x50 до 200x200 мм β_{rs} возрастает 1,1 раза, а β_{rv} падает 2 раза. Действительно, чем мельче элементы насадки, тем меньше высота контактной зоны и тем равномернее распределены вихревые потоки в рабочем объеме аппарата. Однако, здесь на технико-экономических показателях аппарата РППН должна сказаться стоимость изготовления и монтажа насадки.

Обобщение экспериментальных данных по коэффициентам массоотдачи в газовой фазе проведено по уравнению (7), в котором можно пренебречь значением пленочной составляющей КУЖ ($h_{пл}$). В результате получено:

$$\beta_{rs} = 1,6 B^{1/4} \left(\frac{h_k W_r}{t_b^2 \cdot d_k} \right)^{1/4} \cdot \frac{H}{1 - \frac{h_k}{t_b}} \cdot \frac{D_r^{1/2}}{\nu_r^{1/4}}; \quad (14)$$

$$B = \frac{\varphi}{1 - \varphi} C_{ш} \cdot \varphi^2 \left(\frac{\theta_b}{\varepsilon_0} \right)^3, \quad (15)$$

где φ – газосодержание слоя, рассчитываемое исходя из объема насадки и количества удерживаемой жидкости.

Статистическая обработка фотоснимков, полученных методом "лазерного ножа", дала значение коэффициента $\beta_{rs} = 0,7$ в уравнении (6). Максимальная погрешность по определению β_{rs} по уравнению (14) не превышала 16%.

Задачей математической модели распределения концентрации абсорбируемого компонента в газовой фазе является нахождение высоты РППН, обеспечивающей требуемую конечную концентрацию газа или степень очистки. Для определения K_{rv} (K_{rs}) были поставлены эксперименты по абсорбции фтористого водорода водой. Расчеты по уравнению (8) показали хорошее совпадение их результатов с опытными данными.

В пятой главе представлены результаты промышленных испытаний аппаратов РППН в производствах монокальцийфосфата и РК-удобрений Дзямбулского ПО "Химпром", сернистого натрия Актюбинского завода хромовых соединений, которые подтвердили их высокую интенсивность и эффективность (91-98%) при низком гидравлическом сопротивлении (600-800 Па). Внедрение аппаратов в вышеуказанные производства позволило снизить концентрации вредных

примесей до ПДВ. Эколого-экономический эффект только по производству монокальцийфосфата составил 243,588 тыс.руб. в год.

На основе анализа приведенных затрат проведены сравнительная технико-экономическая оценка аппарата РППН и других распространённых типов абсорберов, которая показала экономическую целесообразность применения аппаратов РППН. Разработана методика и составлены практические рекомендации по проектированию.

Основные выводы и результаты работы.

1. На основании анализа закономерностей образования, отрыва и движения вихрей и возникающих при этом сил, обоснована возможность интенсификации взаимодействия фаз в слое регулярной подвижной пластинчатой насадки и создания на ее основе высокоэффективного массообменного аппарата с низким гидравлическим сопротивлением.

2. Выявлены четыре характерных гидродинамических режима диспергирования жидкости в зависимости от скорости газового потока и показана предпочтительность режима развитой турбулентности для осуществления процессов массообмена, лимитируемых сопротивлением в газовой фазе.

3. Исходя из условия устойчивости вихревого движения выявлено, что при отношении расстояния между пластинами к их ширине, равном двум, достигается максимальная интенсивность массообменного процесса, определены области интенсивного и неинтенсивного взаимодействия вихрей в поперечном сечении;

4. С учетом закономерностей движения вихревого потока предложено уравнение для расчета гидравлического сопротивления и количества удерживаемой жидкости;

5. Рассмотрен механизм последовательного дробления пленки жидкости вихревым потоком сперва на струйки, а потом на капли и на его основе получена зависимость среднего размера капель от физических, режимных и конструктивных факторов;

6. Исходя из диссипативного подхода предложено уравнение для расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе;

7. На основе рассмотрения регулярной подвижной пластинчатой насадки в виде последовательных и параллельных соединений ячеек разработана математическая модель распределения концентрации компонента газовой фазы по высоте рабочей зоны, адекватность которой проверена на примере абсорбции фтористого водорода-

да водой;

8. По результатам исследований и промышленных испытаний разработана методика расчета аппарата РППН, которая использована при:

- проектировании и реконструкции газоочистных систем производств монокальцийфосфата и РК-удобрений Джамбулского ПО "Химпром", сернистого натрия Актюбинского завода хромовых соединений. Эколого-экономический эффект от внедрения аппарата только в производстве монокальцийфосфата составил 243,588 тыс.руб.;
- разработке проекта установки газоочистки производства суперфосфата Актюбинского химического завода;
- выдаче исходных данных Запорожскому филиалу НИИОГАЗа и КазНИИ-ГИПРОФосфору для создания нормализованного типоразмерного ряда скрубберов большой единичной производительности.

Основные обозначения.

B - коэффициент; b - ширина насадочного тела, м; D - коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; H - высота аппарата, насадочной зоны, м; Δ - плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2\text{ч}$; S_0 - сечение решетки, $\text{м}^2/\text{м}^2$; - шаги размещения регулярной подвижной насадки, м; U - истинная (локальная) скорость, м/с; W - скорость, приведенная к полному сечению аппарата, м/с; ν - коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ - плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; γ - концентрация компонента в газовой фазе, $\text{кг}/\text{м}^3$; σ - поверхностное натяжение, н/м.

Индексы: ν - вертикальный; γ - газовая фаза; горизонтальный, н.з. - насадочная зона; о.н. - орошаемая насадка; пл. - пленка; пл. - пластина.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Бекибаев Н.С., Серманизов С.С. Опытные-промышленные испытания аппарата со взвешенной шаровой насадкой в процессе очистки газов при термическом обезвреживании коттрельного молока. //Тез. докл. Республ. научно-технич. совещания "Использование отходов хим. промышленности и создание безотходных технологических процессов". Алма-Ата - Чимкент, 1980, С.4.
2. Сабырханов Д., Петин В.Ф., Серманизов С.С., Бекибаев Н.С. Особенности гидродинамики аппаратов с колеблющейся насадкой. //Современные аппараты для обработки гетерогенных сред. Л., 1980. С.71.

3. Ершин Ш.А., Балабеков О.С., Сабырханов Д., Бекибаев Н.С. Исследование динамической высоты газожидкостного слоя в аппарате с регулярно-подвижной насадкой. //Химические реакторы. Чимкент, 1983. Т.Ш. С.311.
4. Жапбасбаев У., Бекибаев Н.С., Халтаев А. и др. Газосодержание двухфазного слоя в аппарате с регулярно-подвижной насадкой. //Там же, С.335.
5. Бекибаев Н.С., Атабаев М.Д., Алексеенко В.И. Очистка газов от фтористых соединений в абсорбере с регулярно-подвижной пластинчатой насадкой. //Тез. докл. Всес. науч. конф. "Современные машины и аппараты хим. производств". Ташкент, 1983. Ч.УП. С.27.
6. Мустафина А.И., Серманизов С.С., Поникаров, Бекибаев Н.С. Особенности гидродинамики в аппарате с регулярно-подвижной насадкой при больших нагрузках по жидкости. //Там же, С.75.
7. Бекибаев Н.С., Балабеков О.С., Сабырханов Д. и др. Аппарат с регулярно-подвижной пластинчатой насадкой для очистки газопылевых выбросов. //Информ. листок ЮжКазЦНТИ, 1984, № 84-4.
8. Бекибаев Н.С., Сабырханов Д., Аширбаев Х. и др. Результаты ведомственных испытаний аппарата с регулярно-подвижной насадкой в производстве монокальцийфосфата. //Тез. докл. научно-практич. конф. "Внедрение научно-исслед. работ по химии и хим. технологии". Караганда, 1985. С.125.
9. Бекибаев Н.С., Балабеков О.С., Балтабаев Л.Ш. К определению поверхности контакта фаз и коэффициента массоотдачи в газовой фазе в аппарате с регулярно-подвижной пластинчатой насадкой. //Тез. докл. Всес. научно-техн. совещ. "Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии". Сумы, 1986. Секция 2. С.96.
10. Бекибаев Н.С., Серманизов С.С., Мустафина А.И. Энергетический подход к определению количества удерживаемой жидкости в аппарате с регулярной подвижной пластинчатой насадкой. //Там же, Секция 6. С.194.
11. Бекибаев Н.С., Серманизов С.С., Ескендиоров Ш.З. и др. Расчет гидравлического сопротивления аппарата с регулярной подвижной пластинчатой насадкой. //Там же, Секция 6. С.198.
12. Балабеков О.С., Сарбасов А.С., Бекибаев Н.С. Расчет структурных характеристик аппаратов с подвижной насадкой. //Современные аппараты для обработки гетерогенных сред. Л., 1986. С.48.