М388854

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ НЕ ДОПУСКАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

ГОРБУНОВ ВЛАДИМИР СТЕПАНОВИЧ

ДИНАМИКА ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕДАЧИ ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ АДСОРБЕНТА ПОТОКОМ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В АППАРАТАХ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ.

(05.04.03 - гидравлические машины, машины и аппараты холодильной и криогенной техники)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1982 г.

Работа выполнена в Московском ордена Трудового Красного Знамени институте народного хозяйства им. Г.В. Плеханова.

Научный руководитель – заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор АРХАРОВ А.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, ФРОЛОВ Е.С.

кандидат технических наук, ДЬЯЧКОВ М.И.

Ведущее предприятие: НПО "ГЕЛИЙМАШ"

Защита диссертации состоится "19" апреля 1982 г. в 14 час 30 мин на заседании специализированного совета К.053.15.07 "Криогенные, холодильные, гидравлические, [illegible] машины и аппараты" МВТУ им. [illegible]ква, Лефортовская [illegible] "Энергомашиностроения".

[illegible]ься в библиотеке [illegible]" 1982 г.

[illegible], заверенные печатью, [illegible]5, Москва, 2-ая Бауман- [illegible] Совет К. 053.15.07.

[illegible] Козлов В.Н.

М388854

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Основными направлениями совершенствования адсорбционных установок очистки и разделения газовых смесей являются: снижение энергозатрат, габаритов, массы, обеспечение возможности дальнейшей утилизации и переработки продуктов регенерации. Повышение эффективности адсорбционных процессов позволит шире использовать их для реализации народно-хозяйственных программ, намеченных 26 съездом КПСС.

Решение этих задач находится в непосредственной взаимосвязи с вопросами эффективного проведения регенерации адсорбента. В настоящее время наиболее распространенным способом регенерации адсорбента в установках с неподвижным слоем является прогрев потоком газовой смеси. Вместе с тем в литературе отмечается недостаточная изученность процессов тепло- и массопередачи при термической регенерации слоя потоком газовой смеси, отсутствие надежных методов их расчета. Учитывая сказанное, проведение работы по изучению процесса термической регенерации является актуальным.

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное исследование специфики процессов тепло- и массопередачи при регенерации неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси в условиях, близких к внешнеадиабатическим. Выявление влияния исходных параметров процесса регенерации на степень концентрирования адсорбата. Разработка алгоритма расчета и рекомендаций по реализации процесса термической регенерации неподвижного слоя адсорбента.

Научная новизна. Впервые исследованы процессы нестационарной тепло- и массопередачи в системе "цеолит NaX + углекислый газ" при термической регенерации неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси в условиях, близких к внешнеадиабатическим. Выбрана и апробирована физико-математическая модель образования двух зон эффективной тепло- и массопередачи, разделенных промежуточной зоной с равновесными параметрами (температурой и концентрацией), при регенерации слоя адсорбента потоком газовой смеси. Установлено, что в зависимости от условий регенерации параметры равновесной промежуточной зоны могут быть больше, равными

№ 388854

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

или меньше соответствующих начальных параметров процесса регенерации. На экспериментальном стенде получены опытные данные для системы "цеолит NaX + углекислый газ", подтверждающие возможность применения выбранной физико-математической модели для описания и проведения расчетов процесса термической регенерации.

Результаты работы. На основании теоретического и экспериментального исследования процессов тепло- и массопередачи при регенерации неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси разработана программа расчета профилей зон эффективной тепло- и массопередачи, их скоростей движения по слою и параметров промежуточной зоны для ЭВМ типа ЕС-1022. Получены множественные корреляционные зависимости для системы "цеолит NaX + углекислый газ" по определению температуры и концентрации равновесной промежуточной зоны и скоростей движения профилей этих зон. Зависимости действительны для следующей области параметров: начальная температура слоя адсорбента T_0 - 263 ÷ 303 К, начальная концентрация адсорбата C_0 - 0,5 ÷ 5,0 % по объему, температура регенерации T_A - 323 ÷ 423 К, концентрация адсорбата в регенерирующей газовой смеси 0 ÷ 5,0% по объему. Разработаны рекомендации по реализации процесса термической регенерации неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси в установках, предусматривающих концентрирование адсорбата.

Практическая ценность. Результаты работы использованы при расчете и конструировании блока поглощения CO_2 в организации, разрабатывающей системы очистки воздуха.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции молодых специалистов по холодильной технике и технологиии (Москва, 1973), на годичной сессии Научного Совета по синтезу, изучению и применению адсорбентов АН СССР (Щелыково, 1976), на 4-м Всесоюзном совещании по адсорбентам (Ленинград, 1977), на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и криогенной техники" (Ленинград, 1981) а также на техническом семинаре кафедры "Криогенная техника и кондиционирование" МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 статей,

получено 3 авторских свидетельства.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 210 страницах машинописного текста, включает: введение, 5 глав, выводы и приложение; 67 рисунков и 23 таблицы. Библиография содержит 88 наименований.

Глава 1. ПРОЦЕССЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ АДСОРБЕНТА (литературный обзор).

В главе дан обзор работ, отражающих широкое применение термической регенерации неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси в адсорбционных установках, применяемых в различных отраслях народного хозяйства. Отмечено, что энергоемкость этого процесса может достигать 70 - 80% от затрат энергии в адсорбционной установке. Дан анализ работ по теоретическому и экспериментальному исследованию тепло- и массопередачи при термической регенерации. Рассмотрена возможность использования линейной теории теплообмена для описания процесса термической регенерации потоком газовой смеси. Установлены ограничения на её применение. Проведен анализ физико-математических моделей процессов адсорбции и регенерации при неизотермических условиях, предложенных в работах Лезина Ю.С., Тодеса О.М., Pan C-Y для различных систем "адсорбат + адсорбент". В результате анализа литературных данных установлено следующее:

1. В настоящее время практически не исследовано совместное протекание процессов тепло- и массопередачи при термической регенерации потоком газовой смеси неподвижного слоя адсорбента в условиях, близких к внешнеадиабатическим, для системы "цеолит + углекислый газ".

2. В процессе термической регенерации слоя адсорбента потоком газовой смеси могут возникать две зоны эффективной тепло- и массопередачи, движущиеся с различными скоростями и разделенные промежуточной зоной с равновесными параметрами.

3. Известные инженерные методы расчета процесса регенерации неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси разработаны без учета трехзонного протекания процесса прогрева.

В связи с вышеизложенным были выдвинуты следующие задачи

исследования:

1. Выбор и обоснование физико-математической модели процесса термической регенерации неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси в условиях, близких к внешне-адиабатическим.

2. Решение математической модели для выявления влияния начальных и входных параметров процесса регенерации (начальной температуры слоя, начальной концентрации адсорбата, температуры газовой смеси на входе в слой, концентрации адсорбата в газовой смеси) на его характеристики.

3. Получение экспериментальных данных для подтверждения применимости выбранной физико-математической модели для описания процесса регенерации неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси.

4. Разработка инженерной методики расчета и рекомендаций, позволяющих на стадии проектирования адсорбционной установки определять основные параметры процесса термической регенерации.

Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕДАЧИ ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ АДСОРБЕНТА ПОТОКОМ ГАЗОВОЙ СМЕСИ.

В главе рассмотрена физическая модель образования трех зон тепло- и массопередачи в процессе прогрева насыщенного слоя адсорбента потоком газовой смеси в условиях, близких к внешнеадиабатическим. Установлено, что по длине слоя адсорбента могут перемещаться с различными скоростями две зоны эффективной тепло- и массопередачи, разделенные промежуточной зоной с равновесными параметрами (температурой $T_Б$ и концентрацией $C_Б$). В зависимости от условий регенерации параметры промежуточной зоны могут быть больше, равными или меньше начальных параметров процесса регенерации (начальной температуры слоя, начальной концентрации адсорбата). Приведено обоснование выбора математической модели для описания процессов тепло- и массопередачи при регенерации неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси. Принятая модель включает в себя следующие уравнения:

уравнение материального баланса

$$w\frac{\partial C}{\partial x}+f\cdot\frac{\partial C}{\partial \tau}+\frac{\rho_c}{\rho_r}\frac{\partial a}{\partial \tau}=0\ ; \qquad (1)$$

уравнение теплового баланса

$$w\frac{\partial T}{\partial x}+\left(f+\frac{\rho_c\cdot h_c}{\rho_{cм}\,h_{cм}}\right)\frac{\partial T}{\partial \tau}+\frac{\rho_c\cdot h_c}{\rho_{cм}\,h_{cм}}\cdot\frac{\partial(a\cdot T)}{\partial \tau}- \qquad (2)$$

$$\frac{\rho_c}{\rho_{cм}\,h_{cм}}\cdot\frac{\partial(a\cdot q(a))}{\partial \tau}=0\ ;$$

уравнение кинетики сорбции

$$\frac{\partial a}{\partial \tau}=\frac{\rho_r}{\rho_c}\cdot\beta\cdot S\cdot(C-Y) \qquad (3)$$

уравнение изотермы адсорбции

$$Y=\alpha\cdot Y(a) \qquad (4)$$

При выборе математической модели были сделаны следующие допущения: а) в начальный момент времени адсорбат равномерно распределен в слое; б) газовый поток может содержать только один адсорбируемый компонент и представляет собой идеальную смесь; в) температура и концентрация потока газовой смеси на входе в слой постоянны; г) влияние гидравлического сопротивления пренебрежимо мало; д) термическое сопротивление от газа к зерну адсорбента отсутствует; е) массопередача зависит от внешней и внутренней диффузии; ж) изменения концентрации и температуры в радиальном направлении отсутствуют; з) теплообмен с окружающей средой через боковую поверхность слоя адсорбента пренебрежимо мал; и) скорость движения газовой смеси по длине адсорбера остается постоянной; к) теплота десорбции тождественна теплоте адсорбции и зависит от заполнения адсорбента; л)явление гистерезиса изотермы адсорбции отсутствует; м) плотность и теплофизические характеристики газовой смеси постоянны и не зависят от температуры.

Решение системы уравнений (1 + 4) с целью определения параметров промежуточной зоны, скоростей движения зон эффективной тепло- и массопередачи и их профилей осуществлялось по по методу бегущей волны, апробированному при исследовании адсорбционных процессов в работах Тихонова А.Н., Самарского,

Pan C-Y, Basmadjian D . Введение новых переменных (для первой зоны - $\xi = x - \sigma_1 \cdot \tau$; для второй зоны - $\eta = x - \sigma_2 \cdot \tau$) позволяет перейти к дифференциальным уравнениям в полных производных, интегрирование которых производилось при следующих начальных и граничных условиях:

для первой зоны

$$\tau = 0;\ \xi = \infty;\ (X = \infty);\ a = a_0;\ C = C_0;\ T = T_0;$$

$$\tau = \infty;\ \xi = -\infty;\ (X = X_1);\ a = a_B;\ C = C_B;\ T = T_B;$$

для второй зоны

$$\tau = 0;\ \eta = \infty;\ (X = \infty);\ a = a_B;\ C = C_B;\ T = T_B;$$

$$\tau = \infty;\ \eta = -\infty;\ (X = X_0);\ a = a_A;\ C = C_A;\ T = T_A;$$

В результате интегрирования были получены следующие расчетные уравнения:

для первой зоны

$$(w - f \cdot \sigma_1)(C_B - C_0) - \sigma_1 \cdot \frac{\rho_c}{\rho_r} \cdot (a_B - a_0) = 0; \qquad (5)$$

$$\left[w - \sigma_1 \left(f + \frac{\rho_c \cdot h_c}{\rho_{cm} \cdot h_{cm}}\right)\right] \cdot (T_B - T_0) - \sigma_1 \cdot \frac{\rho_c \cdot h_r}{\rho_{cm} \cdot h_{cm}} \times$$

$$(a_B \cdot T_B - a_0 \cdot T_0) + \sigma_1 \frac{\rho_c}{\rho_{cm} \cdot h_{cm}} \left[q(a_B) \cdot a_B - q(a_0) \cdot a_0\right] = 0; \qquad (6)$$

для второй зоны

$$(w - f \cdot \sigma_2)(C_B - C_A) - \sigma_2 \cdot \frac{\rho_c}{\rho_r} \cdot (a_B - a_A) = 0; \qquad (7)$$

$$\left[w - \sigma_2 \left(f + \frac{\rho_c \cdot h_c}{\rho_{cm} \cdot h_{cm}}\right)\right] \cdot (T_B - T_A) - \sigma_2 \cdot \frac{\rho_c \cdot h_r}{\rho_{cm} \cdot h_{cm}} \times$$

$$(a_B \cdot T_B - a_A \cdot T_A) + \sigma_2 \frac{\rho_c}{\rho_{cm} \cdot h_{cm}} \left[q(a_B) \cdot a_B - q(a_A) \cdot a_A\right] = 0; \qquad (8)$$

Для нахождения параметров промежуточной зоны при решении уравнений (5 ÷ 8) совместно с уравнением изотермы адсорбции был использован метод последовательных приближений, предложенный в работе Харитонова В.П. и Соколихина В.Н.
Определение квазистационарных профилей первой и второй зон эффективной тепло- и массопередачи осуществлялось совместным решением следующих уравнений, полученных при интегрировании системы (1 ÷ 4):
для первой зоны

$$\xi = -\int_{\frac{a_0+a_B}{2}}^{\bar{a}} \frac{\sigma_1 \cdot \rho_c}{\beta \cdot S \cdot \rho_r (C-y)}\, da ;$$

$$C = C_0 + \sigma_1 \cdot \frac{\rho_c}{\rho_r} \cdot \frac{(\bar{a}-a_0)}{(w-\sigma_1 \cdot f)} ;$$

$$T = \frac{(w-\sigma_1 \cdot f)\cdot \rho_{cm} h_{cm} - \sigma_1 \cdot \rho_c [(a_0 h_r + h_c)\cdot T_0 + q(\bar{a})\cdot \bar{a} - q(a_0)\cdot a_0]}{(w-\sigma_1 \cdot f)\cdot \rho_{cm} \cdot h_{cm} - \sigma_1 \cdot \rho_c \cdot (h_c + h_r \cdot \bar{a})} ;$$

для второй зоны

$$\xi = -\int_{\frac{a_A+a_B}{2}}^{\bar{a}} \frac{\sigma_2 \cdot \rho_c}{\beta \cdot S \cdot \rho_r (C-y)}\, da ;$$

$$C = C_A + \sigma_2 \cdot \frac{\rho_c}{\rho_r} \cdot \frac{(\bar{a}-a_A)}{(w-\sigma_2 \cdot f)} ;$$

$$T = \frac{(w-\sigma_2 \cdot f)\cdot \rho_{cm} h_{cm} - \sigma_2 \cdot \rho_c [(a_A h_r + h_c)\cdot T_A + q(\bar{a})\,\bar{a} - q(a_A)\,a_A]}{(w-\sigma_2 \cdot f)\,\rho_{cm} \cdot h_{cm} - \sigma_2 \cdot \rho_c \cdot (h_c + h_r \cdot \bar{a})}$$

где принимаемые значения $\bar{a}$ лежат в интервале: для первой зоны $(a_0 \div a_B)$; для второй зоны $(a_B \div a_A)$.
Скорость движения фронтов первой и второй зон тепло- и массопередачи при известных параметрах промежуточной зоны определялись из уравнений (5 и 7).

Глава 3. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССА ПРОГРЕВА СЛОЯ АДСОРБЕНТА ПОТОКОМ ГАЗОВОЙ СМЕСИ.

В главе приведено обоснование выбора объекта экспериментов, области изменения независимых параметров, сформулированы задачи численного эксперимента. В качестве объекта исследования для проведения численного и натурного экспериментов был выбран неподвижный слой микропористого адсорбента – цеолита NaX, предварительно насыщаемый углекислым газом. Регенерация насыщенного слоя адсорбента осуществлялась продувкой сухим азотом с различным содержанием в нем CO_2. Для описания адсорбционного равновесия принятой системы "адсорбат + адсорбент" использовано термическое уравнение в вириальной форме

$$P = a \times EXP(B_1 + B_2 \cdot a + B_3 \cdot a^2 + \ldots) \times EXP[-(Q_1 + Q_2 \cdot a + Q_3 \cdot a^2 + \ldots)/R \cdot T];$$

Численные значения коэффициентов уравнения определялись по данным, приведенным в работах Киселева А.В., Авгуль Н.Н., Курдюковой Л.А..

Численный эксперимент проводился с привлечением методики рационального планирования экспериментов по методу комбинационных квадратов, разработанному и апробированному для 4-х и 7-ми факторных систем Протодъяконовым М.М. и Теддером Р.И.. Значения, принимаемые независимыми параметрами, приведены в таблице 1.

Табл.1

№ столбца, строки / фактор	1	2	3	4	5
C_0,%	0,5	1,5	2,5	3,5	5,0
C_A,%	0,0	1,5	2,5	3,5	5,0
T_0,К	263	273	283	293	303
T_A,К	323	353	373	393	423

Для выполнения расчетов разработана вычислительная программа на алгоритмическом языке "Фортран – 4" для ЭВМ типа ЕС – 1022. Программа позволяет вычислять параметры промежуточной зоны $C_Б$, $T_Б$, скорости движения первой и второй зон эффективной тепло- и массопередачи σ_1, σ_2 и выходные

температурные и концентрационные кривые.

Анализ результатов численного эксперимента позволил установить влияние независимых параметров (T_0, C_0, T_A, C_A) на вычисляемые величины.

Характер полученных кривых показывает слабую зависимость температуры в равновесной промежуточной зоне $T_Б$ от температуры газовой смеси на входе в слой на всех уровнях начальной концентрации и начальной температуры исследуемой области параметров. Зависимость носит ассимптотический характер. Если за точку отсчета принять температуру газовой смеси на входе в слой равной 373 К, то при её отклонении на ± 13,5% (± 50 К) изменение температуры промежуточной зоны не превышает ± 1,5% (± 4 К). Вместе с тем, проведенные расчеты показывают более существенное влияние начальной температуры слоя T_0 на температуру в промежуточной зоне. Эта зависимость имеет ярко выраженный линейный характер с небольшим изменением углового коэффициента при переходе с одного уровня начальной концентрации на другой. Принимая за начало отсчета значение T_0= 283 К, можно установить, что изменение начальной температуры на ± 7% (± 20 К) вызывает отклонение температуры промежуточной зоны на ± 6,5 % в области больших концентраций и на ± 5,0% при меньших значениях начальной концентрации.

Концентрация равновесной промежуточной зоны и степень концентрирования $\mathcal{N} = C_б / C_0$ в исследуемой области параметров имеют линейную зависимость от начальной температуры слоя. Однако для степени концентрирования наблюдается резкое снижение углового коэффициента при переходе к более высоким начальным концентрациям. Расчетная степень концентрирования при начальной концентрации C_0 = 0,5% и температуре газовой смеси T_A = 423 К может достигать 5 + 12, а при возрастании начальной концентрации до 4 + 5 % максимальное значение степени концентрирования не превышает 1,5 + 1,0. Проведенные расчеты показывают, что снижение начальной температуры слоя T_0 с целью увеличения степени концентрирования адсорбата эффективно лишь при малых начальных концентрациях C_0 (1,5 + 2% и ниже). При начальных концентрациях углекислого газа от 4% и выше температура T_0 практически не влияет на степень концентрирования $\mathcal{N}$.

В отличии от линейного характера влияния начальной температуры на степень концентрирования изменение начальной концентрации C_0 приводит к более сложной зависимости, имеющей характер степенной функции. Увеличение начальной концентрации C_0 от 0,5 до 2,5% приводит к резкому снижению степени концентрирования (в 3 ÷ 4 раза). При параметрах, соответствующих значениям T_0= 303 К, T_A= 373 К, C_A= 0,0%, концентрирование прекращается уже при начальной концентрации C_0= 3%. Характер изменения степени концентрирования в зависимости от входной температуры T_A не одинаков для различных начальных условий. При малых начальных концентрациях эта зависимость носит ассимптотический характер, при переходе к более высоким концентрациям (C_0= 4% и выше) она вырождается в линейную зависимость с малым угловым коэффициентом. Значения M в случае больших начальных концентраций ($C_0 > 4\%$) близки или меньше 1 даже при температуре газовой смеси T_A 423 К.

Анализ результатов вычисления скоростей первой и второй зон эффективной тепло- и массопередачи σ_1 и σ_2 показал, что скорость перемещения первой зоны σ_1 на порядок и более превышает скорость движения второй зоны σ_2. Для исследованной области параметров и фиктивной скорости газовой смеси 0,3 м/с значения скоростей фронтов лежат в пределах: для первой зоны $1 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-3}$ м/с; для второй зоны $2 \cdot 10^{-4} \div 3{,}5 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Использованная методика рационального планирования и обработки численного эксперимента позволила получить множественные корреляционные зависимости для определения основных расчетных величин:

концентрация равновесной промежуточной зоны

$$C_B = 0{,}94 C_A + \frac{3{,}56\, C_0}{C_0 + 0{,}243} + 9{,}15\, \frac{T_A - T_0}{T_0} - 2{,}75 \;;$$

температура равновесной промежуточной зоны

$$T_B = 0{,}86 T_0 + \frac{309\, T_A}{22 + T_A} + \frac{16{,}6\, C_A}{4{,}38 + C_A} - 19{,}9 \lg C_0 - 242 \;;$$

скорость движения первой зоны тепло- и массопередачи

$$\sigma_1 = (0{,}4C_0 - 0{,}0029T_0 + 2{,}1)\cdot 10^{-3}$$

скорость движения второй зоны тепло- и массопередачи

$$\sigma_2 = (0{,}01\cdot T_A - 0{,}8)\cdot 10^{-4}$$

Оценка погрешности результатов расчета по корреляционным зависимостям и на ЭВМ производилась путем вычисления среднеквадратичной и относительной погрешностей. Значения относительной погрешности составляют для:

равновесной концентрации промежуточной зоны $C_Б$ - 7,8% ;
равновесной температуры промежуточной зоны $T_Б$ - 1,4% ;
скорости движения фронта первой зоны σ_1 - 17,5% ;
скорости движения фронта второй зоны σ_2 - 6,3%.

Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕДАЧИ ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ АДСОРБЕНТА ПОТОКОМ ГАЗОВОЙ СМЕСИ.

В главе приведено описание разработанного стенда для проведения экспериментов. Стенд позволяет производить регенерацию адсорбента при фиктивной скорости движения газовой смеси до 0,5 м/с. Концентрация углекислого газа на входе в слой адсорбента может изменяться от 0 до 50% по объему. Температурный интервал, обеспечиваемый в режимах насыщения и регенерации, лежит в пределах 243 ÷ 623 К. Создание газовой смеси осуществляется путем газификации жидкого азота и дросселирования жидкой углекислоты. Экспериментальный адсорбер обеспечивает условия работы неподвижного слоя адсорбента, близкими к внешнеадиабатическим. Максимальные относительные потери тепла через боковую поверхность слоя не превышают 3%, что достигается применением экрано-вакуумной изоляции. Высота слоя адсорбента составляет 0,5 м, а его диаметр - 0,04 м. В качестве адсорбента использовался цеолит общего назначения типа NaX-3M , производства ГОЗ ВНИИНП.

При проведении экспериментальных исследований процессов тепло- и массопередачи при регенерации неподвижного слоя адсорбента осуществлялись контроль и измерение следующих

основных параметров: температуры в различных сечениях адсорбера, температуры точки росы газовой смеси на входе в адсорбер, концентрации углекислого газа на входе и выходе адсорбера, избыточного давления на входе и выходе адсорбера, разряжения, создаваемого в межтрубном пространстве адсорбера, электрического напряжения, подводимого к клеммам нагревателей адсорбера и газификатора, расхода газовой смеси через адсорбер, веса адсорбента, засыпанного в адсорбер.

В главе приводится анализ погрешности измерений, методика проведения и обработки результатов экспериментов. Первичными результатами экспериментов являются выходные температурные и концентрационные кривые.

Анализ результатов экспериментального исследования показал их хорошее качественное совпадение с результатами теоретического исследования. Так например, при изменении температуры регенерации от 403 до 313 К (для C_0= 0,8%, T_0= 293 К, $C_Д$= 0%) наблюдались три варианта образования зон эффективной тепло- и массопередачи. Формирование обеих зон происходит на начальном участке слоя длиной 250 ÷ 340 мм. Вместе с тем отмечено увеличение длины фронта (его размыв) каждой из зон тепло- и массопередачи при перемещении вдоль слоя. Оценка увеличения длины фронта осуществлялась по величине относительного удлинения ϵ , определяемого соотношением

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100\ \%$$

где L_0 – первоначальная длина фронта работающего слоя;
L – длина фронта работающего слоя после перемещения его центра на расстояние, равное L_0.

Исключая из рассмотрения начальный участок, на котором происходит формирование фронта, было проведено вычисление относительного удлинения для первой и второй зон. Анализ этих результатов показывает, что для исследованной области параметров относительное удлинение составляет: для первой зоны 26%, а для второй зоны – 22%.

Сопоставление результатов численного и натурного экспериментов по параметрам промежуточной равновесной зоны и скоростям движения фронтов проведено путем вычисления относительного отклонения . Анализ этих результатов показывает

удовлетворительное совпадение численного и натурного экспериментов (относительные отклонения не превышают 25%), тем самым оправдывая допущения, положенные в основу физико-математической модели.

Глава 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.

В главе приводится инженерная методика расчета процесса термической регенерации неподвижного слоя адсорбента. Предлагаемая методика позволяет определять следующие величины: время прогрева слоя; время процесса предварительного охлаждения; концентрацию адсорбата на выходе из адсорбера; температуру газовой смеси на выходе из адсорбера; степень регенерации и концентрирования адсорбата; затраты энергии. Методика может быть использована для оптимизации процесса регенерации по таким параметрам как, например, затраты энергии, степень концентрирования, время регенерации. Приведен пример расчета температурного режима работы адсорбера системы очистки воздуха от углекислого газа.
На основании анализа результатов теоретического и экспериментального исследования разработаны рекомендации по проведению процесса термической регенерации. Анализ расчетов показывает целесообразность использования вышеописанного процесса регенерации с целью концентрирования адсорбата лишь при низких начальных концентрациях (ниже 2%). Для повышения степени концентрирования процесс прогрева слоя адсорбента целесообразно осуществлять потоком очищаемой газовой смеси при температурах регенерации 393 ÷ 423 К и температурах процесса адсорбции ниже 273 К. В адсорбционных установках, перед которыми не стоит задача концентрирования адсорбата, температура регенерации может быть снижена до 353 ÷ 370 К без значительного увеличения времени регенерации и снижения емкости адсорбента.

ВЫВОДЫ.

1. В результате теоретического и экспериментального исследования процесса прогрева неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси при термической регенерации в установках очистки и разделения газовых смесей выявлена возможность образования трех зон тепло- и массопередачи.

Установлено, что по слою перемещаются с различными скоростями две зоны эффективной тепло- и массопередачи, разделенные зоной с равновесными параметрами (концентрацией и температурой). Параметры равновесной зоны могут быть больше, равными или меньше начальных параметров регенерации.

2. Предложена математическая модель процесса прогрева неподвижного слоя адсорбента при его регенерации в условиях, близких к внешнеадиабатическим. Осуществлено решение задач по определению параметров равновесной промежуточной зоны и определению профилей и скоростей движения зон эффективной тепло- и массопередачи. Разработана вычислительная программа определения параметров процесса прогрева слоя адсорбента для системы "цеолит NaX + углекислый газ" на языке "Фортран - 4", служащая основой методики инженерного расчета термической регенерации.

3. Выполнен численный эксперимент по определению температуры и концентрации равновесной промежуточной зоны, скоростей и профилей фронтов первой и второй зон эффективной тепло- и массопередачи. Проведен анализ результатов численного эксперимента. Получены множественные корреляционные зависимости, позволяющие оценить влияние начальных и входных условий регенерации на искомые параметры $C_Б$, $T_Б$.

4. Проведены натурные испытания слоя адсорбента NaX на экспериментальном стенде. Разработанный стенд позволяет исследовать процесс термической регенерации неподвижного слоя адсорбента в широком интервале начальных и входных параметров. Экспериментальный адсорбер обеспечивает условия работы слоя адсорбента, близкие к внешнеадиабатическим (относительные потери тепла через боковую поверхность слоя не превышают 3%).

5. Натурные эксперименты подтвердили их качественную адекватность физико-математической модели процесса прогрева неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси. Максимальное расхождение вычисленных результатов с результатами натурного эксперимента в исследованной области параметров, оцениваемое среднеквадратичной относительной погрешностью не превышает для:

равновесной температуры промежуточной зоны $T_Б$ - 1,5%;

равновесной концентрации промежуточной зоны $C_Б$ - 16,4%;

скорости движения фронта первой зоны σ_1 - 18,4%;
скорости движения фронта второй зоны σ_2 - 12,5%.

6. Разработаны методика инженерного расчета и рекомендации по реализации процесса термической регенерации неподвижного слоя адсорбента потоком газовой смеси. В частности проведенные расчеты показывают целесообразность использования вышеописанного процесса регенерации с целью концентрирования адсорбата лишь при его низких начальных концентрациях (1,5 + 2,0 % и ниже).

Результаты настоящей работы переданы и используются в организации, осуществляющей проектирование адсорбционных блоков и установок для очистки и разделения газовых смесей.

Условные обозначения.

T - температура; x - координата; τ - время; C - концентрация адсорбата; a - адсорбционная емкость; ε - пористость; q - дифференциальная теплота адсорбции; β - коэффициент массопередачи; w - фиктивная скорость газовой смеси; ρ_c - насыпная плотность адсорбента; ρ_r - плотность адсорбата; $\rho_{см}$ - плотность газовой смеси; h_c, h_r, $h_{см}$ - объемные теплоемкости адсорбента, адсорбата и газовой смеси; P - парциальное давление адсорбата; R - газовая постоянная.

Индексы: о - начальные условия; А - условия на входе в слой адсорбента; Б - условия в равновесной промежуточной зоне.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Харитонов В.П., Горбунов В.С., Махлин А.А. О неприменимости линейной теории для описания процессов теплообмена в слое адсорбента. - Науч. тр./МИНХ им. Г.В. Плеханова, 1974, вып.2, с. 124 - 129.

2. Горбунов В.С. Исследование процессов тепло- и массообмена в установках для поддержания газового состава атмосфер холодильных камер. - В сб.: Тезисы докладов к Всесоюзной научно-технической конференции молодых специалистов по холодильной технике и технологии. М., 1973, с. 1-2.

3. Харитонов В.П., Горбунов В.С., Махлин А.А. К расчету импульсного прогрева газом слоя мелкозернистого материала. - Науч. тр./МИНХ им. Г.В. Плеханова, 1975, вып. 1, с. 51 - 57.

4. А.с. 420317, (СССР). Устройство для очистки газовой среды от избытка углекислого газа в камерах для хранения плодов и овощей "Атмостат 2"./В.П. Харитонов, Б.А. Липкинд, В.С. Горбунов и др.- Заявл. 25.02.72. № 1761963/28-13; Опубл. в Б.И., 1974, № 11; МКИ В 01 53/02. - УДК 641.42

5. А.с. 418204 (СССР). Устройство для очистки газовой среды от избытка углекислого газа в камерах для плодов и овощей./ В.П. Харитонов, А.А. Журин, В.С. Горбунов и др.- Заявл. 21.03.72. № 1761924/28-13; Опубл. в Б.И., 1975, № 9; МКИ В 01 53/02. - УДК 621.565.3.

6. А.с. 536832 (СССР). Установка для очистки газов./В.П. Харитонов, Махлин А.А., Ю.П. Паткин, В.С. Горбунов.- Заявл. 06.05.72. №1781927/26; Опубл. в Б.И., 1976, № 44; МКИ В 01 53/02.- УДК 66.071.7.

7. Харитонов В.П., Журин А.А., Горбунов В.С. Адсорбционные установки для герметичных плодоовощехранилищ.- В кн.: Адсорбенты, их получение, свойства и применение. Л., 1978, с. 215 - 218.

8. Горбунов В.С. Адсорбционные установки с использованием тепловых насосов.- Науч. тр./Торговое и холодильное оборудование. МИНХ им. Г.В. Плеханова, 1980, с. 53 - 61.

9. Горбунов В.С. Тепломассообмен при регенерации неподвижного слоя адсорбента в аппаратах очистки и разделения газовых смесей.- В сб.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и криогенной техники". Л., 1981, с. 106.

11 марта 1982г
Л-90250 Заказ 270 Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

Ротапринт МВТУ 107005, Москва, Б-5, 2-ая Бауманская, д.5