

На правах рукописи

УДК 541.183

КАЗАКОВА АНАСТАСИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СОРБЦИИ АЗОТА И КИСЛОРОДА
НА УГЛЕРОДНО-МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИТАХ,
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АВРУ**

Специальность 05.04.03 – Машины, аппараты и процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования
и жизнеобеспечения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва-2012

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Никифоров Юрий Валентинович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Сморodin Анатолий Иванович

кандидат технических наук
Смирнов Игорь Алексеевич

Ведущая организация:

ОАО НПО «НАУКА»

Защита состоится « 30 » мал 2012 г. в 14³⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д212.141.16 при Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва,
Лефортовская набережная, д.1., корпус факультета «Энергомашиностроение».

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим
высылать по указанному адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан « _____ » апрель 2012 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1997126

Казакова А.А. Исследование

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.141.16
кандидат технических наук, доцент

Колосов М.А.

2481

Актуальность темы. Развитие в России малых и средних предприятий в производственной сфере востребовало простые, автономные установки для получения азота средней и высокой чистоты. Этим требованиям удовлетворяют адсорбционные воздухоразделительные установки (АВРУ). С увеличением их производительности актуальными становятся вопросы сокращения массогабаритных и энергетических показателей.

Настоящая работа направлена на поиск решений для улучшения этих показателей. При этом предлагаемый новый подход заключается в том, что обращено особое внимание на длительность регенерации адсорбента в циклическом режиме работы установки. Расчет АВРУ, как правило, ведут по процессу адсорбции, а режиму десорбции не уделяют должного внимания. Длительности процессов адсорбции и десорбции должны находиться в определенном соотношении. Поэтому, особенно с увеличением производительности АВРУ, необходим надежный расчет процесса десорбции. Математический подход к решению данной проблемы без экспериментальных данных не отвечает на все возникающие вопросы.

Цель работы. Разработка методики расчета АВРУ для получения азота с учетом реальных кинетических факторов протекающих процессов.

Основные задачи.

1. Разработка метода исследования и экспериментальной установки для измерения кинетики десорбции кислорода на различных адсорбентах.
2. Экспериментальное определение кинетических кривых десорбции чистого кислорода и кислорода из воздуха на промышленных образцах адсорбентов типа углеродно-молекулярное сито (УМС).
3. Расчетно-экспериментальное исследование процесса десорбции системы «азот-кислород-УМС».
4. Расчетно-экспериментальное определение области значений длительности процесса адсорбции, в которой достигается максимальное значение преимущественной адсорбции кислорода по отношению к азоту на промышленных адсорбентах типа УМС.
5. Разработка методики расчета АВРУ для получения азота с учетом реальных кинетических факторов протекающих процессов.

Научная новизна.

1. Разработан метод исследования процесса кинетики десорбции кислорода и получены новые экспериментальные данные на промышленных адсорбентах типа УМС, необходимые при расчете АВРУ для получения азота с учетом реальных кинетических факторов протекающих процессов.
2. Показано существование области значений длительности процесса адсорбции смеси «азот-кислород» в интервале от 5 до 40с, в которой достигается максимальное значение преимущественной адсорбции кислорода по отношению к азоту на промышленных адсорбентах типа УМС.

3. Предложена методика расчета скорости безнагревной вакуумной регенерации слоя адсорбента.

4. Предложена методика расчета АВРУ для получения азота с учетом реальных кинетических факторов протекающих процессов.

Практическая значимость работы. Проведены теоретические и экспериментальные исследования кинетики сорбции кислорода и азота на промышленных адсорбентах типа УМС и получены новые экспериментальные данные, необходимые при расчете АВРУ для получения азота с учетом реальных кинетических факторов протекающих процессов. Создан алгоритм расчета АВРУ для получения азота, учитывающий как скорость адсорбции, так и скорость десорбции кислорода и азота. Результаты работы позволяют при расчете и проектировании АВРУ выполнить оптимизацию массогабаритных и энергетических показателей. Предложенная в работе методика расчета длительности регенерации слоя адсорбента может быть применена для расчета кислородных установок данного типа.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается применением аттестованных измерительных средств, апробированных методик измерения и воспроизводимостью результатов. Представленные автором математические модели и соотношения величин базируются на фундаментальных законах и уравнениях физической химии и термодинамики.

Рекомендации к внедрению. Предложенная в работе расчетная методика АВРУ для получения азота может быть использована при проектировании новых типоразмеров установок в научно-производственных компаниях: ООО «Провита», ОАО «Криогенмаш», НПО «Гелиймаш» и др.

Созданная в процессе выполнения работы экспериментальная установка (на базе ГЕОХИ РАН им. В.И. Вернадского) может быть использована в качестве учебного стенда при изучении курса лекций «Автономные системы СЖО» в МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 1 статья в трудах конференции, 3 тезиса доклада, 3 статьи в журналах рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 120 страницах, содержит 34 рисунка, 6 таблиц и состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и 5 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору литературных данных и постановке цели и задач исследования. Рассмотрены основные технологические схемы АВРУ и их показатели, методы расчета адсорбционных процессов. По результатам обзора предложена классификация АВРУ для получения азота.

Для классификации АВРУ в качестве критериев ее построения были выделены:
– технологии разделения воздуха;

- число параллельно работающих адсорбционных аппаратов;
- режим получения продукта (рис.1).

Целесообразность применения безнагревной технологии с плавающим давлением (PSA) в процессах разделения воздуха объясняется сравнительно малой инерционностью процессов сорбции, по сравнению с тепловыми процессами, протекающими в технологии с термической регенерацией (TSA).

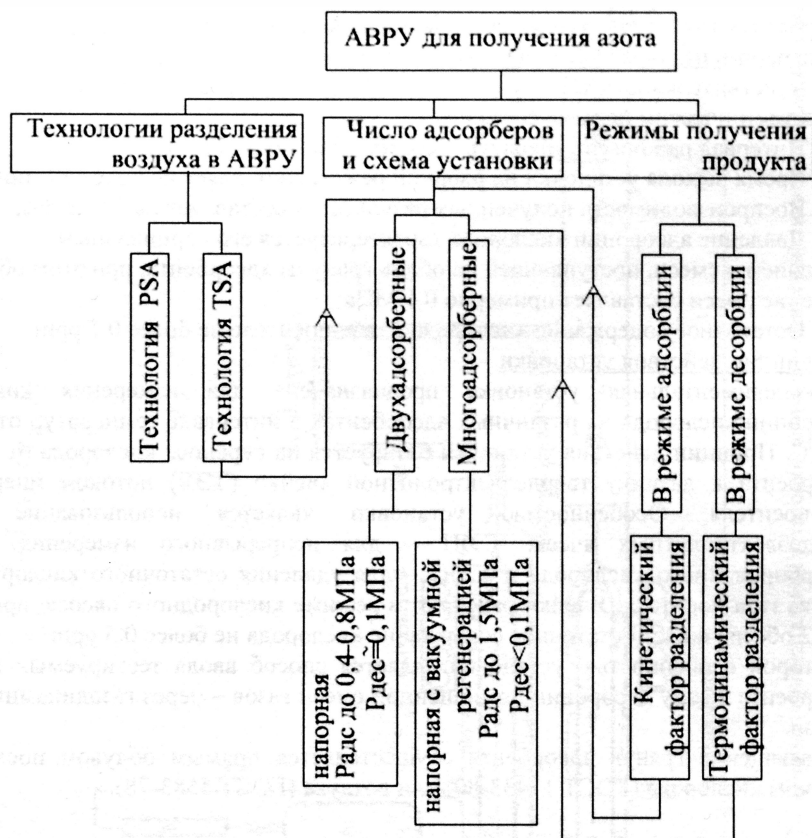


Рис. 1. Классификация АВРУ для получения азота

Для разделения воздуха с целью получения азота используют два типа принципиально различных адсорбционных систем: адсорбционная система с термодинамическим фактором разделения и адсорбционная система с кинетическим фактором разделения.

В случае использования вакуумной регенерации, проблема заключается в определении скорости откачки адсорбата, поэтому выбор средств откачки влияет

на массогабаритные и энергетические параметры установки, а также может оказать заметное влияние на срок службы установки.

По результатам обзора литературы сформулирована цель и задачи исследования.

Во второй главе представлен метод исследования кинетики десорбции кислорода на различных адсорбентах, экспериментальная установка для его реализации и полученные экспериментальные данные на промышленных адсорбентах типа УМС. Схема установки представлена на рис.2.

Экспериментальная установка имеет следующие характеристики:

1. Чувствительность датчика регистрируемого кислорода при работе в кулонометрическом режиме составляет 1..3 мкгО₂/с;
2. Интервал рабочих температур десорбции от 40 до 110 °С;
3. Время выхода установки на рабочий режим составляет не более 30 минут;
4. Воспроизводимость полученных результатов составляет не более 8%;
5. Давление адсорбции кислорода характеризуется его парциальным давлением в смеси, поступающей на обдув гранулы адсорбента, при этом общее давление смеси составляет примерно 0,1 МПа;
6. Остаточное содержание кислорода в газе-носителе не более 0,5 ppm.

Принцип действия установки

Экспериментальная установка предназначена для измерения кинетики десорбции кислорода на различных адсорбентах в интервале температур от 40 до 110 °С. Принцип действия установки базируется на переносе кислорода от пробы адсорбента к датчику твердоэлектrolитной ячейки (ТЭЯ) потоком инертного газа-носителя. Особенностью установки является использование двух твердоэлектrolитных ячеек: ТЭЯ1 – для непрерывного измерения массы десорбированного кислорода и ТЭЯ2 – для удаления остаточного кислорода из потока газа-носителя. Ячейки работают в режиме кислородного насоса, при этом ТЭЯ2 обеспечивает остаточное содержание кислорода не более 0,5 ppm.

Второй особенностью установки является способ ввода тестируемых гранул адсорбента в зону десорбции поглощенной смеси газов – через газодинамический затвор.

Насыщение гранул адсорбента осуществляется прямым обдувом последних потоком кислорода (ГОСТ 17433-80) или воздуха (ГОСТ 5583-78).

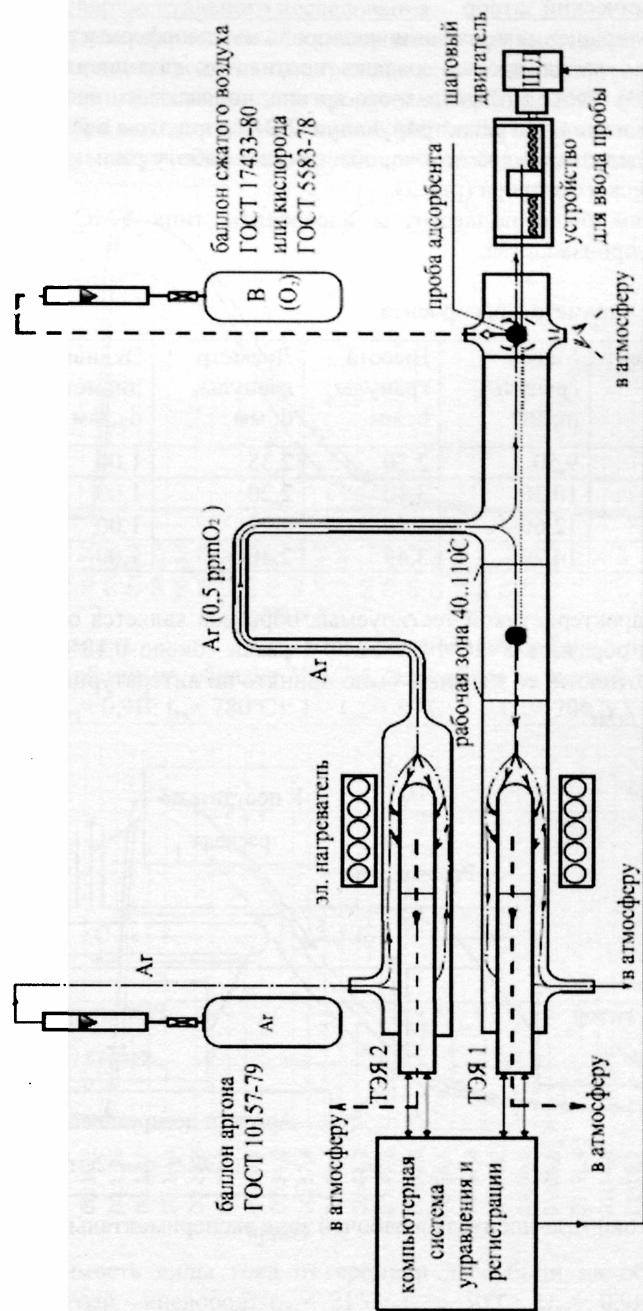


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования кинетики десорбции кислорода

Газодинамический затвор

Для предотвращения попадания кислорода из атмосферы в рабочую зону через отверстие для ввода пробы, создан противоток газа-носителя со скоростью $\sim 2 \text{ см}^3/\text{с}$ (рис.3). Расход газообразного аргона, подаваемого на ТЭЯ2, больше чем расход газа-носителя на регистрирующую ТЭЯ1, при этом очищенный поток газа после ТЭЯ2 делится на два потока, обеспечивая работу регистрирующей ТЭЯ1, и газодинамического затвора (рис.3).

Испытаниям были подвергнуты адсорбенты типа УМС отечественного и зарубежного производства.

Таблица 1.

Основные параметры адсорбента.

№ п/п	Адсорбент	Масса гранулы, т; мг	Высота гранулы, h; мм	Диаметр гранулы, d; мм	Эквивал. диаметр, $d_{\text{э}}$, мм	Удельная поверхн., $f_{\text{уд}}$, $\text{м}^2/\text{м}_{\text{сл}}^3$
1	УМС-1	9,50	2,50	2,35	1,00	1501
2	УМС-2	10,20	3,10	2,20	1,00	1478
3	УМС-3	12,60	3,40	2,25	1,00	1420
4	УМС-4	14,20	3,45	2,40	1,00	1348

Важной характеристикой тестируемых образцов является объем микропор W , который для образцов УМС-1 ... УМС-4 равен около $0,12 \text{ см}^3/\text{г}$ и величина насыпной плотности, ее значение было принято по литературным данным равным $\rho_{\text{нас}} \cong 0,5 \text{ кг} / \text{дм}^3$.

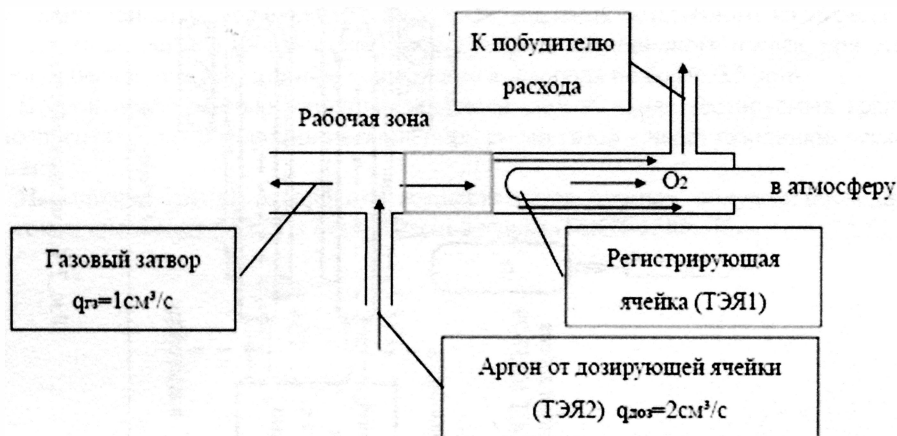


Рис 3. Потоки газа-носителя в рабочей зоне экспериментальной установки

Результаты экспериментального исследования

Экспериментально определены кинетические кривые десорбции чистого кислорода и кислорода из воздуха при трех значениях температуры десорбции 50, 70 и 110°C, и различной длительности процесса адсорбции 20,40 и 60с на четырех промышленных образцах адсорбентов типа УМС (табл. 1.). В качестве примера на рис. 4 - 6 приведены полученные в ходе эксперимента зависимости $I(t)$.

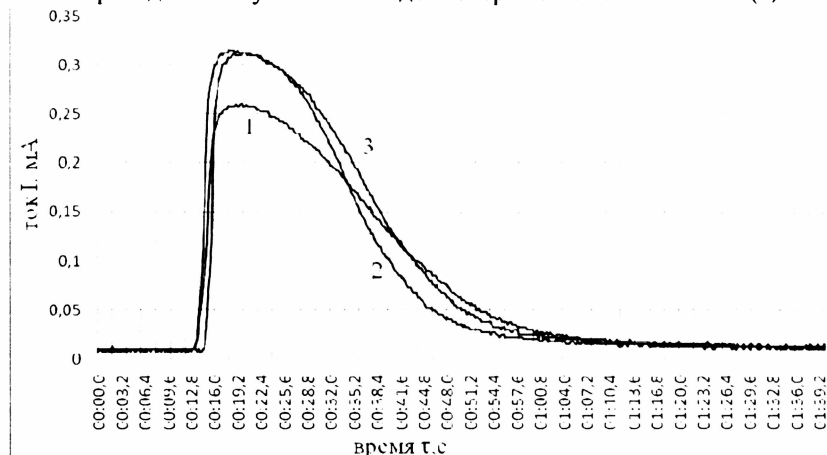


Рис.4. Зависимость силы тока от времени десорбции при различной температуре десорбции на образце УМС-4 (адсорбтив – чистый кислород; $t_{\text{адс}} = 21^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{адс}} = 60\text{с}$; $U_{\text{яч}} = 0,9\text{В}$; $t_{\text{яч}} = 780^\circ\text{C}$): 1 – $t_{\text{дес}} = 50^\circ\text{C}$; 2 – $t_{\text{дес}} = 70^\circ\text{C}$; 3 – $t_{\text{дес}} = 110^\circ\text{C}$

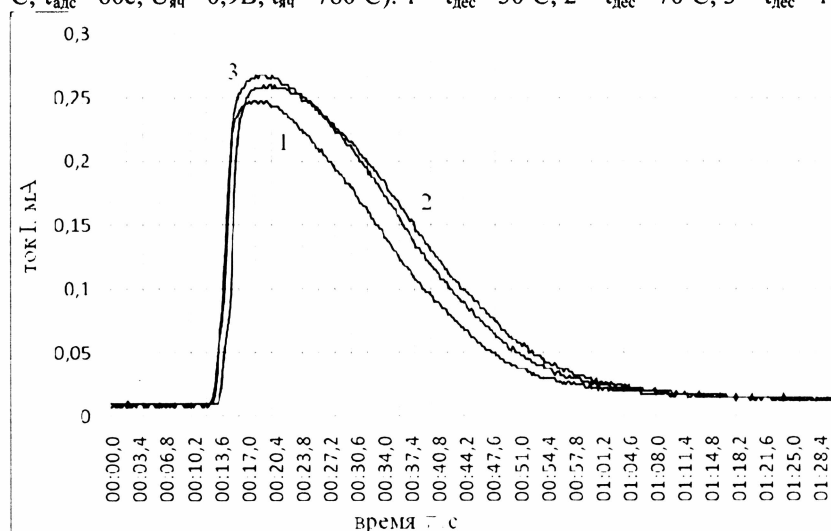


Рис. 5. Зависимость силы тока от времени десорбции на образце УМС-4 (адсорбтив – чистый кислород; $t_{\text{адс}} = 21^\circ\text{C}$; $t_{\text{дес}} = 50^\circ\text{C}$; $U_{\text{яч}} = 0,9\text{В}$; $t_{\text{яч}} = 780^\circ\text{C}$): 1 – $\tau_{\text{адс}} = 20\text{с}$; 2 – $\tau_{\text{адс}} = 40\text{с}$; 3 – $\tau_{\text{адс}} = 60\text{с}$

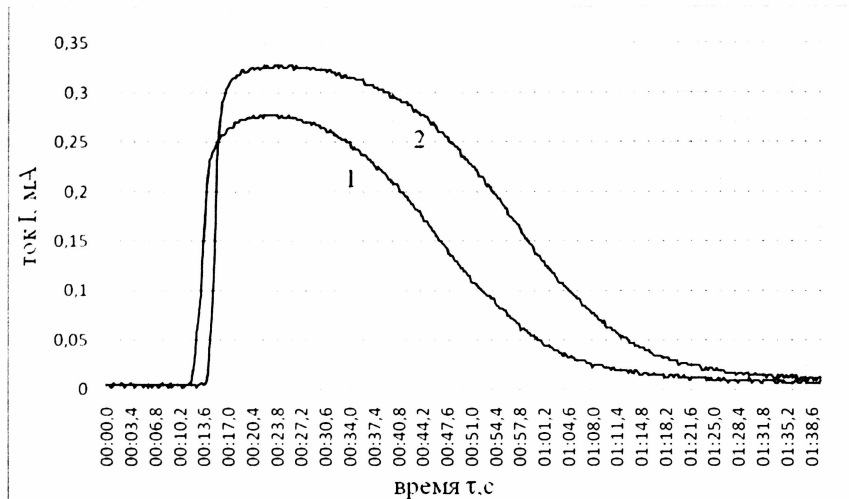


Рис. 6. Кривые десорбции чистого кислорода и кислорода из воздуха на образце УМС-4 ($t_{\text{адс}} = 21^\circ\text{C}$; $t_{\text{дес}} = 70^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{адс}} = 60\text{с}$; $U_{\text{яч}} = 0,9\text{В}$; $t_{\text{яч}} = 780^\circ\text{C}$):
1 – адсорбтив–воздух; 2 – адсорбтив–чистый кислород

Масса кислорода, прошедшего через твердоэлектrolитную ячейку определялась по I и II законам Фарадея:

$$m_{O_2} = \frac{1}{F} \cdot \left(\frac{A}{z} \right) \int_{t_1}^{t_2} (I(\tau) - I_{\phi}) d\tau, \quad (1)$$

где F – постоянная Фарадея ($F = 96500$ Кл/моль); A – атомарная масса, г/моль;
 I_{ϕ} – фоновый ток, мА; $I(\tau)$ – текущее значение силы тока на ТЭЯ1.

Полученная зависимость массы десорбированного кислорода от времени десорбции на образце УМС-4 показана на рис. 7.

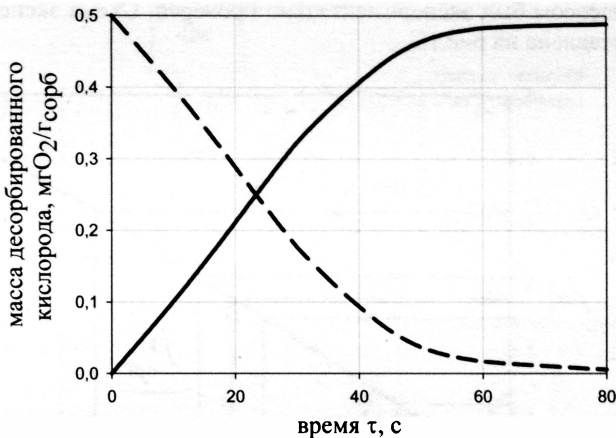


Рис. 7. Зависимость массы десорбированного кислорода от времени десорбции на образце УМС-4 (адсорбтив – чистый кислород; $t_{\text{адс}} = 21^\circ\text{C}$; $t_{\text{дес}} = 50^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{адс}} = 60\text{с}$; $U_{\text{яч}} = 0,9\text{В}$; $t_{\text{яч}} = 780^\circ\text{C}$): сплошная линия – изменение массы десорбированного кислорода в процессе десорбции; пунктирная линия – изменение массы кислорода, находящегося в грануле адсорбента в процессе десорбции.

В третьей главе для разработки методики расчета АВРУ напорных схем с вакуумной регенерацией, было проведено детальное рассмотрение влияния характеристики вакуумного насоса на длительность регенерации слоя адсорбента. Для решения поставленной задачи принято допущение: скорость десорбции бесконечно велика по сравнению со скоростью откачки вакуумного насоса. Графоаналитическим методом была определена длительность откачки вакуумным насосом десорбата по изотерме адсорбции и характеристике насоса.

Для вычисления продолжительности процесса откачки разбиваем интервал значений давления от P_n до P_k на n участков на изотерме адсорбции (рис.8) и характеристике вакуумного насоса (рис.9), и определяем на каждом участке P_{cpi} .

Далее на каждом участке вычисляем интервал времени откачки $\Delta\tau_i$ и суммируем их на всем интервале разбиения от $i=1$ до $i=n$. В развернутом виде уравнение для определения длительности откачки имеет вид:

$$\tau_{\text{отк}} = \frac{P_0}{T_0} \cdot V_{\text{сл}} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{q_{cpi}} \cdot \left(\frac{T_{cpi}}{P_{cpi}} \right) \cdot (\varepsilon + \Delta a_i) \quad (2)$$

Предложенный выше метод расчета продолжительности откачки десорбата вакуумным насосом был экспериментально проверен. Схема экспериментального стенда представлена на рис.10.

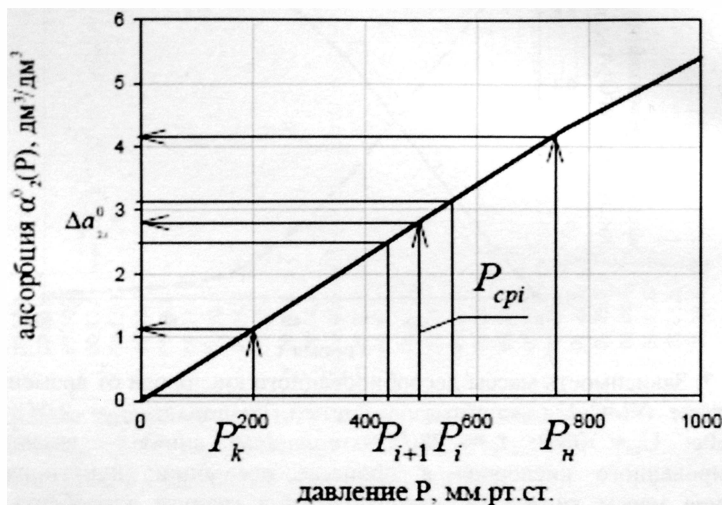


Рис. 8. Изотерма адсорбции азота на цеолите NaX

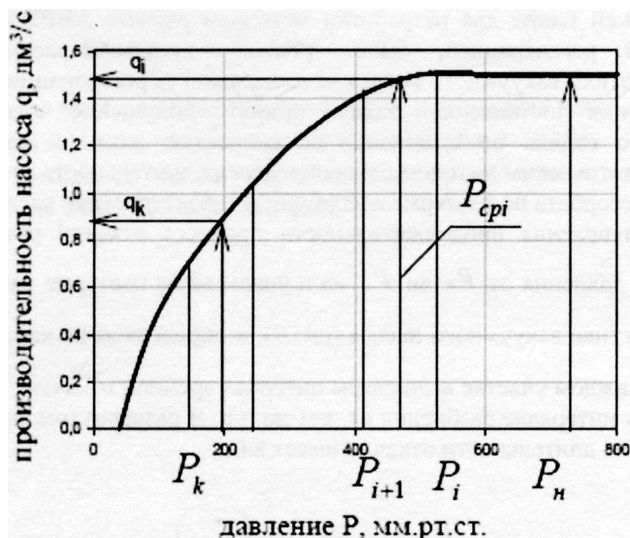


Рис. 9. Рабочая характеристика вакуумного насоса НВМ-05

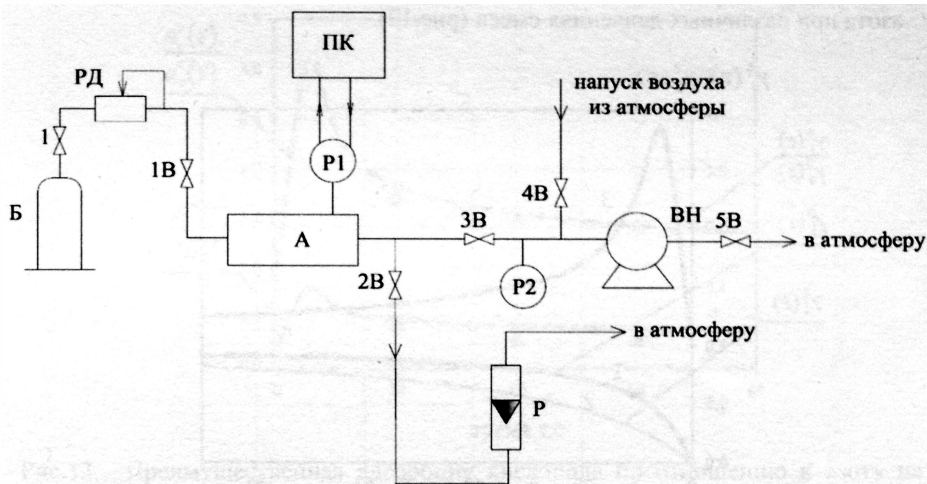


Рис.10. Схема экспериментального стенда:

Б – баллон с азотом (ГОСТ 9292-74); РД – редуктор; А – адсорбер;
 ПК – персональный компьютер, ВН – вакуумный насос, Р – расходомер;
 P1, P2 – мановакуумметры, 1 – вентиль; 1В, 2В, 3В, 4В, 5В – вакуумные вентили

В работе, также рассмотрена методика расчета длительности откачки адсорбата для адсорбционных систем с учетом кинетических факторов протекающих процессов на адсорбентах типа УМС.

В четвертой главе представлен анализ расчетно-теоретического исследования кинетики адсорбции, которое положено в основу разработанной методики расчета АВРУ для получения азота с учетом реальных кинетических факторов протекающих процессов. Методика расчета АВРУ учитывает следующие обнаруженные в результате расчетно-теоретического исследования факты:

- Существование области значений длительности процесса адсорбции в интервале от 5 до 40с, в которой достигается максимальное значение преимущественной адсорбции кислорода по отношению к азоту на промышленных адсорбентах типа УМС (рис.11).
- Мольные доли насыщения адсорбента типа УМС кислородом и азотом практически не зависят от давления в интервале от 0,02МПа до 1,5 МПа. Этот факт подтверждается постоянством теплот адсорбции в данном интервале давлений.

На рис.11, представлены кинетические кривые адсорбции чистых кислорода и азота в указанном интервале давлений, а также показана область значений длительности процесса адсорбции.

По известным методам расчета бинарных смесей были определены парциальные изотермы адсорбции кислорода и азота из воздуха в зависимости от

давления воздуха, что позволило рассчитать кинетические кривые кислорода и азота при различных давлениях смеси (рис.12).

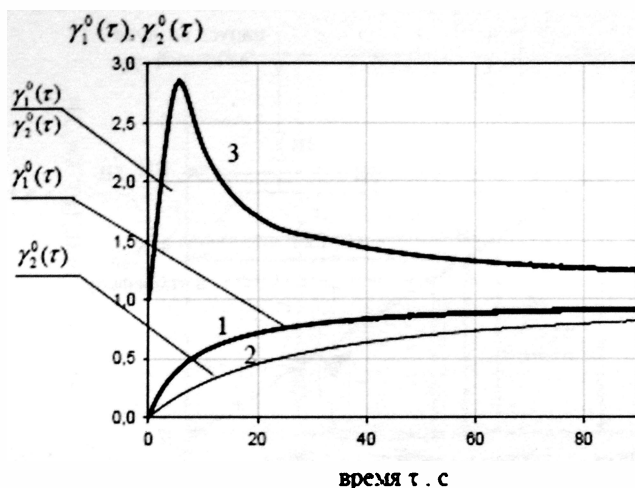


Рис.11. Преимущественная адсорбция кислорода по отношению к азоту на адсорбенте УМС-4: 1 – кинетическая кривая кислорода; 2 – кинетическая кривая азота; 3 – отношение кинетических кривых кислорода к азоту

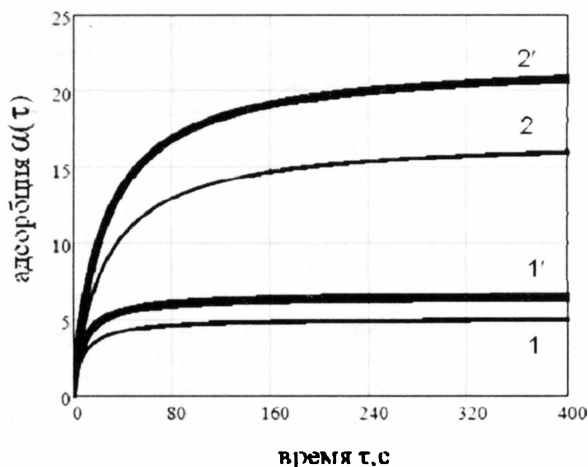


Рис. 12. Кинетические кривые азота и кислорода из воздуха при различном давлении смеси на УМС-4 при $t_{\text{адс}}=21^{\circ}\text{C}$; 1 – кинетическая кривая кислорода при $P_{\text{см}}=0,1$ МПа; 2 – кинетическая кривая азота при $P_{\text{см}}=0,1$ МПа; 1' – кинетическая кривая кислорода при $P_{\text{см}}=1,2$ МПа; 2' – кинетическая кривая азота при $P_{\text{см}}=1,2$ МПа

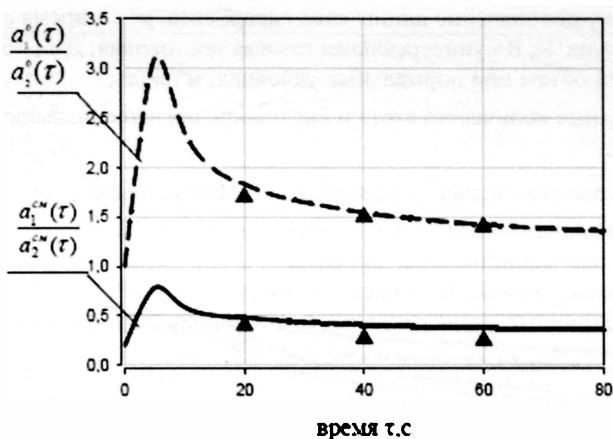


Рис.13. Преимущественная адсорбция кислорода по отношению к азоту на адсорбенте УМС-4: символы – экспериментальные данные; пунктирная линия – расчетная зависимость отношения кинетических кривых чистых кислорода к азоту $P_1=P_2=0,1$ МПа; сплошная линия – расчетная зависимость отношения компонентов в смеси при $P_{см}=0,1$ МПа

Результаты эксперимента по адсорбции чистого кислорода ($P_1=0,1$ МПа) и воздуха ($P_{см}=0,1$ МПа) позволяют проверить расчет экспериментально. Такая проверка была сделана для $\tau = 20$, $\tau = 40$ и $\tau = 60$ с (рис. 13).

Система уравнений математической модели адсорбции методики расчета АВРУ записывается следующим образом:

$$k_1 \cdot \frac{\partial a_1}{\partial \tau} + \varepsilon \frac{\partial c_1}{\partial \tau} + \frac{\partial (wc_1)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$k_2 \cdot \frac{\partial a_2}{\partial \tau} + \varepsilon \frac{\partial c_2}{\partial \tau} + \frac{\partial (wc_2)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$k_1 \cdot \frac{\partial a_1}{\partial \tau} = \beta_{o1} (a_1^* - a_1) \quad (5)$$

$$k_2 \cdot \frac{\partial a_2}{\partial \tau} = \beta_{o2} (a_2^* - a_2) \quad (6)$$

$$y_1 + y_2 = 1 \quad (7)$$

$$c_1 + c_2 = \frac{P}{R_\mu T} \cdot V_\mu \quad (8)$$

$$a_1^0(P) = \frac{A_1^0 \cdot B_1^0 \cdot P}{1 + B_1^0 \cdot P}, \quad a_2^0(P) = \frac{A_2^0 \cdot B_2^0 \cdot P}{1 + B_2^0 \cdot P}, \quad (9)$$

где x – текущее значение длины слоя адсорбента, м; τ – время адсорбции, с;
 T – температура, К; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);
 V_{μ} – мольный объем при нормальных условиях, м³/моль;
 a_1, a_2 – удельные количества азота и кислорода, поглощенные адсорбентом, дм³/г;
 a_1^*, a_2^* – равновесные значения адсорбции по отношению к a_1, a_2 ;
 $\beta_{1,1}, \beta_{2,2}$ – коэффициенты массопередачи азота и кислорода, л/с;
 ε – коэффициент пористости адсорбента;
 y_1, y_2 – объемные доли азота и кислорода в слое;
 k_1, k_2 – коэффициенты, приведения объема адсорбированного газа к нормальным условиям.

Результаты расчетно-экспериментального анализа кинетики адсорбции позволяют заменить кинетические уравнения 5 и 6 поправкой, которая учитывает зависимость парциальной адсорбции компонентов от длительности процесса.

$$a_{1,2}(\tau) \cong a_{1,2}(P) \cdot \gamma_{1,2}^0(\tau) \quad (10)$$

Результаты расчетно-экспериментального исследования показали, что расчет АВРУ необходимо вести не только основываясь на процесс адсорбции, но и учитывая процесс десорбции, поэтому в методику расчета необходимо включить следующие факторы:

- определяющее влияние на длительность процесса регенерации слоя адсорбента оказывает характеристика вакуумного насоса;
- оптимальное соотношение периодов адсорбции и регенерации влияет на габаритные размеры и конструкцию адсорбционного аппарата;
- влияние максимального и минимального давлений воздуха над слоем адсорбента на выбор технологической схемы АВРУ.

Алгоритм расчета АВРУ для получения азота с учетом реальных кинетических факторов протекающих процессов приведен в приложении №5 диссертационной работы.

На рис.14 показано сравнение результатов, предлагаемого расчета объема слоя адсорбента, с результатами расчета по известным уравнениям Акулова-Устинова. В области малых давлений результат предлагаемого расчета имеет меньшие значения объема слоя адсорбента по сравнению с расчетом по известным уравнениям Акулова-Устинова. Это связано с малой величиной адсорбции азота и кислорода (рис.12). С увеличением давления воздуха, величина адсорбции компонентов возрастает и поэтому в интервале значений давлений от 0,6 до 0,8 МПа результаты расчета дают близкие значения, а при дальнейшем увеличении - наблюдается обратная картина.

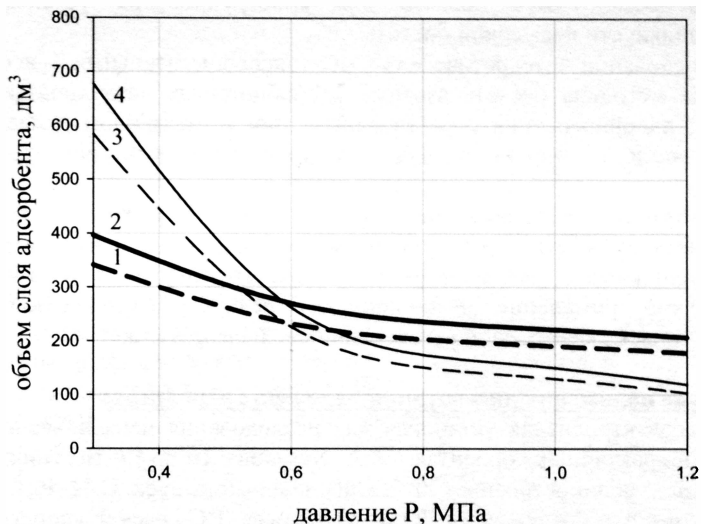


Рис. 14. Сравнение результатов предлагаемого расчета с результатами расчета по известным уравнениям Акулова-Устинова: 1 – предлагаемый расчет для $c_{1к}=0,03\%$; 2 – предлагаемый расчет для $c_{1к}=0,001\%$; 3 – расчет по уравнениям Акулова-Устинова для $c_{1к}=0,03\%$; 4 – расчет по уравнениям Акулова-Устинова для $c_{1к}=0,001\%$

Выводы

1. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования кинетики десорбции адсорбата. Проведено экспериментальное исследование кинетики десорбции кислорода на промышленных адсорбентах типа УМС. Получены кинетические кривые десорбции чистого кислорода и кислорода из воздуха при трех значениях температуры десорбции - 50, 70 и 110°C и различной длительности процесса адсорбции - 20, 40 и 60с. Полученные данные целесообразно использовать при расчете адсорбционных воздухоразделительных установок с учетом реальных кинетических факторов протекающих процессов.

2. Проведены расчетно-экспериментальные исследования длительности процесса вакуумной откачки адсорбата из слоя адсорбента. Предложена методика расчета скорости безнагревной вакуумной регенерации слоя адсорбента.

3. Установлено, что для бинарной смеси газов молярные доли насыщения адсорбента типа УМС кислородом и азотом практически не зависят от давления в интервале от 0,02 до 1,50 МПа. Этот факт подтверждается постоянством теплот адсорбции в данном интервале давлений.

4. Установлено существование области значений длительности процесса адсорбции для смеси «азот-кислород» в интервале от 5 до 40с, в которой достигается максимальное значение преимущественной адсорбции кислорода по

отношению к азоту на промышленных адсорбентах типа УМС. В перспективе этот факт может быть полезен для конструирования установок малой производительности невысокой чистоты.

5. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета азотных адсорбционных воздухоразделительных установок напорного типа с регенерацией при атмосферном давлении и при вакуумировании с учетом реальных кинетических факторов протекающих процессов.

6. Разработанная методика расчета позволяет определить оптимальную технологическую схему адсорбционной установки для получения азота заданной производительности и требуемой чистоты. Так, для получения азота чистотой до 97% возможно применение адсорбционной воздухоразделительной установки напорного типа без вакуумной регенерации слоя адсорбента.

Основные положения диссертации изложены в работах:

1. Твердозлектролитная установка для исследования неравновесной сорбции кислорода на различных сорбентах / А.А. Казакова [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2002. Специальный выпуск. С.42-46.

2. Казакова А.А., Никифоров Ю.В., Дегтярева Т.С. Расчет скорости откачки адсорбционного аппарата по рабочей характеристике вакуумного насоса // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Машиностроение. 2008. Специальный выпуск. С.170-176.

3. Казакова А.А., Никифоров Ю.В., Фомкин А.А. Новый подход к расчету адсорбционных установок для получения азота // Вакуумная техника, материалы и технологии: Материалы V Международной научно-технической конференции / Под ред. С.Б. Нестерова. М.: 2010. С.249-253.

4. Казакова А.А., Никифоров Ю.В., Фомкин А.А. Новый подход к расчету АВРУ для получения азота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2010. Специальный выпуск. С.185-190.

5. Твердозлектролитная установка для исследования неравновесной сорбции кислорода на различных сорбентах / А.А. Казакова [и др.] // Актуальные проблемы аналитической химии: Тезисы докладов Всероссийской конференции. Москва, 2002. Т. 2. С.151-152.

6. Казакова А.А. Влияние стадии десорбции адсорбата на параметры АВРУ (КБА) для получения азота // Будущее машиностроения России: Сборник трудов Третьей Всероссийской конференции. Москва: МГТУ, 2010. С. 191-192.

7. Казакова А.А., Никифоров Ю.В. Исследование кинетики сорбции азота и кислорода на угольных молекулярных ситах // Инновационные разработки в области техники и физики низких температур: Сборник тезисов докладов Международной конференции. Москва: МГУИЭ, 2010. С. 6-7.