

Авторефер
М 48

Н

проф. Грешину А.Т.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

МЕЛЬЦЕР Владимир Леонидович

УДК 621.593.66.074.7

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АДсорбЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА
В ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ВЫСОКОГО И СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ
И СИСТЕМАХ ПРОИЗВОДСТВА СЖАТЫХ ГАЗОВ

Специальность 05.04.03 - Машины и аппараты холодильной
и криогенной техники и систем кондиционирования

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

Одесса - 1989

Работа выполнена в Одесском технологическом институте холодильной промышленности и в Одесском научно-производственном объединении "Исхлодмаш".

Научный руководитель - доктор химических наук,
профессор ЦЫКАЛО А.Д.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор КЛИМЕНКО А.П.
- кандидат химических наук
доцент ПЕТРОСЯН В.П.

Ведущая организация - Институт тепло- и массообмена
АН ВССР имени А.В.Ляхова.

Защита диссертации состоится "28" "Мая" 1989 г.
в 10.00 часов на заседании специализированного совета
К.068.27.01 при Одесском технологическом институте холодильной
промышленности по адресу: 270057, г.Одесса, ул.Петра Великого,
1/3, ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " " " 1989 г.

Учёный секретарь
специализированного совета
т.н., доцент

Р.К.Никулышин

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Принятая на XXVII съезде КПСС программа интенсификации развития народного хозяйства страны направлена на создание новой прогрессивной техники. Выполнение этой программы требует совершенствования технологических процессов в области криогенной воздухоразделительной техники. Рост потребности народного хозяйства в продуктах разделения воздуха, получаемых в виде сухих чистых газов, обуславливает необходимость совершенствования метода глубокой комплексной адсорбционной очистки воздуха перед его низкотемпературным разделением. Развитие авиационной и космической техники потребовало применения адсорбционных методов очистки в системах производства сжатых газов при получении сухого чистого воздуха и продуктов его разделения под давлением до 40 МПа. Исследование адсорбционно-десорбционного цикла БКО позволяет установить рациональные условия ведения процесса и разработать новые методы регенерации адсорбента, обеспечивающие снижение расхода регенерирующего газа (РГ), электроэнергии и продолжительности тепловой обработки слоя.

Отсюда вытекает актуальность комплексного исследования, направленного на совершенствование адсорбционно-десорбционного цикла очистки воздуха, результаты которого могут применяться как для решения задачи криогенного разделения, так и при непосредственном использовании очищенного воздуха.

Цель исследования. Данное исследование направлено на совершенствование адсорбционно-десорбционного цикла комплексной очистки воздуха. Задачами работы являлись:

1. Исследование динамических характеристик цеолита при адсорбции влаги и диоксида углерода из воздуха при давлениях 20...40 МПа.
2. Исследование и расчет всех стадий процесса термической регенерации блоков очистки воздухоразделительных установок среднего и высокого давления, а также разработка перспективного метода интенсивной тепловой обработки слоя адсорбента с уменьшенным расходом регенерирующего газа.

Научная новизна.

1. Установлены значения динамической активности цеолита NaX при одновременной адсорбции влаги и диоксида углерода, а также значения динамической влагоемкости при глубокой осушке воздуха в интервале давлений 20...40 МПа.

xv1226
ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

2. Исследован нестационарный тепло- и массообмен при сбросе давления из цеолитового адсорбера применительно к условиям работы БЮ ВРУ высокого и среднего давления. Показано, что десорбция азота из цеолита в интервале давлений 3,5...0 МПа приводит к значительному снижению температуры слоя.

3. Исследованы нестационарные процессы теплообмена на стадиях нагрева и охлаждения при термической регенерации адсорбента. Экспериментально подтверждено соответствие разработанной математической модели реальному процессу.

4. Предложена и экспериментально доказана возможность применения частичной безнагревной регенерации адсорбента в режиме работы ВРУ высокого и среднего давления как метода повышения надежности установок.

5. Разработан новый метод регенерации адсорбента в режиме саморегулируемых тепловых волн, обеспечивающий снижение энергетических затрат и расхода регенерирующего газа.

Защищаемые научные положения. Организация термической обработки адсорбента в режиме СТВ, когда вынужденный теплоподвод от рас- пределенных по высоте слоя саморегулируемых источников осуществляется по мере продвижения тепловой волны, позволяет значительно уменьшить затраты энергии и РГ в процессе регенерации. Тепловые эффекты, возникающие при изменениях давления в адсорбционно-десорбционном цикле БЮ ВРУ высокого и среднего давления, в значительной мере обусловлены процессами поглощения либо десорбции азота цеолитом в интервале давлений 3,5...0 МПа.

В диссертации защищаются:

1. Результаты экспериментального исследования влияния основных факторов на достигаемую глубину осушки и очистки воздуха от диоксида углерода в интервале давлений 20...40 МПа.

2. Результаты расчетно-экспериментального исследования всех стадий регенерации адсорбента: сброса давления, термической десорбции, охлаждения и безнагревной десорбции.

3. Разработанный метод регенерации адсорбента в режиме саморегулируемых тепловых волн применительно к условиям работы БЮ ВРУ высокого и среднего давления.

Практическая ценность работы.

1. Результаты исследования динамики адсорбции влаги и CO_2 цеолитом NaX при давлениях воздуха до 40 МПа позволили рассчитать

основные параметры блоков очистки для систем производства сжатых газов и дать рекомендации для их проектирования.

2. Результаты комплексного исследования адсорбционно-десорбционного цикла использованы для расчета основных параметров процесса регенерации ряда адсорберов воздухоразделительных установок высокого и среднего давления при их проектировании и в условиях промышленной эксплуатации.

Практическое внедрение результатов работы.

1. Результаты исследования внедрены в НПО "Кислородмаш" при разработке блоков очистки типа АПБО и АДАГ для систем производства сжатых газов, а также цеолитовых блоков очистки воздухоразделительных установок среднего и высокого давления К-0,15; АК-0,6; А-0,6; АК-1,5; К-0,4; КжКАж-0,25; Кж-2.

2. Безнагревная регенерация БЮ внедрена на кислородной станции Киевской ТЭЦ-5 им. 60-летия Советской Украины в условиях промышленной эксплуатации ВРУ.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Республиканском совещании "Математическое моделирование, системный анализ и оптимизация промышленного и транспортного теплообменного оборудования" (Киев, 1976 г.); конференции молодых ученых УНЦО "Кислородмаш", ОП ОТИХП (Одесса, 1977 г.); IX Республиканском семинаре по динамике тепловых процессов (Киев, 1980 г.); 49-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ОТИХП (Одесса, 1980 г.); Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и криогенной техники" (Ленинград, 1981 г.); УП Всесоюзной научно-технической конференции "Криогеника-87" (Москва, 1987 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, получено 3 авторских свидетельства на изобретения.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и приложений. Работа содержит 130 страниц основного текста, 11 таблиц, 38 рисунков. Библиография включает 106 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В диссертации обоснована необходимость совершенствования процесса комплексной адсорбционной очистки воздуха в воздухоразделительных установках высокого и среднего давления и системах произ-

водства сжатых газов, сформулирована цель исследования, определена его актуальность. Показано, что наименее изученными являются вопросы комплексной осушки и очистки при высоких давлениях воздуха. В частности, данные по динамике осушки и очистки компримированного воздуха ранее были получены только для давлений, не превышающих 20 МПа. Недостаточно изученными являются также вопросы, связанные с регенерацией адсорбента. Существующий метод расчета базируется на уравнениях, не позволяющих проследить динамику на всех стадиях процесса, а принятый способ термической обработки сорбента характеризуется высокой степенью необратимости и сопровождается балластным перегревом сорбента и элементов конструкции блока очистки. Полная разобщенность стадий нагрева и охлаждения приводит к увеличению продолжительности цикла регенерации и к перерасходу регенерирующего газа и электроэнергии. Оценка тепловой эффективности термической регенерации БКО ВРУ высокого и среднего давления подтвердила наличие резервов экономии энергии в этом процессе.

На основе выполненного анализа были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Разработать методику и провести экспериментальное исследование динамики адсорбции цеолитом NaX паров воды и CO_2 из влажного воздуха в интервале давлений 20...40 МПа.
2. На основе результатов экспериментального исследования разработать методику расчета стадий регенерации адсорбента с использованием ЭВМ применительно к режимам работы БКО ВРУ и рассчитать основные параметры процесса для ряда адсорберов высокого и среднего давления.
3. Экспериментально определить возможность частичной безнагревной регенерации цеолита в режиме работы ВРУ. Разработать рекомендации по применению безнагревной регенерации в условиях промышленной эксплуатации БКО.
4. Разработать основы перспективного метода регенерации адсорбента в режиме саморегулируемых тепловых волн.

1. Экспериментальное исследование процесса адсорбционной осушки и очистки воздуха в интервале давлений 20...40 МПа

В процессе экспериментального исследования динамики адсорбции осуществлялось снятие выходных кривых, характеризующих изменение концентрации сорбируемого компонента за слоем адсорбента во времени. Опыт длился до получения за слоем заданной проскоковой концентрации с последующей регенерацией адсорбента. Динамическая активность цеолита определялась по уравнению

$$a_g = \frac{Q_B \tau (C_0 - C_{np})}{V P_4} \quad (I)$$

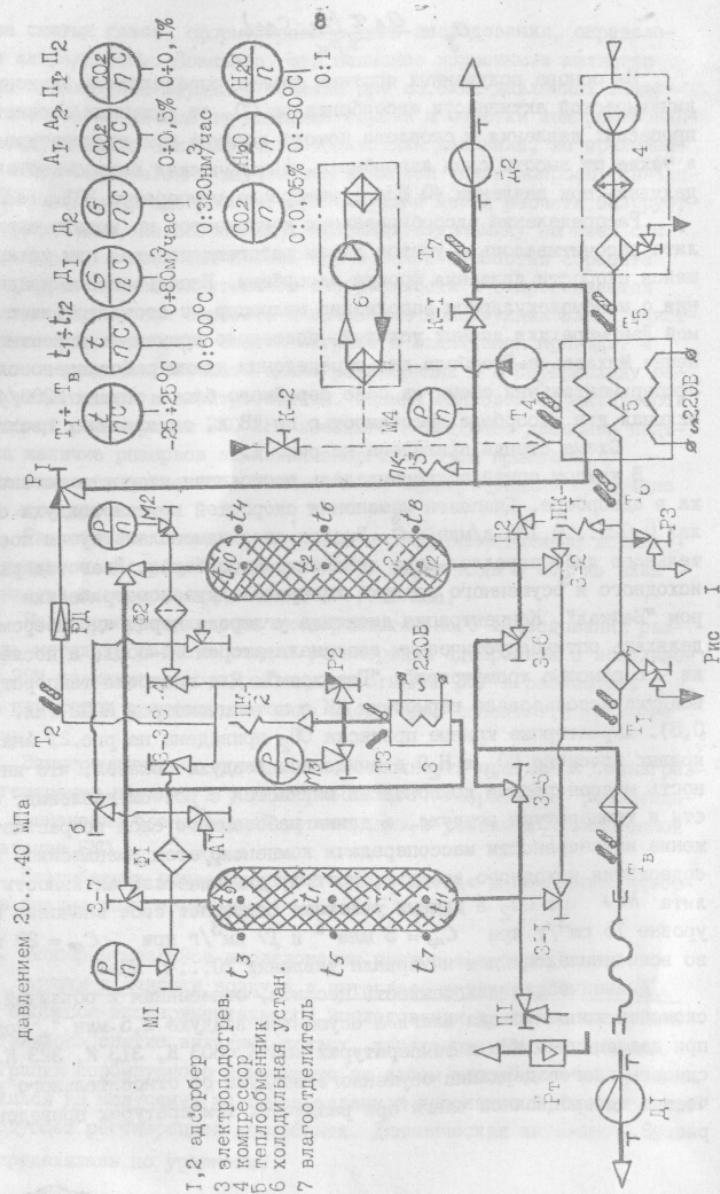
На основе полученных опытных данных определялась зависимость динамической активности адсорбента по CO_2 от режимных параметров процесса: давления и скорости потока воздуха при температуре 280 К, а также от высоты слоя адсорбента. Динамическая влагоемкость определялась при давлении 40 МПа в интервале температур 283...323 К.

Распределение адсорбированных компонентов по высоте слоя цеолита рассчитывалось с учетом длины работающего слоя при установившейся скорости движения фронта адсорбции. Использование предположения о мономолекулярном заполнении микропор, в соответствии с изотермой Ленгмюра для данных условий, позволило применить известное уравнение Михаэлиса-Трейбела для определения длины работающего слоя. Экспериментальный стенд на базе серийного блока осушки У200/400 включал два адсорбера вместимостью по 18 л, заполненных цеолитом NaX . Схема стенда приведена на рис. 1.

В каждом опыте поддерживалась постоянная скорость потока воздуха в адсорбере. Диапазон изменения скоростей потока воздуха составлял 0,025...0,125 л/мин·см². Высота слоя изменялась путем последовательного либо параллельного включения адсорберов. Влаго содержание исходного и осушенного воздуха измерялось кулонометрическим лагомером "Байкал". Концентрация диоксида углерода перед адсорбером определялась оптикоакустическим газоанализатором ОА-5501, а после очистки - с помощью хроматографа "Газохром". Для контроля температуры воздуха использовали термомпары ХК с потенциометром КСП2 (кл. точн. 0,5). Характерные кривые проскока CO_2 приведены на рис. 2. Анализ кривых проскока CO_2 и H_2O в очищенном воздухе показал, что интенсивность массопередачи компонентов снижается с ростом давления, скорости и температуры воздуха, а длина работающего слоя возрастает. Снижение интенсивности массопередачи компенсируется уменьшением влагосодержания исходного воздуха, поэтому динамическая активность цеолита NaX по CO_2 в данных условиях сохраняет свое значение на уровне 15 см³/г при $C_{np} = 5$ млн⁻¹ и 17 см³/г при $C_{np} = 20$ млн⁻¹ во всем исследованном интервале давлений 20...40 МПа.

Динамическая влагоемкость цеолита, отнесенная к объемной проскоковой концентрации влаги в осушенном воздухе 2,5·млн⁻¹, получена при давлении 40 МПа и температурах 283 К, 303 К, 313 К, 323 К. Зависимость влагосодержания осушенного воздуха от относительного количества адсорбционной влаги при различных температурах приведена на рис. 3.

Схема стенда для исследования динамической активности цеолита NaX при очистке воздуха давлением 20...40 атм



Наблюдаемое во всех опытах снижение влагосодержания воздуха в их начальной фазе было связано с осушкой системы трубопроводов стнда.

2. Исследование процесса регенерации адсорбента

Расчет первой стадии регенерации - стадии сброса давления - базируется на математической модели, представленной системой уравнений

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{\kappa-1}{V} \left(\frac{d\bar{Q}}{d\tau} - hG \right), \quad (2)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{T}{P} \left(\frac{dP}{d\tau} + \frac{\kappa-1}{\kappa} \cdot \frac{hG}{V} \right), \quad (3)$$

$$\frac{d\bar{Q}}{d\tau} = -\alpha_0 v (T - T_4) - \alpha_1 F (T - T_8), \quad (4)$$

$$\frac{dT_4}{d\tau} = \alpha_2 (T - T_4) / (1 - \epsilon) \rho_4 C_4' - \frac{\alpha_2 u (T_4 - T_8)}{\int_4 \rho_4 C_4'} - \frac{1}{C_4'} \sum_{i=1}^m \tau_i (d\alpha_i / d\tau), \quad (5)$$

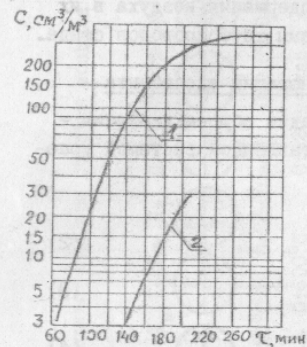
$$\frac{dT_8}{d\tau} = \alpha_1 \epsilon u (T - T_8) / f_8 \rho_8 C_8' + \frac{\alpha_2 u (1 - \epsilon) (T_4 - T_8)}{\rho_8 f_8 C_8'} - q / \rho_8 C_8'. \quad (6)$$

Начальные условия при $\tau=0$ $P(0)=P_{max}$; $T(0)=T_0$; $T_4(0)=T_8(0)=T_0$; $\bar{Q}(0)=0$. Уравнения (2), (3) устанавливают связь между давлением и температурой газа в адсорбере в процессе истечения газа и следуют из первого закона термодинамики для открытых систем. Выражения (4), (5), (6) представляют собой уравнения теплового баланса между газом, адсорбентом и стенками адсорбера с учетом потерь тепла при десорбции. Предварительные расчеты и эксперименты позволили предположить, что основная потеря тепла при снижении давления в адсорбере может быть отнесена к десорбции азота. Приведенные дифференциальные уравнения описывают процесс с сосредоточенными параметрами, поскольку изменение температуры по высоте слоя пренебрежимо мало. Для интегрирования системы уравнений (2)-(6) применен метод Рунге-Кутты с автоматическим выбором шага.

Экспериментальные зависимости изменения температуры слоя адсорбента были получены при сбросе газа из адсорберов вместимостью 18 и 40 л, заполненных цеолитом NaX промышленного зренения.

Расчетные и экспериментальные значения температур газа и адсорбента, а также давления в процессе истечения газа из адсорбера сопоставлены на рис. 4. Установлено, что в процессе истечения воздуха десорбируются незначительные количества воды (не более 0,01%) и CO₂ (до 15% от поглощенных количеств). В связи с этим кривые изменения

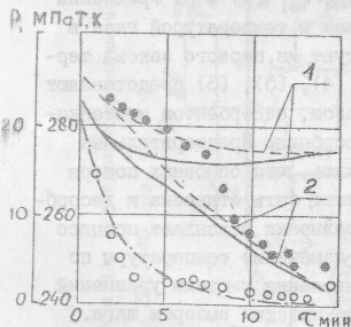
Характерные кривые проскока CO_2 при давлении 40 МПа и скорости воздуха 0,05 л/мин.см²



После первого(1) и второго(2) по ходу воздуха адсорбера

Рис. 2

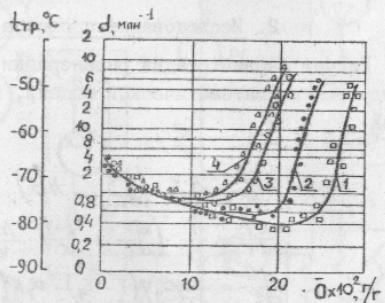
Расчетные и измеренные температуры газа, сорбента и давления газа в процессе истечения из сосуда с цеолитом NaX:



(—) — температура газа, (---) — температура сорбента, (· · ·) — давление газа; 1 — теплообмен, 2 — теплообмен с десорбцией, ● — температура сорбента, □ — давление в сосуде (измеренные значения).

Рис. 4

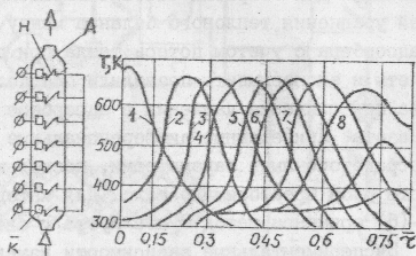
Зависимость влагосодержания, d осушенного воздуха $P = 40$ МПа от относительного количества, \bar{a} адсорбированной влаги при различных температурах (кривые 1-4)



Температура воздуха: Δ — 323 К, \bullet — 313 К, \circ — 303 К, \square — 283 К.

Рис. 3

Незатухающая саморегулируемая тепловая волна в слое цеолита (СТВ)



1-8 кинетические кривые изменения температуры участков сорбента на уровнях 1-8 соответственно; А — адсорбер, Н — нагреватель, К — термистор.

Рис. 5

температуры как для чистого, так и для насыщенного сорбента примерно одинаковы. При давлениях меньших 4 МПа, во всех экспериментах наблюдалось существенное увеличение темпа изменения температуры. Общее падение температуры адсорбента в рассматриваемых условиях составляло 50...60°. Температура адсорбента по высоте слоя изменялась незначительно ($\pm 2^\circ$), температура стенки адсорбера снижалась в процессе истечения газа не более, чем на 3...5°. Результаты исследования позволили установить условия, складывающиеся в адсорбере в конце стадии сброса давления, и тем самым определить начальные параметры второй стадии процесса регенерации — термической десорбции.

Экспериментальные исследования термической десорбции и охлаждения адсорбента проводились на промышленных блоках очистки воздухо-разделительных установок К-0,4; АК-1,5; АК-0,6; К-0,15; КжКАж-0,25; Кж-2 в обычных для них режимах работы. Методика экспериментального исследования включала снятие кривых изменения температуры регенерирующего газа (РГ) до и после адсорбера, температуры слоя адсорбента и стенки адсорбера во времени. В опытах также определялись изменение объемных концентраций CO_2 и влаги в газовом потоке после адсорбера, и измерялась температура окончания десорбции этих компонентов.

Расчет нестационарного процесса нагрева и охлаждения адсорбера с учетом внутренних и внешних источников и потерь теплоты на границе слоя был проведен путем интегрирования системы уравнений теплового баланса РГ, цеолита и стенок адсорбера. Соответствующая система уравнений в частных производных была решена методом конечных разностей с использованием неявной схемы при начальном условии на входе в адсорбер $T_r(0, \tau) = f(\tau)$ и граничных условиях $T_r(x, 0) = \varphi_1(x)$; $T_c(x, 0) = \varphi_2(x)$; $T_s(x, 0) = \varphi_3(x)$. В результате интегрирования были получены зависимости изменения температур РГ, слоя адсорбента и стенок адсорбера во времени по высоте адсорбера. Это позволило проследить динамику разогрева и охлаждения и определить общую продолжительность этих стадий в процессе регенерации.

3. Разработка перспективных методов адсорбционной очистки воздуха

3.1. Метод безнагревной регенерации БКО

Учитывая, что значительное число отказов оборудования обусловлено выходом из строя электронагревателей блоков очистки, целесообразно исследовать возможность частичной регенерации адсорбента хо-

лодным газом. Относительно небольшая удерживающая способность цеолита NaX по отношению к CO_2 и значительный запас адсорбционной емкости по влаге позволили предположить, что кратковременный переход к безнагревной регенерации не окажет существенного влияния на работу ВРУ. Исследования проводили на промышленном блоке очистки в составе ВРУ К-0, 15. Методика исследования предусматривала два варианта безнагревной регенерации. В первом случае адсорберы переключали через 8 часов непрерывной работы. Проскоковое содержание CO_2 в очищенном воздухе линейно возрастало и достигло 15 млн^{-1} . Во втором случае адсорберы переключали, когда проскоковое содержание CO_2 достигало 5 млн^{-1} или 15 млн^{-1} . При этом продолжительность адсорбции от цикла к циклу уменьшалась от 8 до 4,5...5 часов.

Содержание влаги в очищенном воздухе не превышало допустимых пределов. Важно подчеркнуть, что в этих условиях цеолит NaX адсорбирует все углеводороды, опасные для ВРУ. При безнагревной регенерации из цеолита удалялось 95% адсорбированного CO_2 и практически вся свободная влага из лобового слоя адсорбента.

В результате однократной термической регенерации полностью восстанавливались адсорбционные свойства цеолита. Установлено, что безнагревная регенерация обеспечивает резерв времени (~ 24 ч), достаточный для ремонта электрооборудования без остановки блока разделения. Временное резервирование позволило повысить расчетную вероятность безотказной работы ВРУ от 0,66...0,69 до 0,72...0,74. Метод безнагревной регенерации подтвержден опытом промышленной эксплуатации ВРУ.

3.2. Метод регенерации адсорбента в режиме саморегулируемых тепловых волн

Анализ результатов исследования процесса регенерации БКО показал, что традиционно применяемый метод тепловой обработки слоя адсорбента характеризуется большими затратами энергии вследствие необратимого протекания теплообмена и значительных потерь. Необходимость удаления влаги из последней (по ходу РГ) относительно небольшой части слоя обуславливает нагрев всей массы адсорбента, корпуса адсорбера, трубопроводов и арматуры до температуры 643...523 К. При этом полная десорбция CO_2 и углеводородов достигается уже при температуре 373...393 К. Балластный перегрев приводит к увеличению времени охлаждения, а следовательно, и расхода РГ, который в ряде случаев является продукционным. Новый метод тепловой обработки слоя адсорбента в

режиме саморегулируемых тепловых волн в значительной мере устраняет эти недостатки.

Существо метода состоит в том, что разогрев адсорбента осуществляют ступенчато по частям слоя. Вначале нагревают первую (по ходу РГ) часть слоя. В дальнейшем, при продувке, теплота, генерированная в первой части слоя, регенерируется в последующих слоях за счет дополнительного теплоподвода в моменты достижения заданной температуры десорбции. Процесс сводится к продвижению по слою адсорбента высокотемпературной тепловой волны. Интенсификация процесса регенерации достигается за счет уменьшения балластного нагрева и совмещения стадий нагрева и охлаждения адсорбера. Предложен, так называемый, зонный метод регенерации адсорбента в режиме тепловых волн (ТВ), при котором первая (по ходу РГ) зона адсорбции CO_2 нагревается до 373...393 К, а следующая зона поглощения воды регенерируется при температуре 623...673 К. При этом степень совмещения стадий нагрева и охлаждения зависит от длины слоя, которую необходимо охладить после десорбции. Эта часть соответствует половине длины тепловой волны. Длина волны может быть приближенно определена по формуле

$$\delta = \frac{2[\rho L (\frac{T_{max}}{T_{min}}) \sigma_{эф} H/U]^2}{\dots} \quad (7)$$

Относительное время регенерации $\bar{\tau} = \tau_{ТВ} / \tau_p$ (при $\delta > 0$) может быть получено из эмпирического соотношения

$$\bar{\tau} = 0,5 + \delta/4H, \quad (8)$$

где $\tau_{ТВ}$ и τ_p — продолжительности регенерации в режиме тепловых волн и регенерации путем нагрева всего объема, соответственно. Результаты исследования процесса регенерации в режиме тепловых волн, полученные на экспериментальном стенде, иллюстрируются зависимостью на рис. 5. Анализ данных показывает, что реализация метода в БКО ВРУ позволяет сократить продолжительность процесса регенерации на 30-50% и, соответственно уменьшить расход РГ и электроэнергии. Полнота десорбции примесей из цеолита при этом проверялась путем сравнения достигнутых значений адсорбционной емкости цеолита с результатами, полученными при традиционном методе регенерации. Качество регенерации было удовлетворительным. Определенным недостатком метода явилось усложнение конструкции адсорбера. С целью её упрощения разработан способ организации саморегулируемого волнового процесса тепловой обработки слоя адсорбента. Саморегулирование достигалось взаимодействием тепловой волны с датчиком, обеспечивающим определенную зависимость мощности электрического источника тепла от температуры РГ. В диссертации описана физическая модель саморегулируемого процесса

и разработана методика выбора датчика. Разработаны циклограмма и перспективные схемы БКО ВРУ.

3.3. Оптимизация БКО ВРУ высокого и среднего давления

В диссертации приведены методика и результаты оптимизационного расчета БКО ВРУ высокого и среднего давления. Цель расчета состояла в определении оптимальной продолжительности цикла адсорбции-десорбции при заданных давлении, температуре и скорости воздуха, поступающего на очистку, и принятых условиях регенерации. Показателем оптимальности были приняты приведенные затраты

$$П = Э + К/Т, \quad (9)$$

где Э - эксплуатационные расходы, К - капитальные затраты, Т - нормативный срок окупаемости. Экономические показатели определялись после расчета всех составляющих времени адсорбционно-десорбционного цикла. Установлено, что в рассматриваемых условиях оптимальными являются БКО с временем адсорбции 6...8 ч. Результаты оптимизационных расчетов представлены в виде графиков зависимости приведенных затрат от времени адсорбции.

Основной текст диссертации дополнен приложениями, в которых приведены протоколы экспериментов, тексты программ расчетов на ЭВМ и документы, подтверждающие внедрение.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Экспериментальное исследование динамики адсорбции воды и диоксида углерода из влажного воздуха при температуре 280 К в интервале давлений 20...40 МПа при скоростях потока от 0,025 до 0,125 л/мин см² показало, что динамическая активность поглощения CO₂ цеолитом NaX промышленного зёрнения составляет 15...17 см³/г при проскоковой концентрации CO₂ 5...20 млн⁻¹. Рост давления воздуха в изученных условиях сопровождается увеличением длины зоны массопередачи CO₂ и H₂O. При этом значения динамической активности цеолита NaX по CO₂ сохраняются на постоянном уровне за счет снижения исходного влагосодержания воздуха. Динамическая влагоемкость цеолита при давлении воздуха 40 МПа и температурах 283...323 К находится в пределах 0,28...0,18 г/г.

2. Экспериментальное исследование с использованием математических моделей процесса регенерации адсорбента применительно к условиям работы цеолитовых блоков очистки воздухоразделительных установок высокого и среднего давления показало, что при рабочих давлениях воз-

духа цеолитом NaX адсорбируются значительные количества азота. Десорбция азота на стадии сброса газа из адсорбера в интервале давлений 3,5...0 МПа приводит к существенному снижению температуры слоя.

3. Исследование безнагревной регенерации БКО подтвердило возможность повышения надежности воздухоразделительных установок путем частичного восстановления адсорбционной емкости цеолита для временного резервирования. Резерв времени восстановления обеспечивает рост расчетной вероятности безотказной работы установок от 0,66...0,69 до 0,7...0,74.

4. Регенерация адсорбента в режиме саморегулируемых тепловых волн в условиях работы БКО ВРУ высокого и среднего давления приводит к существенному (на 30...50%) уменьшению продолжительности процесса регенерации по сравнению с применяемыми методами нагрева-охлаждения адсорбента. Соответственно, уменьшаются затраты энергии и регенерирующего газа.

5. Выполненные исследования обеспечили создание и внедрение в серийное производство БКО для систем производства сжатых газов. Годовой экономический эффект составил 123 тыс. руб.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях

1. Оптимизация цеолитовых блоков очистки воздухоразделительных установок / В.М.Браун, Г.Е.Вайнштейн, В.Л.Мельцер, В.К.Рыбин // Хим. и нефт. машиностроение.- 1976. Вып. 4.- С. 18-19.
2. Разработка ряда блоков очистки воздухоразделительных установок среднего давления / В.М.Браун, В.Л.Мельцер, Г.Е.Вайнштейн, В.К.Рыбин // Холодил. техника и технология: Респ. межвед. науч.-техн. сб.- 1977.- Вып. 25.- С. 49-52.
3. Браун В.М., Мельцер В.Л., Рыбин В.К. Исследование сепарационной эффективности влагоотделителей с металлокерамическими фильтрующими элементами // Холодил. техника и технология: Респ. межвед. науч.-техн. сб.- 1978.- Вып. 27.- С. 36-38.
4. А.с. 617062 (СССР). Адсорбер / В.Л.Мельцер, И.Я.Вицютко и др.- Заявл. 18.07.77, № 2474612/23-26; опубл. в Б.И., 1978. № 28.
5. Браун В.М., Вайнштейн Г.Е., Мельцер В.Л. Расчет нестационарного теплообмена в коммуникациях и электроподогревателях блоков очистки воздухоразделительных установок // Холодил. техника и технология: Респ. межвед. науч.-техн. сб.- 1979.- Вып. 28.- С. 7-11.
6. А.с. 841654 (СССР). Способ регенерации адсорбента / В.Л.Мельцер, В.М.Браун, Л.Е.Резников, В.К.Рыбин - Заявл. 24.07.79. № 2800679/23-26; опубл. в Б.И., 1981. № 24.

7. Регенерация блоков адсорбционной очистки воздухоразделительных установок в режиме резонансных тепловых волн / И.Я.Бицотко, В.М.Браун, В.Л.Мельцер и др. // В кн.: Конвективный тепло- и массоперенос. Сб. науч. трудов.- Минск. ИТМО АН БССР.- 1979.- С.191-195.
8. А.с. 743760 (СССР). Способ очистки сжатого газа / В.Л.Мельцер, В.М.Браун.- Заявл.24.06.75, №2149132/23-26; опубл. в Б.И.1980. № 24.
9. Исследование безнагревной регенерации цеолитовых блоков очистки воздухоразделительных установок среднего и высокого давления / В.М.Браун, М.Д.Дуцык, Г.И.Романов, В.Л.Мельцер // Хим. нефт. машиностроение.- 1984.- Вып. 5.- С. 26-27.
10. Браун В.М., Вайнштейн Г.Е., Мельцер В.Л. Исследование процесса истечения газа из сосудов с сорбентом // Холодил. техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб.- 1986.- Вып.43.- С.41-45.
11. В.Л.Мельцер, В.М.Браун, А.Л.Цыкало. Исследование динамической активности цеолита NaX при адсорбции двуокиси углерода из влажного воздуха в интервале давлений 20...40 МПа // Холодил.техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб.- 1987.- Вып.45.- С.21-23.
12. Мельцер В.Л., Браун В.М. Исследование регенерации блоков очистки воздухоразделительных установок в режиме саморегулируемых тепловых волн. В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Криогеника-87".- М. МВТУ им. Баумана. 1987.

Основные условные обозначения

Q - количество адсорбированного вещества, α_0 - поверхность гранул в единице объема, $\alpha_{эф}$ - эффективная температуропроводность слоя адсорбента, C_0 - концентрация адсорбтива в исходном воздухе, C' - теплоемкость, $C_{пр}$ - мгновенная (проскоковая) концентрация адсорбтива в очищенном воздухе, d - диаметр сечения адсорбера, E - порозность слоя адсорбента, F - поверхность адсорбера, f_g - площадь поперечного сечения адсорбера, f - площадь поперечного сечения стенки адсорбера, G - массовый расход газа, H - высота слоя адсорбента, h - энтальпия, K - показатель адиабаты, p - давление, Q - объемный расход, \bar{Q} - теплота, q - объемная мощность источников, Z - теплота сорбции, T - абсолютная температура, U - периметр, u - скорость движения тепловой волны, V - объем, w - скорость движения газа, X - координата по потоку газа, α , α_1 , α_2 - коэффициенты теплоотдачи: газ-адсорбент, газ-стенка, адсорбент-стенка, τ - время. Индексы при обозначениях: б - баллон; в - воздух, г - газ, д - динамический, ц - цеолит, i - сорбируемый компонент, m - число сорбируемых компонентов.

xv1226
 ИНСТИТУТ ХОЛОДА
 ОНАХТ
 бібліотека

НПО «КИСЛОРОДМАШ»
 ЗАКАЗ № 526 ТИРАЖ 100