М 396440

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

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

ХАРИТОНОВ Борис Петрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ АДСОРБЦИИ ПРИ ОСУШКЕ ВОЗДУХА НА ЦЕОЛИТЕ NaA.

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

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1982 г.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Высшем Техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Е.И.МИКУЛИН

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Ю.И. ШУМЯЦКИЙ

кандидат технических наук,
М.И. ДЬЯЧКОВ

Ведущее предприятие: НПО " Гелиймаш "

Защита диссертации состоится "1" ноября 1982 г. в 16 час 30 мин на заседании специализированного Совета К 053.15.07 "Криогенные, холодильные, гидравлические, вакуумные и компрессорные машины и аппараты" МВТУ им.Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская набережная, д.1, корпус факультета "Энергомашиностроения".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.Н.Э.Б

ечатью, просьба п
нская ул., дом

Козлов

M3961440

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшими задачами, поставленными XXVI съездом КПСС, являются всемерный рост эффективности общественного производства, улучшение качества продукции, ускорение научно-технического прогресса. Одним из путей решения этих проблем в криогенной технике и кондиционировании является повышение эффективности процессов адсорбционной технологии, широко применяемых для очистки и осушки газов. До настоящего времени оптимизация технологических режимов адсорбционных процессов сдерживается отсутствием надежных методов расчета процессов неизотермической адсорбции, наиболее часто реализующихся при эксплуатации адсорбционных установок. Это объясняется недостаточной изученностью сложных процессов тепло- и массообмена, протекающих при неизотермической адсорбции. Вследствие этого не исследованы зависимости основных характеристик процесса неизотермической адсорбции от исходных параметров для таких важных систем адсорбтив – адсорбент, как водяные пары – цеолиты. Учитывая сказанное, исследование динамики неизотермической адсорбции водяных паров цеолитом *NaA* является важной научной и практической задачей, актуальной в настоящее время.

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное исследование динамики неизотермической адсорбции при осушке воздуха неподвижным слоем цеолита *NaA* в условиях работы блоков осушки криогенных установок и систем кондиционирования воздуха.

Методы исследования. В теоретическом исследовании известная математическая модель процесса, в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, решалась для режима параллельного переноса с учетом особенностей конкретной системы.

С помощью метода распространяющихся волн Даламбера получено решение в виде системы нелинейных алгебраических уравнений. Численный анализ теоретических зависимостей выполнен с применением ЭВМ.

Экспериментальное исследование проведено в широком диапазоне изменения исходных параметров с использованием методов рационального планирования экспериментов.

Научная новизна. В результате теоретического и экспериментальн-

М 396440

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1396440
Харитонов Б.П.Исследование

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

ного исследования впервые установлено, что в процессе динамики неизотермической адсорбции водяных паров на цеолите NaA в широком диапазоне изменения исходных параметров реализуется режим комбинированной волны, разработаны методы расчета основных параметров процесса. Результаты численного анализа позволили выявить закономерности изменения основных характеристик процесса осушки воздуха от исходных параметров.

Экспериментальное исследование подтвердило качественные результаты теоретического исследования и возможность применения выбранной физико-математической модели для описания и проведения приближенных расчетов процесса осушки воздуха на цеолитах.

Результаты работы. На основании теоретического и экспериментального исследования процессов тепло- и массообмена при осушке воздуха неподвижным слоем цеолита NaA разработана и реализована на ЭВМ программа расчета основных параметров процесса. Выявлены зависимости основных характеристик от исходных параметров. Построена номограмма для определения концентрации водяных паров и температуры воздуха в промежуточной зоне. Полученные результаты действительны для следующей области исходных параметров: начальная температура слоя адсорбента T_0 - 273 ÷ 328 К, начальная концентрация адсорбата a_0 - I ÷ 5 моль/кг, температура воздуха на входе в адсорбер T_1 - 273-328 К, концентрация адсорбтива в воздухе C_1 -0 ÷ 0,03 моль/моль.

Разработаны практические рекомендации по совершенствованию показателей работы адсорбционных блоков осушки воздуха с неизотермическими условиями эксплуатации.

Практическая ценность. Полученные в работе результаты использованы для выбора оптимальных режимных параметров процесса осушки воздуха, обеспечивающих заданный тепловой режим работы адсорбера и требуемое качество осушки воздуха в организации, разрабатывающей системы очистки воздуха.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении" (Москва, 1980), на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности процессов и оборудо-

вания холодильной и криогенной техники" (Ленинград, 1981), а также на техническом семинаре кафедры "Криогенная техника и кондиционирование" МВТУ им.Н.Э.Баумана.

Основное содержание работы опубликовано в 3-х статьях.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 159 страницах машинописного текста, включает: введение, 5 глав, выводы и приложение; 40 рисунков и 12 таблиц. Библиография содержит 110 наименований.

ГЛАВА I. ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДИНАМИКЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ АДСОРБЦИИ

В главе проанализированы особенности эксплуатации адсорбционных блоков очистки и осушки газов в криогенных системах и системах кондиционирования воздуха. Отмечено, что характерной чертой процесса осушки воздуха является неизотермичность, вызванная экзотермичностью процесса адсорбции, а также несовпадением температуры газа на входе в адсорбер с начальной температурой слоя.

Приведен обзор теоретических исследований в области динамики неизотермической адсорбции. Рассмотрены математические модели процессов, допущения, используемые при их создании, методы решения. Определена математическая модель динамики неизотермической адсорбции, пригодная для решения широкого круга инженерных задач. Известно, что при образовании стационарного фронта в зонах тепло- и массообмена могут реализоваться два качественно различных режима динамики неизотермической адсорбции, условно названных режимами одиночной тепловой волны и комбинированной волны. Известные критерии предопределяют реализацию режима одиночной тепловой волны для системы водяные пары-цеолиты в широком диапазоне исходных параметров. В нашей работе было установлено, что вопреки сложившемуся мнению, в процессе неизотермической адсорбции водяных паров цеолитами реализуется режим комбинированной волны. В связи с этим представляет интерес исследование основных характеристик процесса в режиме комбинированной волны, уточнение условий реализации того или другого типа режима. На основании обзора работ по динамике неизотермической адсорбции были определены

следующие задачи исследования:

I. Анализ математической модели и разработка методов расчета основных параметров процесса осушки воздуха на цеолите NaA в условиях неизотермической адсорбции.

2. Разработка и реализация на ЭВМ программы вычисления основных параметров процесса осушки воздуха на цеолите NaA в условиях неизотермической адсорбции и проведение численных экспериментов при различных значениях исходных параметров - концентрации адсорбтива и температуры воздуха на входе в адсорбер, начальной концентрации адсорбата и температуры слоя.

3. Экспериментальная проверка полученных расчетных зависимостей.

4. Уточнение условий реализации режима комбинированной волны.

5. Разработка методов расчета и рекомендаций по совершенствованию показателей работы адсорбционных блоков осушки с неизотермическими условиями эксплуатации.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ОСУШКЕ ВОЗДУХА НЕПОДВИЖНЫМ СЛОЕМ ЦЕОЛИТА NaA В УСЛОВИЯХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ АДСОРБЦИИ

В главе рассмотрены физическая и математическая модели процесса неизотермической адсорбции одного компонента из потока газовой смеси в неподвижном слое адсорбента. Рассматривается одномерный случай: распределение температуры и скорости газа в поперечном сечении адсорбера принимается равномерным. Газовая смесь подчиняется законам идеального газа. Температурное поле в слое адсорбента характеризуется температурой газа и температурой зерен адсорбента. Тепло- и массообмен между потоком газа и слоем адсорбента подчиняется закону Ньютона. Кинетику процесса физической обратимой адсорбции определяет конвективный (внешний) массообмен. Теплообмен с окружающей средой отсутствует. Теплофизические свойства газовой смеси и слоя принимаются постоянными и вычисляются как средние ин-

тегральные величины для некоторого интервала температур. Продольная диффузия и теплопроводность не учитываются. Предполагалось, что начальная концентрация адсорбата отлична от нуля. Принято, что дифференциальная теплота адсорбции зависит от концентрации адсорбата. Обосновано положение о реализации режима комбинированной волны в процессе неизотермической адсорбции при ненулевой начальной концентрации адсорбата. Физическая модель процесса рассматривалась как квазистационарный режим комбинированной волны. Этот процесс характеризуется наличием двух зон совместного тепло- и массообмена, перемещающихся по слою с постоянной скоростью в направлении движения потока газа и наличием равновесной промежуточной зоны.

Математическая модель процесса представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа

$$G\cdot\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{C}{1-C}\right)+\frac{\varepsilon\cdot\rho}{R}\cdot\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{C}{T_r}\right)=\frac{\beta\cdot\rho}{R\cdot T_r}\left(C^*-C\right)$$

$$G\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{i_r}{1-C}\right)+\frac{\varepsilon\cdot\rho}{R}\cdot\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{i_r}{T_r}\right)=\alpha\cdot\left(T_c-T_r\right)-i_a\rho_c\frac{\partial a}{\partial t}$$

$$\rho_c\cdot\frac{\partial a}{\partial t}=\frac{\beta\cdot\rho}{R\cdot T_r}\left(C-C^*\right)$$

$$\rho_c\cdot\frac{\partial i_c}{\partial t}=\alpha\cdot\left(T_r-T_c\right)+i_a\rho_c\cdot\frac{\partial a}{\partial t}$$

$$a=f\left(T_c,C^*\right)$$

Краевая задача решалась методом распространяющихся волн при следующих начальных и граничных условиях:

$$t=0;\quad T_c(0,x)=T_r(0,x)=T_0=const;\ C^*(0,x)=C(0,x)=C_0=const$$
$$a(0,x)=a_0=f(C_0,T_0)=const\qquad(a_0\neq 0)$$

$$x=0;\quad C(t,0)=C_1=const\ ;\ T_r(t,0)=T_{r1}=const$$

В качестве уравнения адсорбционного равновесия и зависимости дифференциальной теплоты адсорбции от концентрации адсорбата в математической модели использованы аппроксимационные зависимости, полученные нами на основании опубликованных экспериментальных данных.

$$a = 1{,}3 \cdot exp\left[-\left(\frac{A}{39774}\right)^6\right] + 8 \cdot exp\left[-\left(\frac{A}{17752}\right)^9\right] + 5 \cdot exp\left[-\left(\frac{A}{7725}\right)\right]$$

$$q = 41868 \cdot exp(-0{,}164 \cdot a^3) + 62802 \cdot exp(-0{,}958 \cdot 10^{-11} \cdot a^9)$$

$$A = R \cdot T \cdot \ell n\left(\frac{P_s}{P}\right)$$

q, Дж/моль ; a, моль/кг

Относительная ошибка аппроксимации экспериментальных данных не превышала 7%.

Решение краевой задачи сведено к следующей системе уравнений:

$$\eta(a) = \int_{a^*}^{a} \frac{u_2 \cdot \rho_c \cdot R \cdot T_r}{P \cdot \beta (C^* - C)}\, da$$

$$\frac{dT_c}{da} = \frac{\frac{R \cdot T_r \cdot \alpha \cdot (T_c - T_r)}{P \cdot \beta \cdot (C^* - C)} + q}{C_{pc} + a \cdot C_{pa}}$$

$$a = f(C^*, T_c)$$

$$G \cdot \left(\frac{C}{1-C} - \frac{C_1}{1-C_1}\right) = u_2 \cdot \left[\rho_c \cdot (a - a_1) + \frac{\varepsilon \cdot P}{R} \cdot \left(\frac{C}{T_r} - \frac{C_1}{T_{r1}}\right)\right]$$

$$G \cdot \left(\frac{i_r}{1-C} - \frac{i_{r1}}{1-C_1}\right) = u_2 \cdot \left[\rho_c \cdot (i_c - i_{c1}) + \frac{\varepsilon \cdot P}{R} \left(\frac{i_r}{T_r} - \frac{i_{r1}}{T_{r1}}\right)\right]$$

$$i_r = C \cdot [\tau + C_{pa} \cdot (T_r - 273)] + (1 - C) \cdot C_{pr} \cdot (T_r - 273)$$

$$i_c = C_{pc} \cdot (T_c - 273) + a \cdot [\tau + C_{pa} \cdot (T_c - 273)] - \int_0^a q \cdot da$$

Решение позволяет определять численными методами зависимо-

сти температур и концентраций от времени и координаты. В приведенных формулах скорости перемещения зон тепло- и массообмена, температура, концентрация адсорбтива и адсорбата в промежуточной зоне предполагаются предварительно вычисленными. Задача определения этих параметров сведена к решению системы нелинейных алгебраических уравнений.

$$\frac{R_{11}\cdot\rho_c\cdot[C_{pc}\cdot(T_1-T_2)+a_1\cdot(i_{a1}-q_1)-q_2]+R_{11}\cdot R_{14}-R_{12}\cdot R_{13}-R_{13}\cdot\rho_c\cdot a_1}{R_{11}\cdot\rho_c\cdot(i_{a2}-q_0)-R_{13}\cdot\rho_c}-f(C_2,T_2)=0$$

$$\frac{R_1\cdot\rho_c\cdot[a_0\cdot(i_{a0}-q_0)-c_{pc}\cdot(T_2-T_0)]-R_1\cdot R_4+R_2\cdot R_3-R_3\cdot\rho_c\cdot a_0}{R_1\cdot\rho_c\cdot(i_{a2}-q_0)-R_3\cdot\rho_c}-f(C_2,T_2)=0$$

$$R_1=\frac{C_2}{1-C_2}-\frac{C_0}{1-C_0} \qquad R_3=\frac{i_{r2}}{1-C_2}-\frac{i_{r0}}{1-C_0}$$

$$R_{11}=\frac{C_1}{1-C_1}-\frac{C_2}{1-C_2} \qquad R_{13}=\frac{i_{r1}}{1-C_1}-\frac{i_{r2}}{1-C_2}$$

$$R_2=\frac{\varepsilon\cdot P}{R}\left(\frac{C_2}{T_2}-\frac{C_0}{T_0}\right) \qquad R_4=\frac{\varepsilon\cdot P}{R}\left(\frac{i_{r2}}{T_2}-\frac{i_{r0}}{T_0}\right)$$

$$R_{12}=\frac{\varepsilon\cdot P}{R}\left(\frac{C_1}{T_1}-\frac{C_2}{T_2}\right) \qquad R_{14}=\frac{\varepsilon\cdot P}{R}\cdot\left(\frac{i_{r1}}{T_1}-\frac{i_{r2}}{T_2}\right)$$

Для определения параметров промежуточной зоны и скоростей перемещения зон тепло- и массообмена разработана программа расчета на алгоритмическом языке "Фортран-4" для реализации на ЭВМ серии ЕС.

Численный анализ проведен для 4 переменных факторов, значения которых наиболее часто меняются в процессе эксплуатации блоков осушки. Такими факторами являлись: относительная влажность воздуха на входе в слой φ_1, начальная концентрация адсорбата a_0, начальная температура слоя T_0, температура воздуха на входе в слой T_1. Исследованная область изменения переменных факторов определяется их значениями (уровнями), приве-

денными в таблице I.

Таблица I

Область изменения переменных факторов

фактор \ N уровня	I	2	3	4	5
T_1 , К	278	288	298	308	328
a_o , моль/кг	I	2	3	4	5
T_o , К	278	288	298	308	328
φ_1 , %	10	30	50	70	90

В качестве объекта исследования использован неподвижный слой промышленного синтетического цеолита NaA МРТУ 6-01--906-66.

Для каждой совокупности значений переменных факторов в численном эксперименте вычисляется массив искомых величин: температура T_2 , концентрации адсорбтива C_2 и адсорбата a_2 в промежуточной зоне, скорости перемещения первой и второй u_1, u_2 зон тепло- и массообмена.

Численный эксперимент проводился с использованием методики рационального планирования эксперимента. Результаты расчетов приведены в конце главы.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСУШКИ ВОЗДУХА НА ЦЕОЛИТЕ NaA В УСЛОВИЯХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ АДСОРБЦИИ

В главе приведено описание экспериментального стенда, методики проведения экспериментов, приведены результаты физических экспериментов.

Целью экспериментального исследования является получение фактических данных для апробации физико-математической модели и проверки результатов теоретического исследования. В задачи экспериментального исследования входило:

I. Определение стационарных значений температуры воздуха T_2 и концентрации адсорбтива C_2 в промежуточной зоне в процессе неизотермической адсорбции при различных значениях исходных параметров: относительной влажности φ_1 и температуры воздуха T_1 на входе в слой, начальной концентрации адсорба-

та a_0 и температуры слоя T_0 .

2. Определение изменения температуры воздуха и концентрации адсорбтива в зависимости от времени в зонах тепло- и массообмена для фиксированных точек слоя.

3. Определение типа режима процесса неизотермической адсорбции при различных значениях начальной концентрации адсорбата и других переменных факторов.

Для проведения исследования был создан экспериментальный стенд, включающий в себя: адсорбер, узел регулирования температуры и влажности воздуха, контрольно-измерительную аппаратуру, блок регенерации и охлаждения адсорбента.

Исследование проводилось методом снятия выходных кривых изменения температуры и влажности воздуха в различных по длине сечениях слоя адсорбента.

Температура воздуха измерялась с помощью термопар хромель-копель и регистрировалась на ленте электронного самопишущего потенциометра КСП-4.

Влажность воздуха измерялась кулонометрическими измерителями микроконцентрации влаги в газах типа "Байкал-1" и непрерывно регистрировалась на ленте электронного потенциометра КСП-2.

При проведении основного эксперимента на вход в адсорбер подавался поток воздуха, параметры которого (влажность, температура и расход) имели определенные значения и поддерживались постоянными в течение всего опыта. Перед началом опыта производилось регулирование этих параметров.

Методика подготовки адсорбента с заданной начальной концентрацией адсорбата заключалась в следующем. Термическая регенерация адсорбента проводилась при продувке адсорбера атмосферным воздухом . Температура регенерации определялась в соответствии с измеренной влажностью воздуха. Для определения ее значения, по предложенному нами уравнению адсорбционного равновесия, были рассчитаны изотермы адсорбции.

После проведения регенерации адсорбента, адсорбер герметизировали и охлаждали в термостате до заданной начальной температуры слоя. Действительное значение начальной концентрации адсорбата уточнялось перед началом опыта.

Результаты численного эксперимента показали, что скорость

перемещения первой зоны тепло- и массообмена достаточно велика и для условий эксперимента время прохождения ее через слой высотой 300 мм составит около 10 минут. Поэтому для регистрации режима комбинированной волны особое значение имеет измерение параметров в начальной стадии процесса. Перед началом опыта адсорбер помещался в термостат с целью поддержания заданной начальной температуры слоя T_0 и продувался небольшим количеством воздуха, необходимым для работы приборов "Байкал-1". Приборы считались подготовленными к опыту после установления их показаний на одном уровне, соответствующем начальной концентрации адсорбтива.

Программа физического эксперимента совпадала с программой численного эксперимента.

Все опыты проведены при следующих одинаковых условиях: адсорбент-промышленный синтетический цеолит *NaA* (МРТУ 6-01-906-66); расход воздуха - 2,285 $м^3/ч$; давление в адсорбере $1{,}2 \cdot 10^5$ Па; скорость воздуха, отнесенная к полному сечению адсорбера - 0,278 м/с; температура окружающего воздуха - 293 ± 2 К; гидравлическое сопротивление слоя адсорбента - 324 Па; высота наблюдаемого слоя - 0,15 и 0,3 м.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЙ

В главе сопоставлены результаты численного и физического эксперимента, выявлены зависимости основных характеристик процесса от исходных параметров.

Основным результатом сопоставления расчетных и измеренных величин мы считаем подтверждение физических представлений о характере протекания процесса, которые были заложены в математической модели. Из результатов теоретического и экспериментального исследований следует, что при самых различных сочетаниях исходных параметров в процессе адсорбции водяных паров на цеолите *NaA* наблюдается режим комбинированной волны.

Численный анализ показал, что в режиме комбинированной волны для конкретной совокупности исходных параметров в исследованной области их изменения, могут быть определены основные параметры процесса: скорости перемещения первой u_1 и второй u_2 зон тепло- и массообмена, температура воздуха T_2, концент-

рации адсорбтива C_2 и адсорбата a_2 в промежуточной зоне. Значения этих параметров могут значительно отличаться по величине, в зависимости от значений исходных параметров.

Основным свидетельством реализации режима комбинированной волны в физическом эксперименте является тот факт, что любому изменению температуры в процессе соответствовало изменение концентрации адсорбтива. Это является характерным для обеих зон тепло- и массообмена в режиме комбинированной волны. Кроме того в физическом эксперименте на выходных кривых имеются участки, на которых концентрация адсорбтива остается приблизительно постоянной и отличается от начальной концентрации адсорбтива. Измеренные на этих участках концентрация адсорбтива и температура являются параметрами промежуточной зоны в режиме комбинированной волны. Во всех выполненных нами опытах, условия их проведения предопределяют, в соответствии с известными критериями, реализацию режима одиночной тепловой волны. Однако, нами было теоретически и экспериментально доказано, что в этих условиях реализуется режим комбинированной волны. На наш взгляд это расхождение связано с ограниченной областью применения указанных критериев. Они были получены при условии, что начальная концентрация адсорбата равна нулю, а это возможно лишь теоретически. Поэтому применение этих критериев к реальным процессам приводит к неправильной диагностике типа режима процесса неизотермической адсорбции. Диагностика режимов затруднена и тем обстоятельством, что при низких начальных концентрациях адсорбата параметры режимов комбинированной и одиночной тепловой волны близки друг к другу. Действительно, чем ниже начальная концентрация адсорбата, тем ниже, при прочих равных условиях, концентрация адсорбтива в промежуточной зоне. При недостаточной точности и чувствительности измерительных приборов, процесс осушки воздуха с низкой влажностью воздуха на выходе из адсорбера может субъективно восприниматься как режим одиночной тепловой волны.

Сопоставление результатов численного и физического экспериментов указывает на некоторые количественные расхождения. Во всех опытах экспериментальные значения температуры в промежуточной зоне и скорости второй зоны тепло- и массообмена оказались выше расчетных величин. Основной причиной этого явля-

ется приближенный характер физической модели по сравнению с реальным процессом. Выполнение граничных условий физической модели процесса определяет необходимость проведения экспериментов в бесконечно длинном адсорбере, что на практике осуществить невозможно. В реальных условиях, при конечной длине адсорбера оказалось, что стационарного фронта не образуется. Профили температур и концентраций медленно размываются от сечения к сечению. Различные точки профилей имеют свои скорости.

Таким образом, допущение о квазистационарном режиме является лишь приближенным описанием реального процесса.

Тем не менее результаты численного и физического экспериментов содержат много общего. Например, практически совпадают с расчетными значения скорости первой зоны тепло- и массообмена. Величина этой скорости близка к скорости прогрева слоя чистым газом и мало зависит от исходных параметров. Расчетные и экспериментальные данные показывают что концентрация адсорбата в промежуточной зоне мало отличается от начальной концентрации адсорбата. Это обстоятельство объясняется характером изотерм адсорбции водяных паров на цеолитах.

Поскольку параметры в промежуточной зоне являются равновесными, то концентрация адсорбтива определяется температурой в промежуточной зоне и начальной концентрацией адсорбата.

И действительно, при пересчете концентрации адсорбтива по экспериментальным значениям температуры, экспериментальные и расчетные значения практически совпадали.

Несмотря на расхождения среди расчетных и экспериментальных данных, общим для них является характер изменения температуры в промежуточной зоне от исходных параметров. В области изменения объемной концентрации адсорбтива $C_1 < 0{,}03$ на входе в адсорбер, температура в промежуточной зоне практически линейно зависит от температуры воздуха и концентрации адсорбтива на входе в слой. Линия, аппроксимирующая экспериментальные данные, отличается от расчетной зависимости лишь угловым коэффициентом и может быть описана полуэмпирическим выражением:

$$T_2 = T_1 + 3160 \cdot C_1$$

Анализ и математическая обработка результатов теоретического исследования с учетом особенностей реального процесса, выявленных в экспериментальном исследовании, позволили установить

основные закономерности, взаимосвязь величин и разработать номограмму для определения температуры воздуха и концентрации адсорбтива в промежуточной зоне, приведенную на рис.I. Номограмма обеспечивает возможность определения равновесной концентрации адсорбтива C_2 с относительной погрешностью не более I% и температуры T_2 с точностью до 0,5 К по заданным значениям начальной концентрации адсорбата a_o, концентрации адсорбтива C_1 и температуры воздуха T_1 на входе в слой.

ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИОННОЙ ОСУШКИ ГАЗОВ НА ЦЕОЛИТАХ

В главе приведены инженерные методы расчета адсорберов в условиях неизотермической адсорбции, даны рекомендации по повышению экономичности и качества процесса осушки воздуха.

Разработанная методика расчета распространяется на адсорберы без искусственного охлаждения слоя в режиме осушки. Границы применения методики расчета определяются исследованной областью изменения исходных параметров. При выполнении расчетов исходными данными являются: объемный расход, температура, давление, относительная влажность и теплофизические свойства газа-носителя, начальная температура слоя и концентрация адсорбата, уравнение адсорбционного равновесия , насыпная плотность адсорбента, геометрические размеры адсорбера, пористость слоя.

Основные режимные параметры процесса определяются с помощью номограммы или по разработанной программе на ЭВМ.

Требуемое качество осушки газа может быть достигнуто при различном сочетании значений исходных параметров. Приведены рекомендации , позволяющие определить границы допустимой области изменения этих параметров, в которой гарантирована требуемая степень осушки.

Показано, что путем рационального выбора значения начальной концентрации адсорбата можно добиться повышения экономичности процесса при сохранении требуемой степени осушки. Отмечено, что правильный выбор значения начальной температуры слоя позволяет обеспечить требуемое качество осушки и одновременно снизить продолжительность цикла охлаждения, уменьшить расход

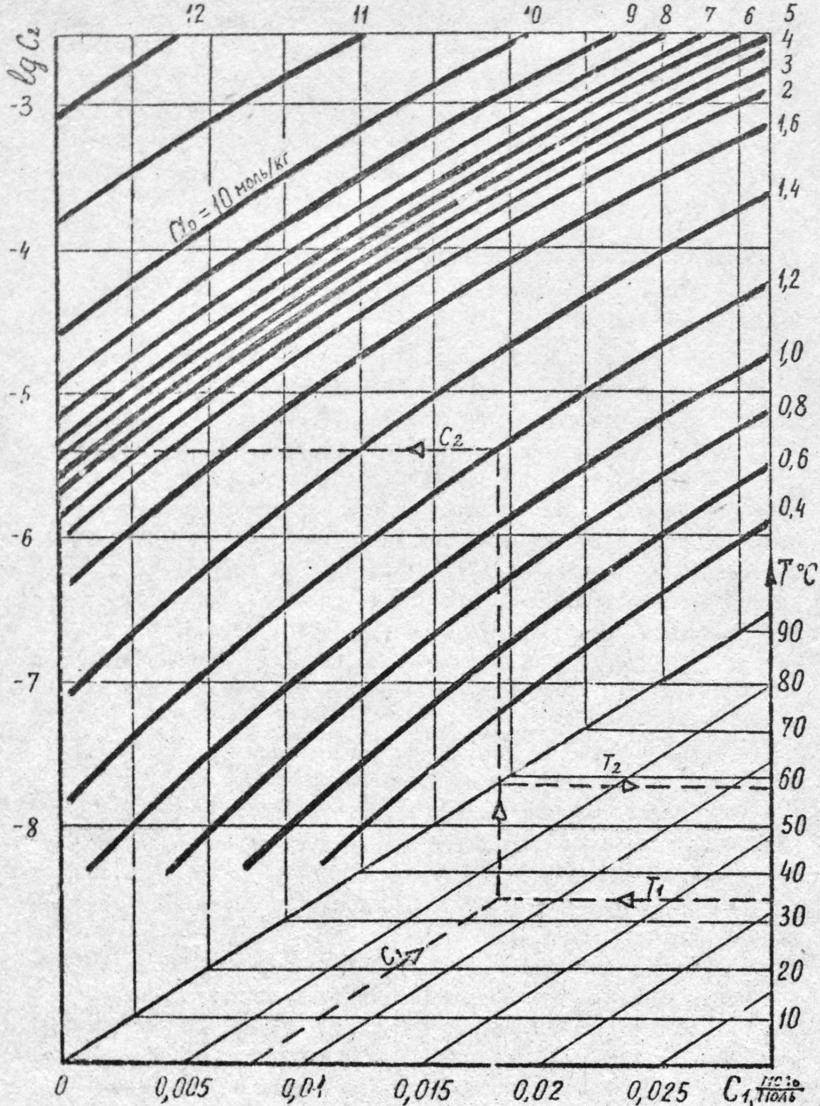


Рис. I Номограмма для определения температуры воздуха T_2 и концентрации водяных паров C_2 в промежуточной зоне

газа на продувку, сократить энергозатраты на охлаждение адсорбента.

ВЫВОДЫ

1. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование динамики неизотермической адсорбции водяных паров неподвижным слоем цеолита *NaA*.

2. Получено асимптотическое решение краевой задачи динамики неизотермической адсорбции водяных паров на цеолитах для режима параллельного переноса при конечных кинетических коэффициентах тепло- и массообмена, позволяющее анализировать зависимости основных параметров процесса от времени и координат.

3. Разработаны и реализованы на ЭВМ методы расчета основных параметров процесса осушки воздуха на цеолите *NaA* в условиях неизотермической адсорбции. Методом численного анализа решения установлен характер зависимости показателей процесса осушки воздуха от исходных параметров: начальной концентрации адсорбата и температуры адсорбента, относительной влажности и температуры осушаемого воздуха.

4. Установлено, что в реальных условиях работы адсорбционных блоков осушки воздуха на цеолитах, при ненулевой начальной концентрации адсорбата, реализуется режим комбинированной волны.

5. Создан экспериментальный стенд и проведены физические опыты по определению основных характеристик процесса неизотермической адсорбции в широком диапазоне изменения исходных параметров.

6. Получено экспериментальное подтверждение характера установленных теоретических зависимостей. Показано, что неизотермичность адсорбции водяных паров на цеолитах обуславливает ступенчатое ухудшение качества осушки воздуха вследствие реализации режима комбинированной волны.

7. Разработана номограмма для определения параметров промежуточной зоны в процессе неизотермической адсорбции водяных паров на цеолите *NaA*, позволяющая подбирать совокупность значений исходных параметров, обеспечивающих заданную степень осушки воздуха и тепловой режим работы адсорбера.

8. В результате проведенного исследования предложены методы расчета динамики неизотермической адсорбции при осушке

воздуха на цеолитах и рекомендации по выбору режимных параметров для процессов адсорбции и десорбции с целью повышения экономичности и качества процесса осушки воздуха.

Результаты настоящей работы переданы и используются в организации, осуществляющей проектирование адсорбционных блоков осушки газов.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Харитонов Б.П. Особенности расчета аппаратов очистки газов от примесей. - Москва, 1978. - 12 с. - Рукопись представлена МВТУ им.Н.Э.Баумана. Деп. в ЦИНТИхимнефтемаш 17 апр. 1978, № 392.
2. Харитонов Б.П., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Исследование процесса адсорбционной осушки воздуха в неизотермических условиях. - Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении: Тез.докл.Всесоюз.науч.-техн.конф. М., 1980, с.8.
3. Харитонов Б.П. Динамика неизотермической адсорбции водяных паров на цеолитах при глубокой осушке воздуха. - Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и криогенной техники: Тез.докл.Всесоюз.науч.-техн. конф. Л., 1981, с.105-106.
4. Харитонов Б.П., Микулин Е.И. Определение параметров процесса неизотермической адсорбции при осушке воздуха на цеолите. - Известия ВУЗов. Машиностроение, 1982, № 1, с.55-60.
5. Харитонов Б.П., Марфенина И.В. Экспериментальное исследование процесса осушки воздуха на цеолите в режиме комбинированной волны. - Известия ВУЗов. Машиностроение, 1982, № 3, с.59-63.

Л - 90665 от 9.02.1982 г.

Заказ 9.77. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

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

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА