

66
171

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

На правах рукописи

ГОРЮНОВ Константин Евдокимович

УДК 66.096.5

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
В ОРГАНИЗОВАННОМ ПСЕВДООЖИЖЕННОМ
СЛОЕ И МЕТОД РАСЧЕТА АДСОРБЕРА**

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**

М и н с к 1 9 8 4

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени
Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова АН БССР.

Научный руководитель - Заслуженный деятель науки и техники
БССР, член-корреспондент АН БССР,
профессор С.С. Забродский.

Научный консультант - старший научный сотрудник, кандидат
технических наук
А.И. Тамарин.

Официальные оппоненты-доктор технических наук, профессор
В.А. Астахов,
доцент, кандидат технических наук
А.Г. Цубанов.

Ведущая организация - Научно-исследовательский институт
промышленной и санитарной очистки
газа (Москва).

Защита состоится 5 февраля 1985 г. в 14 часов на за-
седании специализированного совета К-056.01.03 в Белорусском
ордена Трудового Красного Знамени технологическом институте
им. С.М. Кирова (220630, Минск, ул. Свердлова, 13а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БТИ им.
С.М. Кирова.

Автореферат разослан 14 декабря 1984 г.

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

Е.Д. Дяба

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность тем. Процессы очистки газов и разделения газовых смесей с помощью твердых адсорбентов широко используются в различных отраслях промышленности и, в частности, в газовой промышленности для очистки и осушки природного газа, в производстве полимеров для выделения целевого продукта, в производстве искусственных волокон для очистки воздуха от вредных выбросов, для приготовления защитных атмосфер при термобработке изделий в машиностроении и т. д.

В этих производствах используются преимущественно адсорберы с неподвижным слоем адсорбента периодического действия. Такие аппараты уже не могут удовлетворить потребности промышленности, которой необходимы адсорбционные установки непрерывного действия, экономно расходующие энергию и имеющие большую единичную мощность. В частности, большая потребность в адсорберах непрерывного действия возникла в машиностроении, где требуется строгое поддержание во времени стабильного состава защитной газовой среды.

Аппараты с организованным псевдоожиженным слоем (ОПС) представляются перспективными для реализации непрерывных процессов адсорбции твердыми дисперсными материалами. Подобные аппараты находят применение при проведении гетерогенных каталитических реакций в газовой фазе.

Для создания адсорберов с ОПС и их оптимизации необходимо построить расчетные модели протекания процесса адсорбции в ОПС и подобрать конструктивные параметры неподвижных насадок, обеспечивающие эффективную работу аппарата.

Цель работы. Выяснить влияние гидродинамических режимов, параметров неподвижной насадки, характеристик дисперсного материала на процессы перемешивания твердой фазы и межфазный обмен в организованный псевдоожиженной системе. Построить расчетную модель адсорбера, используя полученную информацию о процессах переноса в ОПС.

Дать рекомендации по проектированию и наладке адсорбера с ОПС (генератора защитной атмосферы).

Научная новизна. Разработана модифицированный методика измерения коэффициента перемешивания твердой фазы ОПС. Разработана новая методика измерения коэффициента межфазного массообмена. Впервые получены экспериментальные данные о перемешивания твердой фа-

7242ap

зы в псевдооживленном слое со среднеобъемными насадками, которые представляются перспективными для проведения процессов адсорбции; получена корреляция для расчета коэффициента продольного перемешивания твердой фазы в ОПС со среднеобъемными насадками; экспериментально выявлены закономерности межфазного массообмена в псевдооживленном слое с мало- и среднеобъемными насадками. Предложен метод расчета адсорбера с ОПС на основе модели двух взаимопроницающих континуумов (газа и твердых частиц) и полученных корреляций по перемешиванию и массообмену.

Практическая ценность. Данные по продольному перемешиванию твердой фазы и метод расчета адсорбера с ОПС были использованы Минским конструкторско-технологическим экспериментальным институтом автомобильной промышленности (МКТЭИавтопром) при разработке генератора очищенной экзотермической атмосферы ОТ-66.

Полученные сведения по гидродинамике и межфазному массообмену в ОПС могут быть полезны при разработке других типов реакторов с ОПС для проведения адсорбционных или каталитических процессов.

Автор защищает:

1. Адсорбционные методики измерения коэффициентов продольного перемешивания твердой фазы и межфазного массообмена в ОПС.

2. Результаты экспериментального исследования:

- перемешивания твердой фазы в псевдооживленном слое со среднеобъемными насадками, включая конструкции насадок, перспективные для проведения процессов адсорбции, и влияния на перемешивание масштаба аппарата и гидродинамических режимов;
- межфазного массообмена в ОПС с мало- и среднеобъемными насадками и влияния на массообмен масштаба аппарата и гидродинамических режимов;

3. Метод расчета адсорбера с ОПС.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на всесоюзных научно-технических совещаниях "Применение адсорбционных процессов для защиты окружающей среды от загрязнений" (БТИ им.С.М.Кирова, Минск, 1978 г.) и "Пути совершенствования, интенсификации и повышения надежности аппаратов в основной химии" (Сумский филиал Харьковского политехнического института, Сумы, 1980 г.)

Публикации. По материалам диссертации опубликовано семь печатных работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Объем работы - 79 стр. основного текста, 25 рисунков, 79 стр. приложений. Библиография содержит 86 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу современного состояния экспериментального исследования расширения, перемешивания и межфазного массообмена в ОПС.

1) Для расчета высоты адсорбера с ОПС необходимо знать расширение псевдооживленного слоя с насадкой. Насадки по занимаемому ими объему можно разделить на две группы: малобъемные, занимающие до 10 % объема ОПС, и среднеемкие, занимающие более 10 % объема псевдооживленной системы.

Имеющиеся данные по расширению ОПС относятся к малобъемным насадкам в виде засыпок из проволочных и сетчатых цилиндров и к среднеемким насадкам из шаров и колец Рашига. Для этих типов насадок имеются обобщающие корреляции.

В литературе отсутствуют данные по расширению для перспективных типов среднеемких насадок (кольца со щелями, керамическая насадка), представляющих интерес для проведения процессов адсорбции.

2) Важной характеристикой ОПС, определяющей эффективность работы адсорбера, является коэффициент продольного перемешивания (эффективной диффузии) твердой фазы. Перемешивание в псевдооживленном слое с малобъемными насадками хорошо изучено. Имеются расчетные корреляции, которые показывают, что в ОПС интенсивность перемешивания сильно уменьшается по сравнению со свободным псевдооживленным слоем.

Значительного снижения перемешивания можно добиться с помощью среднеемких насадок за счет их более развитой поверхности, способствующей торможению псевдооживленных частиц. Перемешивание в псевдооживленном слое со среднеемкими насадками изучено слабо. Имеется корреляция Като для ОПС с шаровой насадкой. Эта корреляция носит ограниченный характер и в литературе нет данных для новых перспективных типов насадок, появившихся в последние годы.

3) Для изучения перемешивания твердой фазы ОПС получили распространение стационарная тепловая методика и нестационарная

методика меченых частиц. Недостатком первой методики является длительность выхода псевдооживленной системы на стационарный тепловой режим, недостатком второй — трудоемкость измерения концентрации меченых частиц, что ограничивает возможности исследования.

4) Другой важной характеристикой ОПС является коэффициент межфазного массообмена между газом и частицами. Опытные данные по массообмену в ОПС получены косвенно методиками модельной химической реакции или газа-трассера. В соответствии с этими методиками экспериментальные выходные концентрации обрабатываются с использованием заранее принятых приближенных моделей. Эти методики отличаются сложностью, трудоемкостью и невысокой точностью.

5) В литературе имеются отрывочные данные по межфазному массообмену в ОПС с мало- и среднеобъемными насадками. До сих пор основные закономерности межфазного обмена в ОПС не ясны, что затрудняет построение расчетных моделей процессов адсорбции.

6) В имеющихся методах расчета адсорберов с ОПС не учитывается перемешивание твердой фазы, характерное для кипящего слоя, либо они основаны на использовании ячеечной модели, неудобной для практического применения при малом числе ячеек.

На основе обзора литературных данных сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе описаны экспериментальная установка и методики измерения коэффициентов перемешивания твердой фазы и межфазного массообмена в ОПС.

Главной частью экспериментальной установки являются две сменные колонны диаметром 15 и 30 см, снабженные системой газосторонних трубок.

Методики измерения основаны на использовании процесса адсорбции. В качестве адсорбируемого компонента была выбрана влага из воздуха. Влажность измерялась кулонометрическими гигрометрами. Принцип действия таких гигрометров основан на электролитическом разложении влаги. Погрешность гигрометров составляла 3 %.

Для определения коэффициента перемешивания разработана нестационарная методика меченых адсорбированной влагой частиц. В колонну с насадкой на половину высоты слоя засыпался увлажненный адсорбент (силикагель), затем такое же количество сухого материала. Включалась подача сжижающего воздуха на короткое время, меньшее времени полного перемешивания слоя. После прекращения подачи воздуха измерялись концентрации влаги в различных точках

по высоте осевшего слоя равновесным гигротермическим методом. Коэффициент продольного перемешивания определялся путем подбора такого решения уравнения нестационарной диффузии с начальным ступенчатым распределением концентраций влаги, соответствующим условиям опытов, которое обеспечивает минимальное отклонение расчетных концентраций от экспериментальных значений. Погрешность описанной методики измерения коэффициента перемешивания составляет 12 %.

Для измерения коэффициента межфазного массообмена была разработана адсорбционная методика, основанная на использовании макропористых адсорбентов (керамзит, шамот). Диффузионное сопротивление в порах таких адсорбентов мало и процесс переноса определяется диффузией компонента из потока сжигающего газа к внешней поверхности взвешенных частиц.

Порция сухого адсорбента засыпалась в колонну с насадкой. Включалась подача псевдооживающего влажного воздуха и отбирались пробы газа одновременно из ряда точек по высоте ОПС. Затем прекращалась подача воздуха и из межэрозных каналов осевшего слоя отбирались пробы воздуха на различных уровнях вдоль оси колонны. Гигрометрами измерялись концентрации влаги в пробах и по ним строились профили концентраций в газовой фазе и равновесных концентраций у поверхности псевдооживленных частиц ОПС. По эти профилям рассчитывался эффективный коэффициент межфазного массообмена, основанный на реальной движущей силе процесса, по формуле

$$\beta = \frac{u(c_{вх} - c_{вых})}{\int_0^H (c - c_p) dh}$$

Погрешность измерения коэффициента массообмена составляет 17 % и определяется ошибкой измерения движущей силы.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию расширения и продольного перемешивания твердой фазы в псевдооживленном слое со среднесъемными насадками. В начале главы изложены результаты исследования влияния среднесъемных насадок на расширение кипящего слоя.

Характеристики исследованных насадок приведены в табл. I.

Таблица I
Геометрические характеристики насадок

Тип насадки	D_H см	H_H см	ϵ_H	ρ_H см
Среднеобъемные насадки				
1. Шары	1,3	-	0,43	0,15
2. Шары	3,8	-	0,48	0,61
3. Кольца Рашига	2,5	2,5	0,67	0,38
4. Кольца со щельми	2,2	2,3	0,68	0,29
5. Керамическая насадка	3,0	3,0	0,70	0,50
Малообъемные насадки				
6. Спирали	1,2	1,5	0,92	0,35
7. Спирали	2,7	2,4	0,95	0,5

Опыты проводились в колоннах двух диаметров 15 и 30 см. Псевдооживались как пористые (керамзит, силикагель), так и непористые (песок, корунд, стекло) материалы. Кроме того, при обобщении были использованы данные Баскакова, Габора, Като, Забродского С.С. с сотр.

В результате обработки экспериментального материала на ЭВМ по программе многомерного регрессионного анализа получено следующее обобщающее уравнение

$$\frac{H}{H_0} - 1 = Re \, Az^{-0,6} \left(\frac{\rho_T}{\rho} \right)^{0,21}, \quad (I)$$

где $Re = \left(\frac{u}{\epsilon_H} - u_0 \right) \frac{d}{\nu}$.

Из зависимости (I) следует, что расширение псевдооживленного слоя, заторможенного среднеобъемными насадками, не зависит от гидравлического радиуса насадки.

Формула (I) справедлива при $0,2 \leq Re \leq 80$, $60 \leq Az \leq 2,6 \cdot 10^4$, $760 \leq \rho_T / \rho \leq 2,8 \cdot 10^4$, $0,016 \leq d / \rho_H \leq 0,56$. Среднее относительное отклонение опытных точек от аппроксимации составило 25 %.

Затем в главе 3 изложены результаты исследования перемещения твердой фазы в псевдооживленном слое со среднеобъем-

ными насадками. Псевдооживению подвергались силикагели трех фракций различной плотности. Кроме того, изучалось влияние на перемешивание начальной высоты слоя, диаметра колонны, скорости фильтрации газа.

В соответствии с π -теоремой теории размерностей все параметры, которые входят в искомую функцию

$$D_T = f\left(\frac{u}{\epsilon_H} - u_0, d, \rho_T, \rho, \ell_H, \nu, D_K, H_0, g\right) \quad (2)$$

были сгруппированы в семь безразмерных комплексов. Как показал анализ опытных данных, зависимость (2) можно представить в виде степенной функции этих комплексов

$$\frac{D_T}{H_0(u/\epsilon_H - u_0)} = a_0 Fz^{a_1} Ga^{a_2} \left(\frac{\rho_T}{\rho}\right)^{a_3} \left(\frac{\ell_H}{d}\right)^{a_4} \left(\frac{H_0}{\ell_H}\right)^{a_5} \left(\frac{D_K}{\ell_H}\right)^{a_6} \quad (3)$$

При обобщении были использованы также данные других исследователей (Като, Габора, Баскакова с соотр.), полученные различными методиками в разнообразных условиях. На ЭВМ были рассчитаны показатели степеней в уравнении (3) и их доверительные интервалы. В результате была получена следующая обобщающая корреляция

$$\frac{D_T}{H_0(u/\epsilon_H - u_0)} = 0,45 Ga^{-0,16} \left(\frac{\rho_T}{\rho}\right)^{-0,58} \quad (4)$$

Формула (4) применима в следующих диапазонах изменения безразмерных комплексов: $0,7 \cdot 10^3 \leq \rho_T/\rho \leq 1,2 \cdot 10^4$, $60 \leq H_0/\ell_H \leq 620$, $21 \leq D_K/\ell_H \leq 140$, $2,7 \leq \ell_H/d \leq 41$, $2,5 \cdot 10^{-4} \leq Fz \leq 3,4$, $0,75 \cdot 10^{-2} \leq Ga \leq 10,5$.

Проведенное исследование показало, что эффективный коэффициент диффузии твердой фазы линейно зависит от произведения избыточной скорости фильтрации газа $u/\epsilon_H - u_0$ на высоту засыпки и не зависит от гидравлического радиуса насадки и диаметра аппарата. Влияние на перемешивание характеристик псевдооживаемых частиц и газа невелико и определяется

смножителем, стоящим в правой части уравнения (4).

В четвертой главе изложены результаты исследования массообмена в псевдоожиженном слое с мало- и средне-объемными насадками. Псевдоожижались частицы керамзита и шамота с размером от 0,13 до 0,4 мм. Начальная высота слоя адсорбента варьировалась в пределах от 30 до 80 см, а скорость фильтрации газа - от скорости начала псевдоожижения до 60 см/с. Концентрация влаги в воздухе на входе в колонну составляла 5-10 г/м³.

При обобщении были использованы также данные Емельянова, полученные методом модельной химической реакции.

Все параметры, которые могут оказывать влияние на массообмен ($u, \rho, \nu, \rho_T, d, S_n, V_n, D_k, H_0, D, g$), были сгруппированы в девять безразмерных комплексов. Анализ опытных данных показал, что искомую зависимость коэффициента массообмена от указанных величин можно представить в виде степенной функции этих комплексов

$$St = a_0 Fz_1^{a_1} \left(\frac{\rho}{\rho_T}\right)^{a_2} Sc^{a_3} \epsilon_n^{a_4} \left(\frac{D_k}{H_0}\right)^{a_5} Az^{a_6} Az'^{a_7} \left(\frac{H_0}{\rho_n}\right)^{a_8} \quad (5)$$

В результате обработки методом наименьших квадратов на ЭВМ экспериментального материала были рассчитаны показатели степеней в выражении (5), их стандартные ошибки и доверительные интервалы при уровне значимости 5%. Окончательно было получено следующее обобщающее уравнение

$$\frac{St}{\epsilon_n} = 0,0058 Fz_2^{-0,34} Sc^{-0,73} \quad (6)$$

Среднее относительное отклонение опытных точек от аппроксимации (6) составляет 26%.

Формула (6) справедлива для следующих диапазонов: $0,2 \cdot 10^{-3} \leq Fz_2 \leq 14 \cdot 10^{-3}$, $25 \leq Az \leq 3,3 \cdot 10^4$, $0,65 \leq Sc \leq 1,44$, $0,46 \leq \epsilon_n \leq 0,96$, $1,5 \leq H_0/D_k \leq 6$, $0,16 \cdot 10^6 \leq Az' \leq 45 \cdot 10^6$, $40 \leq H_0/\rho_n \leq 520$.

После некоторых преобразований формула (6) приводится к следующему виду:

$$\beta^* = \frac{\beta}{\varepsilon_n} = 0,0058 \varepsilon_0^{0,34} \rho_n^{-0,66} Sc^{-0,73}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_0 = \rho_T u g / \rho$ - удельная скорость диссипации энергии, расходуемой на поддержание твердых частиц во взвешенном состоянии.

Из формулы (6) следует, что коэффициент массообмена не зависит от размера псевдооживленных частиц и от масштаба аппарата (H_0, D_k). Это означает, что определяющим в процессе межфазного переноса является взаимодействие оживающего потока газа с группами частиц (агрегатами), а не с отдельными частицами.

Так как β зависит от гидравлического радиуса насадки, то размер агрегатов, к поверхности которых происходит сток компонента (массы), соизмерим с размерами элементов насадки.

В работе показано, что показатели степеней у ε_0 и ρ_n , близкие к экспериментальным значениям (см. уравнение (7)), могут быть получены из соображений размерностей.

Таким образом, корреляция (6) имеет физическую основу, отражающую особенности массообмена в диссипативной системе, которой является кипящий слой.

В пятой главе описан метод расчета адсорбера с ОПС.

Такие аппараты разрабатываются в МКТЭИавтопроме для очистки технологических газов от двуокси углерода.

Адсорбер с ОПС работает по схеме противотока. Очищаемый газ с примесью CO_2 поступает в нижнюю часть адсорбера под газораспределительную решетку, проходит через ОПС цеолита, где из потока газа адсорбируется примесь CO_2 , и выходит из аппарата через верхнюю его часть. Свежий адсорбент (цеолит марки СаА без связующего (ГрозНИИ) со средним размером частиц 0,3 мм) подается в аппарат сверху.

Использование мелкодисперсного адсорбента позволило значительно уменьшить диффузионное сопротивление внутри зерен.

Для расчета адсорбера с ОПС была принята модель двух континуумов (газа и твердого материала), в которой учтены два наи-

более существенных фактора, определяющих работу аппарата - перемешивание твердой фазы и межфазный массообмен:

$$\frac{dY}{dz} + \beta(Y - Y_p) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{dX}{dz} + a_T \frac{d^2X}{dz^2} + \beta m(Y - Y_p) = 0.$$

Граничные условия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{при } Z = 0 \quad \frac{dX}{dz} = 0 \quad \text{и} \quad Y = 1, \\ \text{при } Z = 1 \quad X_{\text{вх}} - X = a_T \frac{dX}{dz}. \end{aligned} \quad (9)$$

В дополнительных опытах была снята изотерма адсорбции CO_2 цеолитом, которая аппроксимирована степенной зависимостью

$$Y_p = X^3. \quad (10)$$

Система уравнений (8) с граничными условиями (9) и уравнением криволинейной изотермы (10) была решена численно на ЭВМ. Решение системы (8) показывает, что для уменьшения концентрации в газе на выходе из адсорбера необходимо увеличивать безразмерный параметр $\beta = \beta H / u$, отражающий интенсивность массообмена между газом и частицами в ОПС, и уменьшать параметр a_T , отражающий перемешивание твердой фазы.

Совместный анализ этого решения и данных по расширению (1), перемешиванию (4) и массообмену в ОПС (6) позволили сделать вывод, что для уменьшения величины $Y_{\text{вых}}$ необходимо увеличивать порозность насадки (ϵ_n) и уменьшать ее гидравлический радиус (R_n).

На основании проведенного исследования для адсорбера с ОПС были рекомендованы среднеобъемные насадки №№ 4 и 5 по табл. 1.

Для проверки справедливости принятой расчетной модели расчетные концентрации сопоставлялись с данными испытания генератора ОТ-66 конструкции МКТЭИавтопрома, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные испытания адсорбера МКТЭИавтопрома и их сопоставление с расчетом. Сечение $45 \times 97 \text{ см}^2$, $H=165 \text{ см}$.

Тип насадки	L кг/ч	u см/с	m	a _T	У _{вых} · 10 ³	
					Расчет	Опыт
Кольца Рашига	890	9	0,21	1,8	1,6	4-5
Керамическая насадка	600	9	0,26	2,9	5	4,2

Учитывая, что в рассматриваемой области малых концентраций CO_2 в газе на выходе точность измерений невелика, совпадение опытных и расчетных величин следует считать удовлетворительным.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана нестационарная методика измерения коэффициента перемешивания твердой фазы в ОПС, в которой в качестве меченых используются увлажненные частицы адсорбентов.

2. Предложена адсорбционная методика измерения коэффициента межфазного массообмена в ОПС, основанная на использовании макропористых мелкозернистых адсорбентов.

3. Предложена эмпирическая корреляция (1) для расчета расширения ОПС со среднесъемными насадками, перспективными для проведения процессов адсорбции.

4. Выявлены закономерности перемешивания твердой фазы в ОПС в вертикальном направлении. Предложена обобщающая зависимость (4) для расчета коэффициента перемешивания в ОПС со среднесъемными насадками. Показано, что перемешивание в псевдооживленном слое со среднесъемными насадками значительно меньше, чем в ОПС с малосъемными насадками.

5. Выявлены основные закономерности межфазного массообмена в псевдооживленном слое с мало- и среднесъемными насадками. Предложена обобщающая зависимость (6) для расчета коэффициента массообмена в ОПС. Показано, что массообмен определяется взаимодействием потока псевдооживляющего газа с группами твердых частиц (агрегатами), на поверхности которых происходит диссипация энергии, расходуемой на взвешивание частиц.

6. Предложен метод расчета адсорбера с ОПС, основанный на использовании модели двух континуумов (газа и частиц) и полученных данных о перемешивании твердой фазы и межфазном массообмене. Этот метод позволил обоснованно рекомендовать типы насадок и режимы работы для проведения процессов адсорбции.

7. Результаты работы были использованы ИКТЭИавтопром (г. Минск) при разработке генератора очищенной экзотермической атмосферы ОТ-66.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения такого генератора составляет около 10 тыс. руб. при потребности автомобильной промышленности 93 аппарата.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a, a_p - концентрации адсорбированного вещества, отнесенные к единице объема адсорбента соответственно текущая и равновесная; $a_T = D_T / (vH)$ - параметр перемешивания твердой фазы ОПС; $C, C_{вх}, C_{вых}, C_p$ - концентрации адсорбированного компонента в газе соответственно текущая, на входе в аппарат, на выходе, равновесная; d - средний размер псевдооживленных частиц; D_H, D_K - диаметры соответственно элемента насадки и колонны; D - коэффициент молекулярной диффузии в газе; D_T - коэффициент продольного перемешивания (эффективной диффузии) твердой фазы ОПС; h, h_0, H - высоты ОПС соответственно текущая, начальная и общая; H_H - высота элемента насадки; $r_H = (V - V_H) / S_H$ - гидравлический радиус насадки; $m = (u/v)(C_{вх}/a_p(C_{вх}))$ - соотношение расходов фаз в адсорбере; S_H - поверхность насадки в ОПС; u, u_0 - скорость соответственно фильтрации и газа в начале псевдооживления; v - скорость циркуляции частиц адсорбента между адсорбером и десорбером, отнесенная к полному сечению адсорбера; V, V_H - объемы соответственно ОПС и насадки в нем; $X = a/a_p(C_{вх})$, $Y = C/C_{вх}$ - безразмерные концентрации соответственно в твердой и газовой фазах; $Z = h/H$ - безразмерная высота; β - коэффициент внешнего массообмена между газовой и твердой фазами, отнесенный к единице объема ОПС;

ρ, ρ_T - плотности соответственно газа и кажущаяся твердого материала;

$$Az = \frac{d^3 g}{\nu^2} \frac{\rho_T - \rho}{\rho}, \quad Az' = \frac{r_H^3 g}{\nu^2} \frac{\rho_T - \rho}{\rho} - \text{числа Архимеда};$$

$$Fr = \frac{(u/\epsilon_n - u_0)^2}{H_0 g}, Fr_1 = \frac{u^2}{\rho_n g}, Fr_2 = Fr_1 \frac{\rho}{\rho_T} - \text{числа Фруда};$$

$$Ga = d^3 g / \nu^2 - \text{число Галилея}; Sc = \nu / D - \text{число Шмидта};$$

$$St = \frac{\beta \rho_n}{u} - \text{число Стантона}.$$

Основные положения диссертации изложены в семи печатных работах:

1. Горюнов К.Е., Тамарин А.И., Забродский С.С. Расчетная модель адсорбера с заторможенным псевдоожиженным слоем. В сб.: Тепло- и массообмен в двухфазных системах при фазовых и химических превращениях. - Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР, 1976, с. 85-90.

2. Горюнов К.Е., Тамарин А.И., Галерштейн Д.М., Кальтман И.И. К вопросу о проведении процесса адсорбции в аппарате с проточным организованным псевдоожиженным слоем. В сб.: Применение адсорбционных процессов для защиты окружающей среды от загрязнения. (Тезисы докл.), Минск, БелНИИТИ, 1978, с. 86-87.

3. Горюнов К.Е., Тамарин А.И. Повышение эффективности адсорберов кипящего слоя путем использования среднеобъемной насадки. (Тезисы докл.). В сб.: Пути совершенствования, интенсификации и повышения надежности аппаратов в основной химии. ч. I, Сумы, 1980, с. 90.

4. Горюнов К.Е., Тамарин А.И. Расширение псевдоожиженного слоя с насадкой. Известия АН БССР, сер. физ.-энерг. наук, 1981, № 3, с. 35-39.

5. Горюнов К.Е., Тамарин А.И. Исследование продольного перемешивания (эффективной диффузии) твердой фазы в псевдоожиженном слое со среднеобъемными насадками. - ИФЖ, 1981, т. 40, № 2, с. 271-277.

6. Горюнов К.Е., Тамарин А.И. К вопросу об изучении межфазного массообмена адсорбционной методикой. - В сб.: Исследования: новые процессы переноса в дисперсных системах. - Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР, 1981, с. 90-94.

7. Горюнов К.Е., Тамарин А.И., Артыхов А.Н. и др. Анализ работы адсорбера с организованным псевдоожиженным слоем и опыт его расчета. - Известия АН БССР, сер. физ.-энерг. наук, 1984, № 2, с. 93.

Подписано к печати 26 II.84г. АТ 15242. Формат 60x84 I/I6
Усл.печ.л. 0,93. Тираж 100экз. Бесплатно. Заказ 01534. ШПБ Бел-
НИИНТИ. 220004, г. Минск, пр. М-шорова, 23.