

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



Е.И. Борзенко, А.В. Зайцев

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЛОКА АДСОРБЦИИ

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2014

УДК 621.002.73, 662.76.034.2

**Борзенко Е.И., Зайцев А.В.** Автоматизированное проектирование блока адсорбции: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 57 с.

Приведены технологические основы процесса адсорбции. Представлены методики расчета конструктивных параметров адсорберов, а также режимных параметров процессов регенерации адсорбента и охлаждения продувкой или кипением азота. Рассмотрены примеры осушки и очистки. Для полного понимания сущности автоматизации процесса проектирования приведена программа расчета на алгоритмическом языке Фортран.

Предназначено для бакалавров направлений 140700 Ядерная энергетика и теплофизика и 141200 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения всех форм обучения.

**Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.И. Пекарев**

**Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом  
Института холода и биотехнологий**



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2014

© Борзенко Е.И., Зайцев А.В., 2014

## ВВЕДЕНИЕ

В криогенной технике адсорбционные процессы используются при осушке и очистке технологических потоков в воздуходелительных установках, при очистке рабочих газов гелиевых, водородных и неоновых ожижителей и рефрижераторов, при очистке инертных газов от примесей кислорода и т.д.

В современных низкотемпературных воздуходелительных установках очистка и осушка воздуха перед его охлаждением и разделением осуществляется в адсорбционных блоках комплексной очистки. При этом из воздуха удаляют пары воды, диоксид углерода, ацетилен и другие углеводороды. Комплексная высокоэффективная очистка воздуха позволяет увеличить время рабочей кампании установки, т. е. улучшить ее технико-экономические показатели, обеспечить взрывобезопасные условия эксплуатации криогенного оборудования.

Все большее распространение получают установки короткоцикловой адсорбции малой и средней производительности для получения промышленных газов. Адсорбционная очистка газов также широко распространена на нефте- и газоперерабатывающих заводах и промыслах.

Наибольшее распространение получила адсорбционная очистка газа с использованием молекулярных сит (цеолитов). В качестве адсорбента в установках адсорбционной очистки газа используют также активированный уголь; извлекают тиофен, сероуглерод, частично сероокись углерода и дисульфиды. Для очистки газа от сероорганических соединений применяется метод химической адсорбции, основанный на непосредственном связывании удаляемых примесей (при 300–400 °С) твердыми поглотителями на основе окислов цинка, железа и меди.

Достоинствами адсорбционных процессов являются: тонкая очистка газа до 0,1–0,5 мг/м, селективность, несложность работы и простота конструкции аппаратов. Недостатками – возможность использования лишь при низком содержании примесей в исходном газе, трудность обработки газов регенерации, механическое разрушение адсорбента, снижение его активности в процессе эксплуатации, большие потери давления в аппаратах.

В России и за рубежом в последние десятилетия развивается интерес к созданию систем обращения, извлечения и аккумуляции физиологически активных и технически важных газов, таких как  $N_2$ , Ar,  $O_2$ ,  $H_2$ , He, Xe, Kr и др., и в условиях различных температур и давлений для решения задач в медицине, системах жизнеобеспечения человека в экстремальных ситуациях, электронной, космической технике и других областях.

Наряду с традиционными способами решения таких задач, основным из которых является криогенный метод, адсорбционная технология, отличающаяся относительно простой и проработанной конструкцией аппаратов и машин и приемлемыми энергозатратами, является одной из наиболее перспективных и конкурентоспособных технологий.

## ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ АДСОРБЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Адсорбция* представляет собой уплотнение газа, пара или растворенного вещества на поверхности твердого тела, обусловленное физическими силами притяжения (силами Ван-дер-Ваальса). Процесс адсорбции является экзотермическим, т.е. протекает с выделением теплоты и понижением запаса свободной энергии. Непосредственно акт адсорбции происходит практически мгновенно, т.е. со скоростью соударения молекул с поверхностью адсорбента (за  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  с). Этот процесс термодинамически необходим, т.к. любая частица поверхности адсорбента имеет запас свободной энергии, которая способствует процессу адсорбции.

*Адсорбент (сорбент)* – вещество, обладающее избирательными свойствами при поглощении газа.

*Адсорбтив* – поглощаемое вещество, локализованное на поверхности адсорбента или мигрирующее в результате внутренней диффузии по порам сорбента.

*Адсорбат* – поглощаемое вещество (примесь), находящееся в потоке очищаемого газа.

Различают физическую и активированную адсорбцию.

*Физическая адсорбция* обусловлена силами взаимного притяжения молекул, образующих на поверхности один или несколько слоев. Процесс физической адсорбции не требует энергии активации, т.е. каждая молекула, ударяющаяся о поверхность адсорбента, осаждается на ней. Для аполярных молекул, например для инертных газов, определяющее значение будут иметь дисперсионные составляющие, а для паров полярных молекул (вода, аммиак и др.) – электростатические составляющие. Физическая адсорбция полностью обратима.

*Активированная адсорбция* обусловлена главным образом взаимодействием между поверхностью адсорбента и молекулами поглощаемого вещества – адсорбата. При этом взаимодействие бывает настолько существенным, что образуется своеобразное поверхностное соединение мономолекулярного слоя поглощенного вещества – адсорбтива и поверхности адсорбента.

*Капиллярная конденсация* имеет место в случае поглощения паров твердыми телами, имеющими поры определенного размера. Процесс капиллярной конденсации обусловлен образованием жидкой фазы в порах и капиллярах твердого сорбента при поглощении паров веществ.

*Хемосорбция* представляет собой случай поглощения веществ твердым или жидким сорбентом, обусловленный химическими силами взаимодействия и сопровождаемый образованием нового химического соединения, обладающего объемной фазой, т.е. новой кристаллической структурой.

При разделении и очистке криогенных газов обычно используются твердые пористые минеральные и углеродные адсорбенты, с помощью которых осуществляются процессы физической или активированной адсорбции примесей очищаемых газов.

Анализ поведения системы адсорбент–адсорбат показывает, что чем дольше молекулы газа пребывают на поверхности адсорбента, тем больше эффективность процесса адсорбции. Таким образом, выясняется кинетическая картина процесса адсорбции. Если число молекул, попадающих на поверхность, больше числа уходящих, то адсорбция возрастает, если же эти количества равны, то наступает состояние адсорбционного равновесия.

Состоянию равновесия отвечает равновесная величина сорбции и равновесная концентрация  $c$  при условии изотермичности процесса.

*Равновесная величина адсорбции  $a$*  характеризуется количеством поглощенного вещества единицей массы или объема поглотителя при постоянной температуре и установлении равновесия в системе адсорбат–адсорбент. Величина сорбции обычно имеет размерность моль/г, ммоль/г, см<sup>3</sup>/г, кг/м<sup>3</sup>, моль/см<sup>3</sup>, г/см<sup>3</sup>, % массы. Равновесная величина адсорбции зависит от концентрации (парциального давления) поглощаемого вещества, температуры и физико-химических свойств адсорбата и адсорбента. Равновесная величина адсорбции  $a$ , которая также называется адсорбционной способностью или адсорбционной емкостью, является одним из определяющих параметров при проектировании соответствующего оборудования.

Графическое изображение термического уравнения адсорбционного равновесия представляется изотермами адсорбции (рис. 1), описываемыми уравнениями вида

$$a = f(c, T) ; a = f(p, T) .$$

Из рисунка видно, что с повышением температуры равновесная величина адсорбции уменьшается во всем интервале концентраций, меняется и кривизна изотермы адсорбции.

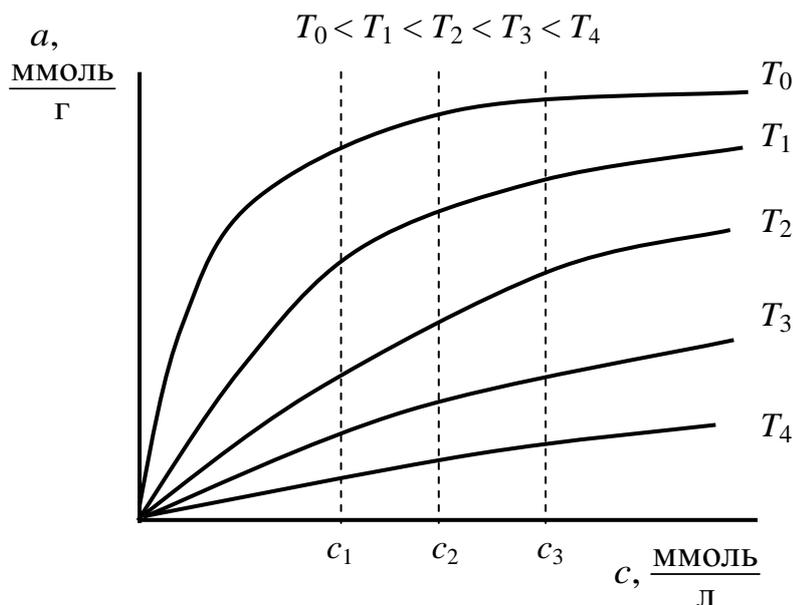


Рис. 1. Изотермы адсорбции

Любой циклически повторяющийся адсорбционный процесс состоит из следующих стадий:

1. Регенерация слоя адсорбента, т. е. удаление внутрикристаллической воды, как правило, методом нагревания слоя адсорбента до определенной температуры.
2. Охлаждение слоя адсорбента до рабочей температуры.
3. Процесс непосредственно адсорбции примесей из потока очищаемого газа.
4. Десорбция адсорбируемых примесей (или снова регенерация в случае осушки) при определенных условиях.

При этом для обеспечения непрерывности процесса необходимо, чтобы соблюдался следующий баланс времени:  $\tau_{ад} \geq \tau_{рег} + \tau_{охл}$ .

Все сорбенты можно разделить на группы: углеродные, минеральные и смешанные. Кроме того, сорбенты классифицируют как синтетические и природные. В криогенной технике наиболее широкое

применение нашли углеродные и синтетические минеральные сорбенты.

По своему строению все сорбенты могут быть разбиты на группы: губчатые, корпускулярные и смешанные. Под пористым телом губчатой структуры понимают тело с каналами, порами, щелями, дефектами, которые образуются путем воздействия химически активных веществ на исходный материал. К губчатым телам относятся активные угли, пористые стекла, цеолиты. Пористая структура корпускулярных тел создается из тонкодисперстных частиц, контактирующих друг с другом. Эти частицы имеют размеры от 10–100 Å до 0,1 мкм.

Особенностью пористой структуры *активного угля* является то, что она содержит разновидности пор с определенными интервалами размеров для каждой из них и отличается, таким образом, от полидисперсных систем, в которых более или менее равномерно представлены поры всех возможных размеров.

Все активные угли обладают относительной гидрофобностью (содержание влаги в них не превышает 3–5 %), поэтому они не используются в качестве осушителей. Пористая структура технических активных углей может быть охарактеризована средними данными, представленными в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристика пористой структуры технических активных углей [1]**

Разновидность пор	Объем пор, $V$ , см <sup>3</sup> /г	Поверхность пор, $S$ , м <sup>2</sup> /г	Основные процессы, происходящие в порах данной разновидности
Макропоры	0,2–0,8	0,5–2,0	Адсорбция
Мезопоры	0,02–0,1 (специальные угли)	20–70 (специальные угли)	Адсорбция, капиллярная конденсация
Микропоры	0,6–0,7 0,2–0,6	200–450 400–900	Адсорбция

В криогенной технике наибольшее распространение получили активные угли типа СКТ и АГ-2 для глубокой очистки гелия, неона, водорода, и других криогенных газов.

Активный уголь БАУ используется для заполнения ацетиленовых баллонов.

Определенный интерес представляет активный уголь ПАУ, предназначенный для адсорбции плохосорбирующихся веществ, имеющих низкую температуру кипения. Следует отметить, что в последние годы появились углеродные молекулярные сита, полученные на основе синтетических терморезистивных полимеров (фенолформальдегидных, фуриловых и др. смол). Эти адсорбенты термостабильны, обладают молекулярно-ситовыми свойствами и весьма перспективны для применения в процессах очистки и разделения криогенных газов.

*Силикагели* и *алюмогели* являются типичными образцами сорбентов с корпускулярной структурой. Силикагель представляет собой высушенную желатинообразную двуокись кремния. Алюмогель и активная окись алюминия представляют собой неполностью дегидратированную высокодисперстную гидроокись алюминия с сильно развитой пористой структурой и большой удельной поверхностью.

В качестве примера в табл. 2 приведены параметры пористой структуры силикагеля.

Таблица 2

**Характеристика пористой структуры технических силикагелей [1]**

Разновидность пор	Объем пор, $V$ , см <sup>3</sup> /г	Поверхность пор, $S$ , м <sup>2</sup> /г	Основные процессы, происходящие в порах данной разновидности
Макропоры	Менее 0,1	Менее 1–2	Адсорбция
Мезопоры	0,1–2,0	200–250	Адсорбция, капиллярная конденсация
Микропоры	0,02–0,4	600–700	Адсорбция

Силикагель и алюмогель являются типичными гидрофильными сорбентами, поэтому широко используются для осушки воздуха и других газов. Кроме того, эти сорбенты применяют для извлечения углеводородов (например, ацетилена) из воздуха в качестве подложки катализаторов и т.п.

*Цеолиты* (в переводе с греческого «кипящие камни») представляют собой кристаллические алюмосиликаты каркасного строения. Различают природные и синтетические цеолиты, причем количество синтезированных типов цеолитов значительно превышает число природных.

Синтетические цеолиты получают в промышленности в виде тонкодисперсных кристаллов размером от 0,1 до 10 мкм.

Цеолиты представляют собой микропористые сорбенты со строго регулярной структурой.

После удаления кристаллизационной влаги в прочном алюмосиликатном скелете цеолита образуются исключительно однородные по размерам поры. Поскольку размеры входных окон во внутренние объемы соизмеримы с размерами молекул цеолита, то их называют молекулярными ситами.

Цеолиты совершенно однородны, т.е. имеют поры только одного размера. Это идеальный геометрически однородный материал регулярной структуры.

Основное различие между цеолитами заключается в размерах входных окон больших полостей, которые могут меняться в пределах от 3 до 9 Å.

В промышленности цеолиты используют в виде гранул, шариков, таблеток и т.п., в которых кристаллический порошок сформован со связующим веществом, обычно глиной (15–25 %). Зазоры между кристалликами образуют вторичную пористую структуру, определяющую кажущуюся плотность и адсорбционные свойства единицы объема гранулированного цеолита. Следует иметь в виду, что адсорбционная емкость гранулированных цеолитов составляет лишь 75–85 % емкости цеолитов без связующего.

В табл. 3 дана характеристика пористой структуры цеолитов.

## Характеристика пористой структуры синтетических цеолитов [1]

Разновидность пор	Объем пор, $V$ , см <sup>3</sup> /г	Поверхность пор, $S$ , м <sup>2</sup> /г	Основные процессы, происходящие в порах данной разновидности
Микропоры (первичная пористость)	0,1–0,3	200–500	Адсорбция
Вторичная пористость	0,2–0,42	6–10	Адсорбция, капиллярная конденсация

Область применения цеолитов чрезвычайно разнообразна. В частности, в криогенной технике для осушки и очистки воздуха от двуокиси углерода используют цеолиты NaX, CaA, для выделения чистого гелия из отработанной дыхательной смеси – NaX, для очистки аргона от примесей кислорода – NaA, NaA-6, для создания вакуума – CaA-4B, для поглощения водорода – CaE-H и т.п.

Следует отметить, что в последнее время в адсорбционных процессах стали использовать новые типы и новые модификации сорбентов. Например, новый адсорбент – пористое стекло – изготовляют из боросиликатного стекла. Оно обладает развитым суммарным объемом пор (от 0,1 до 0,8 см<sup>3</sup>/г) и может быть получено в виде конструктивных элементов [2]. Пористые стекла используют для осушки и разделения газовых смесей. К сравнительно новой модификации традиционных адсорбентов можно отнести углеродные активированные волокна на основе гидратцеллюлозы с размером волокон 6–12 мкм. Такие адсорбенты обладают высокими адсорбционными и кинетическими свойствами и могут быть использованы, в частности, в криогенной технике для разделения и очистки газов и паров.

В настоящее время возможен целенаправленный синтез адсорбентов, которые будут обладать комплексом наиболее важных для конкретной технологии свойств. Каждый тип адсорбента может быть с успехом использован в той области, где его специфические положительные качества будут реализованы с наибольшей полнотой.

Конструктивно в зависимости от времени действия адсорберы разделяются на аппараты периодического и аппараты непрерывного действия. В промышленности применяются в основном вертикальные и горизонтальные адсорбционные аппараты периодического действия с неподвижным слоем адсорбента. В простейшем случае адсорберы выполняются в виде стандартных баллонов с патрубками для подачи и отвода очищаемого или регенерирующего потока. Адсорберы обычно подключаются к криогенным установкам в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, и обеспечивают непрерывную очистку: во время проведения адсорбции в одном баллоне (или группе баллонов) в другом производится регенерация адсорбента.

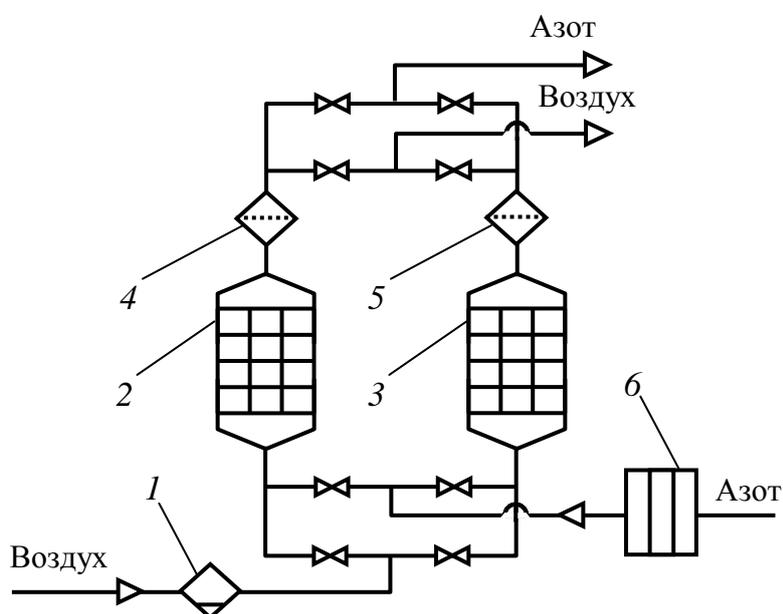


Рис. 2. Схема адсорбционного блока:  
 1 – влагомаслоотделитель; 2, 3 – адсорберы;  
 4, 5 – фильтры; 6 – печь

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА БЛОКА АДсорБЦИИ

При расчете адсорбционных аппаратов различного назначения учитываются статические, кинетические и динамические характеристики процессов адсорбции. Основными характеристиками процессов адсорбции являются: количество поглощенной примеси и скорость поглощения молекул. В связи с этим при изучении любой конкретной системы адсорбент–адсорбат надо учитывать следующие факторы:

- природу адсорбционных сил – энергию и особенности взаимодействия адсорбата и адсорбента;
- природу поверхности адсорбента – химию поверхности, химическое строение поверхности (кристаллохимическую структуру), первичную структуру для цеолитов;
- величину удельной поверхности;
- пористую структуру адсорбента – объем пор в твердом теле, размер пор, форму пор, взаимосвязь пор друг с другом и с внешней средой, распределение объема пор по эффективным радиусам;
- физические и химические свойства адсорбируемых молекул.

При этом следует иметь в виду, что газы адсорбируются тем больше, чем лучше они конденсируются, поэтому пары адсорбируются лучше, чем газы. Чем выше температура кипения адсорбата, тем лучше его адсорбируемость [3].

Одной из основных задач при конструкторском расчете адсорбера является определение адсорбционной способности для конкретных условий протекания процессов. В качестве такой характеристики выступает *динамическая емкость* слоя адсорбента  $a_{\text{дин}}$ , которая зависит от длины зоны массообмена, от проскоковой концентрации примесей и других параметров процесса. При конструкторских расчетах адсорберов при отсутствии экспериментальных данных динамическую емкость следует вычислять через статическую равновесную емкость  $a$  с учетом множества коэффициентов запаса [2, 3]:

$$a_{\text{дин}} = \eta a,$$

где  $\eta$  – степень использования равновесной емкости адсорбента в динамических условиях, обычно принимают  $\eta = 0,85–0,95$  для криоген-

ных адсорбционных блоков и  $\eta = 0,5$  для осушителей влаги. При расчете промышленных блоков осушки динамическую активность (влагоемкость) адсорбентов возможно принимать по рекомендациям [4], в частности для активной окиси алюминия – 4–5 % массы адсорбента.

В свою очередь коэффициент пересчета  $\eta$  можно оценить как комплекс из трех составляющих

$$\eta = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3,$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий снижение статической емкости адсорбента при повышении давления исходной смеси;  $k_2$  – степень использования равновесной емкости адсорбента в динамических условиях;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий снижение статической емкости адсорбента в присутствии влаги. Например, при определении динамической емкости цеолита NaX по  $\text{CO}_2$  принимают  $k_1 = 0,7$  [5];  $k_2 = 0,7$  [2];  $k_3 = 0,7$  [1] и  $\eta = 0,343$ .

Равновесная емкость примеси (адсорбата)  $a$  при заданной температуре и давлении процесса адсорбции может быть получена следующим образом:

- сопроводительная информация предприятий – производителей;
- результаты многочисленных экспериментальных исследований, представленные в виде изотерм адсорбции [1–4; 6–8];
- применение расчетных формул, основанных на различных теориях адсорбции.

### Определение количества примесей и адсорбента

В процессе расчета используются данные при нормальных условиях (заданных как стандартные температура  $T_{н.у} = 273$  К и давление  $p_{н.у} = 0,1013$  МПа) или, при необходимости, данные при условиях процесса адсорбции  $T_{ад}$ ,  $p_{ад}$ .

Количество адсорбируемой примеси (адсорбата) за время  $\tau$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$

$$V_{пр} = Vc_0\tau,$$

где  $V$  – количество очищаемого газа, м<sup>3</sup>/ч;  $c_0$  – количество примеси в очищаемом потоке, % объемн.

Масса удаляемого адсорбата, кг

$$G_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} V_{\text{пр}}.$$

При осушке смеси  $c_0$  – влагосодержание, г Н<sub>2</sub>О/кг смеси, и

$$G_{\text{пр}} = \frac{\rho_{\text{см}} V_{\text{пр}}}{1000},$$

где  $\rho_{\text{см}} = 1 / \sum_{i=1}^n M_i / \rho_i$  – плотность многокомпонентной смеси;  $M_i$  – молекулярный вес чистых компонент, кг/кмоль;  $\rho_i$  – плотность чистых компонент при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>.

Количество адсорбента, загружаемого в один адсорбер, кг

$$G_{\text{ад}} = \frac{V_{\text{пр}}}{a_{\text{дин}}},$$

где  $a_{\text{дин}}$  – динамическая емкость адсорбента по адсорбируемым примесям, см<sup>3</sup>/г.

Равновесная емкость может быть рассчитана с помощью уравнения Дубинина–Радушкевича [2]:

$$\lg a = \lg \frac{W_0}{v^*} - 0,434B \frac{T_{\text{ад}}^2}{\beta_0^2} \left( \lg \frac{p_s}{p_{\text{пр}}} \right)^2.$$

где  $W_0$  и  $B$  – структурные константы уравнения Дубинина–Радушкевича для различных адсорбентов, полученные в стандартных условиях;  $\beta_0$  – коэффициент аффинности – приведены в прил. 2;  $v^*$  – молярный объем предельно адсорбированной примеси, м<sup>3</sup>/кмоль;  $p_s$  – давление насыщенных паров, Па.

Молярный объем предельно адсорбированной примеси  $v^*$  определяется при температуре  $T_{ад}$  из предположения, что плотность вещества в адсорбированном состоянии меняется по линейному закону от температуры кипения  $T_{кип}$  до критической температуры  $T_{кр}$ :

$$v^* = \frac{M}{\rho - \frac{T_{ад} - T_{кип}}{T_{кр} - T_{кип}} (\rho_{кип} - \rho'_{кр})},$$

где  $\rho$  – плотность вещества предельно адсорбированной примеси при температуре  $T_{ад}$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\rho'_{кр}$  – плотность вещества в адсорбированном состоянии при критической температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{кип}$  – то же при температуре кипения, кг/м<sup>3</sup>.

Давление насыщенных паров криогенных веществ  $p_s$  определяется с применением полиномов [2]. Все необходимые для расчета давления насыщения можно аппроксимировать единым уравнением (прил. 2):

$$\lg p_s = \sum_1^5 c_i T^{i-2} + c_6 \lg T + c_{10} T^8.$$

Динамическую  $a_{дин}$  (статическую  $a$ ) емкость адсорбента по примеси в случае отсутствия данных по уравнению адсорбции можно также определять с помощью имеющихся изотерм адсорбции

$$a = f p_{пр}.$$

Парциальное давление примесей  $p_{пр}$  вычисляют с учетом давления адсорбции, МПа

$$p_{пр} = p_{ад} c_0.$$

Объем адсорбента в одном адсорбере, м<sup>3</sup>

$$V_{\text{ад}} = \frac{G_{\text{ад}}}{\rho_{\text{ад}}},$$

где  $\rho_{\text{ад}}$  – насыпная плотность адсорбента (прил. 2).

Геометрические размеры адсорбера рассчитываются, задавая скорость газового потока при условиях адсорбции, отнесенную к полному сечению адсорбера. Пределы изменения скорости согласно литературным данным составляют  $w = 0,1-0,3$  л/(мин·см<sup>2</sup>) или 1–3 м/мин. Рекомендуемые пределы изменения скорости в литературных источниках колеблются от 0,1 до 4 м/мин, но в случае тонкой очистки продукта с целью получения приемлемой конструкции адсорбера возможно изменение скорости потока вне принятых пределов.

### Конструктивные параметры адсорбера

Расход очищаемого газа при рабочих условиях адсорбции, кг/ч

$$V_{\text{ад}} = V \frac{T_{\text{ад}} p_{\text{н.у.}}}{T_{\text{н.у.}} p_{\text{ад}}}.$$

Площадь поперечного сечения адсорбера (живого сечения) определяем из расхода при рабочих условиях, м<sup>2</sup>

$$F = \frac{V_{\text{раб}}}{v},$$

где  $v$  – удельная массовая скорость газа, кг/(м<sup>2</sup>·ч).

Конструктивно адсорбер может быть выполнен в виде баллона, изготовленного из отрезка трубы с учетом приоритетных требований потребителя. Также возможен выбор готового баллона по существующим стандартным типоразмерам баллонов для заданных рабочих давлений. Поэтому после предварительного расчета производится

уточняющий перерасчет и привязка к конкретным стандартным размерам устройства.

Внутренний диаметр адсорбера, м

$$D_{\text{вн}} = 2\sqrt{\frac{F}{\pi}}.$$

Наружный диаметр трубы (баллона) при заданной толщине стенки  $\delta_{\text{ст}}$ , м

$$D_{\text{н}} = D_{\text{вн}} + 2\delta_{\text{ст}}.$$

Внешний диаметр адсорбера подбирается в зависимости от ряда типоразмеров используемых для изготовления труб или готовых баллонов с учетом вычисленных  $D_{\text{н}}$ .

Потребная высота слоя адсорбента, м

$$H = \frac{V_{\text{ад}}}{0,785D_{\text{вн}}^2}.$$

Из полученного значения  $H$  можно получить количество последовательно расположенных адсорберов, если задать ограничение одного адсорбера по высоте  $H_{\text{ад}}$ , или количество параллельно расположенных адсорберов, если допустить уменьшение скорости потока при распределении его по параллельно расположенным адсорберам.

### **Расчет на механическую прочность**

Прочностной расчет адсорбера зависит от его конструкции. Далее для примера из множества возможных конструкций рассматривается сварной адсорбер из цельнотянутой трубы необходимого диаметра. Прочностной расчет такого адсорбера в первую очередь сводится к расчету обечаек, работающих под внутренним давлением. Определение номинальной расчетной толщины стенки  $s'$  таких обечаек производится исходя из прочности и в зависимости от конструкци-

онного материала, базового диаметра обечайки (примем в качестве базового внутренний диаметр  $D_{вн}$ ) и величины отношения заранее известных определяющих параметров: предельного допускаемого напряжения при растяжении  $\sigma_d$  и расчетного давления в аппарате  $p_{ад}$  с учетом коэффициента ослабления обечайки в продольном направлении  $\phi$  за счет сварных швов.

Предельное допускаемое напряжение определяется из выражения

$$\sigma_d = \zeta \sigma_d^*,$$

где  $\zeta$  – поправочный коэффициент, учитывающий условия эксплуатации аппарата;  $\sigma_d^* = \sigma_b / n_b$  – номинальное напряжение, МПа;  $\sigma_b$  – предел прочности материала при растяжении, МПа;  $n_b$  – коэффициент запаса прочности, принимаемый согласно [9]  $n_b = 2,35 - 4,00$ .

При выборе  $\sigma_b$  следует учитывать температурный режим работы обечайки, в том числе в пусковые и испытательные периоды.

Значения  $\zeta$  рекомендуется выбирать исходя из следующих соображений [10]:

– для узлов и деталей аппаратов, предназначенных для обработки или хранения под давлением или без него взрыво- и пожароопасных продуктов, а также продуктов высокой токсичности – с обогревом этих узлов и деталей открытым пламенем, топочными газами или открытыми электронагревателями  $\zeta = 0,9$ ;

– то же, но для необогреваемых узлов и деталей или при обогреве, но с надежной изоляцией их от источников нагрева, а также для узлов и деталей аппаратов, предназначенных для обработки или хранения под давлением или без него всех прочих продуктов с обогревом этих узлов и деталей открытым пламенем, топочными газами или открытыми электронагревателями  $\zeta = 0,95$ ;

– во всех остальных случаях  $\zeta = 1,0$ .

Согласно методике [10] применяют формулы для определения номинальной расчетной толщины стенки  $s'$  цилиндрических металлических вальцованных (сварных) и литых обечаек, работающих под внутренним давлением с учетом коэффициента прочности  $\phi$ :

– для пластичных металлических материалов при  $0,91 \leq \frac{\sigma_d}{P_{ад}} \varphi < 5,5$

$$s' = 0,5D_{вн} + C_k \beta - 1 ,$$

где  $\beta$  – коэффициент толстостенности,  $\beta = \frac{D_H}{D_B + 2C_k}$ ;  $C_k$  – прибавка к

номинальному расчетному размеру на коррозию, зависит от химической проницаемости среды в конструкционный материал и от расчетного срока службы аппарата (если это не оговорено особо, то принимается 10 лет). Например, в случае использования труб из коррозионностойкой стали 08X18H10 принимается  $C_k = 0$  мм;

– для любых материалов при  $5,5 \leq \frac{\sigma_d}{P_{ад}} \varphi < 25$

$$s' = \frac{D_B P_{ад}}{2\sigma_d \varphi - P_{ад}} ;$$

– для любых материалов при  $25 \leq \frac{\sigma_d}{P_{ад}} \varphi$

$$s' = \frac{D_B P_{ад}}{2\sigma_d \varphi} .$$

Для случая сварных соединений  $\varphi$  при невозможности сварки с двух сторон для обечаек с  $D_B \leq 500$  мм для стали углеродистой низколегированной, легированной, высоколегированной и двухслойной коэффициент прочности принимается  $\varphi = 0,8$ . При увеличении диаметра (не более 700 мм) и возможности двухсторонней сварки  $\varphi$  увеличивается до единицы и затем падает до 0,95. Для рассматриваемого случая цельнотянутых труб принимается  $\varphi = 1,0$ .

Окончательно толщина стенки обечайки, мм

$$s = s' + C_k ,$$

причем помимо учета поправки на коррозию  $C_k$  ( $C_k = 0$ ) здесь необходимо дополнительно учесть дополнительные прибавки по технологическим, монтажным и другим соображениям, а также прибавку на округление толщины стенки до ближайшего большего размера по сортаменту.

Допускаемое давление в обечайке, МПа

$$P_d = \frac{2\sigma_d \varphi (s - C_k)}{D_B + s - C_k}.$$

Расчет днища для варианта соединения сваркой плоского днища при работе аппарата под избыточным давлением производится согласно приведенному ниже рис. 3.

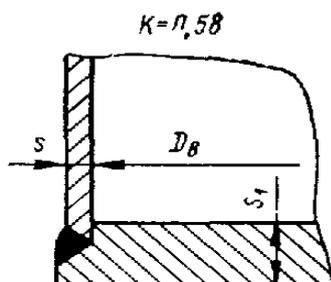


Рис. 3. Сварное соединение днища с обечайкой

Номинальная расчетная толщина стенки плоского неукрепленного ребрами днища  $s'_d$  (мм) определяется по формуле

$$s'_d = \frac{kD_B}{k_0} \sqrt{\frac{P_{ад}}{\sigma_d}},$$

где  $k = 0,58$  – коэффициент конструкции днища;  $k_0$  – коэффициент, учитывающий ослабление днища отверстиями. Для днищ без отверстий принимается  $k_0 = 1$ ; для днищ с одним отверстием диаметром

$d_{\text{отв}}$  принимается –  $k_0 = 1 - 0,43 \frac{d_{\text{отв}}}{D_B}$  при  $\frac{d_{\text{отв}}}{D_B} < 0,35$  и  $k_0 = 0,85$  при  $0,35 \leq \frac{d_{\text{отв}}}{D_B} \leq 0,75$ .

Окончательно толщина днища  $s_d$  определяется аналогично толщине стенки обечайки с учетом всех поправок.

Учет наличия сварного соединения днища с обечайкой производится применением коэффициента ослабления  $\varphi = 0,8$  (вместо  $\sigma_d$  при расчетах используется  $\sigma_d \varphi$ ).

### **Расчет процесса регенерации/десорбции, охлаждения адсорбера продувкой азота, охлаждения адсорбера кипящим азотом**

Для окончательного выбора конструктивных параметров адсорбера следует рассчитать процессы регенерации адсорбента и подготовки адсорбера к следующему рабочему циклу. В различных случаях в качестве рабочего вещества для процессов регенерации (десорбции), охлаждения адсорберов продувкой до температуры окружающей среды, окончательного охлаждения и поддержания рабочего температурного режима азотного адсорбера в качестве рабочего вещества обычно используют газообразный и жидкий азот. Нагрев азота до температуры регенерации производится электронагревателем азота. В процессе регенерации продукты десорбции выводят из адсорбера с помощью форвакуумного насоса.

Средняя температура греющего газа (азота) на выходе из адсорбера

$$T_{a2} = \frac{T_{a2н} + T_{a2к}}{2},$$

где  $T_{a2н}$  и  $T_{a2к}$  – температуры азота на выходе из адсорбера соответственно в начале и в конце регенерации, К.

Количество теплоты, необходимой для нагревания металла адсорбера, кДж

$$Q_1 = G_M c_M T_{M.K} - T_{ад} ,$$

где  $G_M$  – масса баллона с коммуникациями, известна в случае выбора стандартного баллона или вычисляется в случае изготовления адсорбера из куска трубы;  $c_M$  – теплоемкость материала при  $T_{ад}$ ;  $T_{M.K}$  – средняя температура материала в конце процесса регенерации:

$$T_{M.K} = \frac{T_{a1} + T_{a2к}}{2} ,$$

где  $T_{a1}$  – температура азота на входе в адсорбер.

Количество теплоты, затрачиваемой на нагревание адсорбента, кДж

$$Q_2 = G_{ад} c_{ад} T_{M.K} - T_{ад} .$$

Масса примесей (кг), поступающих с очищаемым продуктом в адсорбер и поглощаемых адсорбентом за время  $\tau$  –  $G_{пр} = V \rho_{пр} c_0 \tau$ , определена ранее.

Количество теплоты, затрачиваемой на десорбцию адсорбата из адсорбента (регенерацию адсорбента), кДж

$$Q_3 = G_{пр} c_p T_{кип} - T_{a2н} + G_{пр} \xi_{пр} ,$$

где  $\xi_{пр}$  – теплота десорбции примеси; первое слагаемое – характерно для случая удаления паров воды, когда их предварительно необходимо нагреть до температуры кипения  $T_{кип} = 373$  К.

Масса тепловой изоляции одного адсорбера, кг

$$G_{из} = 0,785 D_{из}^2 - D_H^2 H_{из} \rho_{из} ,$$

где  $H_{из}$  – высота слоя изоляции, предварительно выбирается равной высоте обечайки адсорбера;  $\rho_{из}$  – объемная плотность теплоизоляции.

Количество теплоты, затрачиваемой на нагревание изоляции, кДж

$$Q_4 = G_{\text{из}} c_{\text{из}} T_{\text{из}} - T_{\text{а2н}} ,$$

где  $T_{\text{из}}$  – средняя температура изоляции, К;  $c_{\text{из}}$  – удельная теплоемкость изоляционного материала при  $T_{\text{из}}$ ,

$$T_{\text{из}} = \frac{T_{\text{м.к}} + T_{\text{а2н}}}{2} .$$

Потери теплоты через изоляцию в окружающую среду, кДж

$$Q_5 = \frac{\lambda_{\text{ср}}^{\text{из}} T_{\text{из}} - T_{\text{о.с}} \sqrt{F_1 F_2} \tau_p}{\delta_{\text{из}}} ,$$

где  $\delta_{\text{из}}$  – толщина изоляции,  $\delta_{\text{из}} = D_{\text{из}} - D_{\text{н}} / 2$ ;  $\lambda_{\text{ср}}^{\text{из}}$  – средняя теплопроводность материала изоляции при  $T_{\text{из}}$ ;  $F_1, F_2$  – площади внутренней и внешней поверхности изоляции;  $\tau_p$  – время регенерации. Данная формула дает завышенное значение  $Q_5$ , т. к. не учитывает уменьшение коэффициента теплопередачи через изоляцию к окружающему воздуху из-за малой теплоотдачи от изоляции при естественной конвекции воздуха. Поэтому возможно приблизительно оценить потери в окружающую среду как 20 % от нагрева

$$Q_5 = 0,2 Q_1 + Q_2 + Q_4 .$$

Из теории теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку известно, что существует значение  $\delta_{\text{из}}$ , соответствующее минимуму потерь  $Q_4 + Q_5$ , поскольку с увеличением толщины изоляции происходит рост аккумулируемой изоляцией теплоты и уменьшение теплоты, передаваемое через изоляцию теплопроводностью, и наоборот. Оптимальная величина  $\delta_{\text{из}}$  легко определяется с помощью численного эксперимента.

Расход греющего газа (азота), поступающего противотоком в адсорбер, м<sup>3</sup>/ч

$$V_{N_2} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5}{\rho_{N_2} c_{p N_2} (T_{a1} - T_{a2}) \tau_{пр}}$$

Мощность электроподогревателя азота, кВт

$$N = \frac{k V_{N_2} \rho_{N_2} c_{p N_2} (T_{a1} - T_{o.c})}{3600},$$

где  $k = 1,1$  – коэффициент запаса мощности.

Скорость греющего газа, отнесенная ко всему сечению адсорбера, м/с

$$w_r = \frac{V_{N_2} T_{a1} p_H}{T_H p_{N_2} 0,785 D_{BH}^2 3600},$$

где  $p_{N_2}$  – давление греющего газа.

Теплофизические свойства азота  $p_{N_2}$ ,  $\rho_{N_2}$ ,  $c_{p N_2}$ ,  $\mu_{N_2}$  определяются в соответствии со стандартной методикой [11].

В процессе охлаждения адсорбера продувкой азота после регенерации необходимо отвести аккумулированное количество теплоты, затраченное на нагрев металла  $Q_1$ , на нагрев адсорбента  $Q_2$  и на нагрев изоляции  $Q_4$  с учетом потерь через изоляцию в окружающую среду  $Q_5$ , рассчитываемые по вышеприведенным формулам. Расчет проводится для температурного диапазона от температуры адсорбера в конце процесса регенерации до температуры окончания продувки  $T_{ад2}$ . Для водяного и углекислотного адсорберов  $T_{ад2} = T_{ад}$ . Для азотного адсорбера  $T_{ад2}$  имеет некоторое промежуточное значение  $T_{ад2} > T_{ад}$ , от которого затем следует охладить адсорбер до рабочего уровня  $T_{ад}$  на температурном уровне  $\sim 78$  К, используя жидкий кипя-

щий азот. При этом средняя температура охлаждающего азота при продувке

$$T_{a.c} = \frac{T_{m.k} + T_{ад2}}{2},$$

средняя температура элементов адсорбера

$$T_c = \frac{T_{ад} + T_{ад2}}{2}.$$

Количество кипящего хладагента, необходимое для охлаждения адсорбера от  $T_{ад2}$  до  $T_{ад}$ , кг/ч

$$V_o = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_5}{r_o \tau_o},$$

где  $r_o$  –теплота парообразования азота при  $T_c$ , кДж/кг;  $\tau_o$  – время охлаждения адсорбера кипящим азотом, ч.

После достижения адсорбером рабочей температуры потребное количество жидкого хладагента уменьшится до величины, необходимой для поддержания рабочей температуры в течение времени адсорбции  $\tau$ .

Количество металла, необходимого для изготовления одного адсорбера, с учетом 20 % на трубопроводы, кг

$$G_m = 1,2 G_{об} + 2G_d = 1,2 \pi D_{вн} H \delta_{об} + 2 \cdot 0,785 D_d^2 \delta_d \rho_m,$$

где  $G_{об}$  – масса обечайки;  $G_d$  – масса днища.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ БЛОКА АДСОРБЦИИ

В соответствии с вышеизложенной методикой разработана компьютерная программа для автоматизированного конструкторского расчета блока адсорбции. Вариант текста программы на алгоритмическом языке Fortran приведен в прил. 1. Программа доступна для свободного изменения кода в зависимости от требований и поставленной пользователем задачей и целью.

Для редактирования и применения программы рекомендуется использовать свободно распространяемые редактор SciTE и компилятор gfortran. В результате компиляции программы (см. прил. 1) получается исполнимый (.exe) файл, который при запуске на выполнение использует текстовые файлы ввода данных и вывода результатов. Редактор SciTE имеет возможность гибкой настройки. Далее будем рассматривать использование программы при определенной пользовательской настройке редактора и компилятора.

Рассмотрим состав программы расчета адсорбера. Программа имеет блочную структуру и состоит из одного модуля program и множества модулей subroutine и function. Модули могут располагаться в одном файле или в различных файлах с расширением .f90 или .for. Все такие файлы составляют единый проект и должны располагаться в одной папке. Не относящиеся к проекту фортрановские файлы не рекомендуется размещать в папке проекта, т.к. при компиляции они будут обрабатываться со всеми файлами проекта и могут вызвать ошибки.

Состав программы:

- Файл Adsorb.f90 – головной модуль Adsorb.
- Файл AdDataK.f90 – подпрограмма (процедура) AdDataK – задание конструктивных параметров.
- Файл AdDataA.f90 – процедура AdDataA(na1,na2) – задание и выбор всех необходимых параметров, касающихся адсорбатов и адсорбентов.
- Файл AdInOut.f90 – процедура AdInOut(na1,na2), обеспечивающая ввод информации из исходных (например, текстовых) файлов, подготавливаемых пользователем для конкретного задания на счет.
- Файл AdDez.f90 – процедура AdDez(na1,na2) – расчет конструкции адсорбера (designing).

- Файл AdPro.f90 – процедура AdPro(p,Dvn,Dn) – расчет конструкции адсорбера на прочность.
- Файл AdRDPO.f90 – расчет процессов регенерации/десорбции, продувки и охлаждения адсорбера.
- Файл AdDR.f90 – подпрограмма-функция AdDR(p,T) – расчет адсорбционной емкости по уравнению Дубинина–Радускевича.
- Файл AdIzo.f90 – подпрограмма-функция AdIzo(p,T) – расчет адсорбционной емкости путем аппроксимации изотермы адсорбции.
- Файл RCS.90 – процедура RCS(y1,y2,y3,a,cps,Ros,SM,SL) для расчета теплофизических свойств – теплоемкости, плотности, теплопроводности – трехкомпонентной смеси He–N<sub>2</sub>–O<sub>2</sub> по составу.
- Файл RSCP.90 – процедуры RSN2 и RSAer и подпрограммы-функции CRR(T), CRPS(T), CRRO(P,T,N), CRPDRO(RO,T), CRP(RO,T), CRROL(P,T), CRZ(RO,T), CRCP(RO,T), CP0(T), FMU(RO,T) для расчета теплофизических свойств чистых криопродуктов азота и воздуха, используемых для регенерации, продувки и охлаждения адсорберов кипящим азотом. Эти подпрограммы являются реализацией системы расчета свойств криопродуктов, разработанной на кафедре криогенной техники ИХиБТ в соответствии с [11] и содержатся в пакете прикладных программ КРИАГ.
- Файл prog.exe – скомпилированная программа. Имя файла может быть изменено и файл вместе с файлами исходных данных может быть перенесен в любое место. Там же в результате выполнения этого файла будет создан файл результатов.
- Файлы ввода данных и вывода результатов – файлы, определенные пользователем в головном модуле Adsorb (для удобства применяем текстовые файлы), например AdDataH2O.txt, AdDataCO2.txt, AdDataN2.txt, AdRez.txt.

В текст программы введены подробные комментарии на русском языке, позволяющие идентифицировать все переменные в соответствии с формулами, приведенными выше.

Для компиляции программы после внесенных изменений с применением редактора SciTE следует, не выходя из редактора, выбрать команду *Собрать* в меню Сервис, функциональную клавишу F7 на клавиатуре или использовать соответствующую кнопку на панели инструментов. Измененные файлы, в том числе с данными, перед компиляцией необходимо сохранить (текущий файл сохраняется автоматически). Для запуска на счет после компиляции используется

команда *Выполнить*, клавиша F5 или кнопка на панели инструментов. Редактировать любые файлы можно с помощью любых других программ, например – Блокнота. Описание языка программирования Фортран-90 имеется, например, в [12, 13].

Гибкая структура программы позволяет использовать ее как для конструкторских расчетов, так и для поисковых оптимизационных расчетов.

В процессе расчетов некоторые сообщения о полученных результатах выдаются на экран монитора, что позволяет находить необходимое решение в интерактивном режиме. Количество таких сообщений и возможная реакция пользователя могут быть изменены при дальнейшей адаптации программы к конкретным требованиям пользователя.

Главной модуль *Adsorb* предназначен для вызова различных подпрограмм в определенной последовательности, определяющих задачу, поставленную проектировщиком. В этом модуле с помощью оператора `open(1,file='имя файла')` задаются имена файлов с исходными данными, а оператором `open(9,file='имя файла')` – создаваемые в результате выполнения программы файлы. Перед открытием нового файла следует с помощью оператора `close(1)` или `close(9)` закрыть открытые файлы.

Вызов различных подпрограмм производится оператором `call`. Следует соблюдать определенную последовательность при вызове подпрограмм. Загрузка конструктивных характеристик производится модулем *AdDataK*, выполняемым до вызова любых других модулей. Исходные данные, в том числе тип адсорбата и тип адсорбента, загружаются из файлов данных модулем *AdInOut*, а все параметры адсорбатов и адсорбентов в соответствии с этими типами загружаются из файла *AdDataA*. В подпрограммах *AdDez* и *AdRDPO* производятся соответственно конструкторский расчет адсорбера и расчет параметров регенерации/десорбции адсорбента, продувки с целью охлаждения адсорбера газообразным азотом, охлаждения адсорбера кипящим азотом.

В файлах исходных данных *AdDataH2O.txt*, *AdDataCO2.txt*, *AdDataN2.txt* первые 6 строчек предназначены для информации и не используются в программе. Все числовые данные вводятся построчно, в строке между числами можно вводить произвольное количество пробелов.

В первой строке данных (в седьмой строке) вводится параметр

управления вводом данных. Если этот параметр (целое число без десятичной точки) равен 1, то при последующих запусках программы данные будут автоматически считываться из этого файла. В противном случае данные следует вводить в процессе диалога, используя пробелы между числами и клавишу Enter для перехода на новую запись (строчку). Данный параметр можно изменить, только отредактировав файл исходных данных.

Во второй строке вводятся 2 целых числа: первое – тип адсорбата (1 – пары воды, процесс осушки; 2 – двуокись углерода  $\text{CO}_2$ ; 3 – азот  $\text{N}_2$ ), второе – тип адсорбента (1 – активная окись алюминия; 2 – цеолит NaX; 3 – цеолит CaA; 4 – активный уголь СКТ-4).

В третьей строке – режимные параметры адсорбции: расход очищаемой смеси; рабочее давление в адсорбере; температура адсорбции; концентрация примесей; продолжительность процесса адсорбции.

В четвертой строке – температура газообразного азота на входе в электронагреватель для дальнейшей подачи в адсорбер на регенерацию; температура горячего азота на входе в адсорбер; температуры азота на выходе из адсорбера в начале процесса регенерации и в конце этого процесса; продолжительность процесса регенерации.

В пятой строчке вводится температура адсорбера в конце процесса продувки адсорбера, продолжительность процесса охлаждения адсорбера продувкой азота, продолжительность процесса охлаждения адсорбера кипящим жидким азотом. Если время процесса кипения задано равным 0, этот процесс исключается из расчета.

### Примеры расчета адсорбера

*Расчет адсорбера для удаления влаги из потока.*

Содержимое файла исходных данных AdDataH2O.txt:

1 ввод данных(1-из этого файла, 2-вручную+запись в этот файл)  
2 адсорбат(1- $\text{H}_2\text{O}$ ,2- $\text{CO}_2$ ,3- $\text{N}_2$ ); адсорбент(1-АОА,2-NaX,3-CaA,4-СКТ-4)  
3 расход,куб.м/ч; давл.,МПа; темп.,К; примесь,%об.; время адсорбции,ч  
4 Т азота рег.вх.эл.нагр.; вх.адсорб.; вых.нач.; вых.кон.; время рег./десорб.  
5 Т прдувки кон.; время продувки; время кипения

-----  
1  
1        1  
42.5    8.    313.    1.3    5.12

293 553. 293. 400. 3.  
300. 3. 0.

### Содержимое головного модуля Adsorb:

program Adsorb

```
open(9,file='AdRez.txt') !открытие файла для результатов расчета
call AdDataK !загрузка конструктивных характеристик
!-----открытие файла с исходными данными
open(1,file='AdDataH2O.txt')
!open(1,file='AdDataCO2(NaX).txt')
!open(1,file='AdDataCO2(CaA).txt')
!open(1,file='AdDataCO2(CKT-4).txt')
!open(1,file='AdDataN2.txt')
call AdInOut(na1,na2) !ввод данных из AdData...txt или вручную (и в файл)
close(1) !закрытие файла данных
call AdDataA(na1,na2) !загрузка характеристик адсорбата-адсорбента
call AdDez(na1,na2) !расчет адсорбции; конструкторский расчет
call AdRDPO !расчет регенерации/десорбции/продувки/охлаждения

print*, 'н бзГв § €@-зГ-';read*
end
```

### Содержимое файла результатов AdRez.txt:

#### И С Х О Д Н Ы Е Д А Н Н Ы Е :

=====

Адсорбат - пары воды (H2O)	
Адсорбент - активная окись алюминия	
Расход очищаемого потока, куб.м/ч	42.500
Давление адсорбции, МПа	8.00
Температура на входе в адсорбер, К	278.00
Количество примеси, г/кг	0.001
Время адсорбции, ч	5.12
Т потока при рег./десорбции на вх. в эл. нагрев.,	293.00
Т потока при рег./десорбции на входе в адсорбер,	553.00
Т потока на выходе в начале рег./десорбции, К	293.00
Т потока на выходе в конце рег./десорбции, К	400.00
Время регенерации/десорбции, ч	3.00
Т адсорбера в конце продувки, К	300.00
Время охлаждения продувкой, ч	3.00

#### Р Е З У Л Ь Т А Т Ы Р А С Ч Е Т А :

=====

Масса влаги, кг	0.342
Динамическая емкость адсорбента, г/г	0.070
Расход смеси при рабочих условиях, куб.м/ч	0.548

Масса адсорбента, кг	4.892
Объем адсорбента, куб.м	0.0089
Параметры подходящей трубы по ГОСТ 9940-81	
-----	
Номер строки в таблице с выбранной трубой	1
Количество баллонов, шт.	1
Скорость потока в адсорбере, м/мин	1.374
Расчетная высота слоя, м	1.339
Наружный диаметр, мм	102.000
Выбранная толщина стенки обечайки, мм	5.000
Расчетный объем обечайки, л	9.559
Параметры прочностного расчета обечайки	
-----	
Предел прочности материала (490...1710 мПа)	490.0
Коэффициент запаса прочности (2,35...4,00)	3.00
Поправка на условия эксплуатации (0,9...1,0)	1.0
Коэффициент ослабления из-за пайки (0,8...1,0)	0.0
Прибавка на коррозию (от 1 мм)	0.0
Расчетная толщина стенки обечайки, мм	2.310
Расчетная толщина стенки плоского днища, мм	8.700
-----	
Масса баллона с коммуникациями, кг	19.873
Масса изоляции, кг	3.635
Регенерация/десорбция:	
-----	
Средняя Т потока на выходе, К	346.500
Средняя Т металла в конце регенерации, К	476.500
Средняя Т изоляции в конце регенерации, К	384.750
Потребное количество теплоты, кДж:	
на нагрев металла	2130.165
на нагрев адсорбента	1019.564
на регенерацию/десорбцию	963.217
на нагрев изоляции	233.461
через изоляцию в окр. среду	758.977
Расход потока, куб.м/ч	6.351
Мощность электроподогревателя, кВт	0.655
Скорость потока (н.у.), м/с	0.363
Охлаждение адсорбера продувкой потока:	
-----	
Средняя Т охлаждающего потока, К	388.250
Аккумулированное количество теплоты, кДж:	
на нагрев металла	1894.077
на нагрев адсорбента	906.565

на нагрев изоляции	215.649
Потери через изоляцию в окр. среду, кДж	758.977
Расход охлаждающего азота, куб.м/ч	6.253
Скорость охлаждающего азота, м/с	0.261

*Расчет адсорбера для очистки от примеси азота.*

Содержимое файла результатов AdRez.txt:

И С Х О Д Н Ы Е   Д А Н Н Ы Е :

=====

Адсорбат - азот (N2)	
Адсорбент - активный уголь СКТ-4	
Расход очищаемого потока, куб.м/ч	20.078
Давление адсорбции, МПа	8.00
Температура на входе в адсорбер, К	80.40
Количество примеси, % об.	1.816
Время адсорбции, ч	5.12
Т потока при рег./десорбции на вх. в эл. нагрев.,	293.00
Т потока при рег./десорбции на входе в адсорбер,	450.00
Т потока на выходе в начале рег./десорбции, К	293.00
Т потока на выходе в конце рег./десорбции, К	433.00
Время регенерации/десорбции, ч	3.00
Т адсорбера в конце продувки, К	300.00
Время охлаждения продувкой, ч	3.00
Время оконч. охлаждения кипением, ч	3.00

Р Е З У Л Ь Т А Т Ы   Р А С Ч Е Т А :

=====

Количество примеси, куб.м	1.8668
Масса примеси, кг	2.175
Парциальное давление примеси, кПа	145.280
Динамическая емкость адсорбента, куб.см/г	289.441
Расход смеси при рабочих условиях, куб.м/ч	0.075
Масса адсорбента, кг	6.450
Объем адсорбента, куб.м	0.0150

Параметры подходящей трубы по ГОСТ 9940-81

-----

Номер строки в таблице с выбранной трубой	16
Количество баллонов, шт.	1
Скорость потока в адсорбере, м/мин	0.129
Расчетная высота слоя, м	1.551
Наружный диаметр, мм	121.000
Выбранная толщина стенки обечайки, мм	5.000
Расчетный объем обечайки, л	15.967

Параметры прочностного расчета обечайки

-----	
Предел прочности материала (490...1710 мПа)	1710.0
Коэффициент запаса прочности (2,35...4,00)	3.00
Поправка на условия эксплуатации (0,9...1,0)	0.9
Коэффициент ослабления из-за пайки (0,8...1,0)	0.0
Прибавка на коррозию (от 1 мм)	0.0
Расчетная толщина стенки обечайки, мм	0.865
Расчетная толщина стенки плоского днища, мм	5.619
-----	
Масса баллона с коммуникациями, кг	27.214
Масса изоляции, кг	4.732
Регенерация/десорбция:	
-----	
Средняя Т потока на выходе, К	363.000
Средняя Т металла в конце регенерации, К	441.500
Средняя Т изоляции в конце регенерации, К	367.250
Потребное количество теплоты, кДж:	
на нагрев металла	5306.537
на нагрев адсорбента	1956.381
на регенерацию/десорбцию	1314.618
на нагрев изоляции	245.934
через изоляцию в окр. среде	804.646
Расход потока, куб.м/ч	28.431
Мощность электроподогревателя, кВт	1.770
Скорость потока (н.у.), м/с	0.908
Охлаждение адсорбера продувкой потока:	
-----	
Средняя Т охлаждающего потока, К	370.750
Аккумулированное количество теплоты, кДж:	
на нагрев металла	2079.410
на нагрев адсорбента	766.624
на нагрев изоляции	222.748
Потери через изоляцию в окр. среде, кДж	804.646
Расход охлаждающего азота, куб.м/ч	7.483
Скорость охлаждающего азота, м/с	0.215
Окончательное охлаждение кипением:	
-----	
Средняя Т изоляции, К	190.200
Отводимое кипением количество теплоты, кДж:	
от металла	2504.011
от адсорбента	1189.757
от изоляции	303.936
Потери холода через изоляцию, кДж	1114.042
Расход кипящего азота, кг/ч	8.725

Данные результаты получены при задании в процессе диалога во время расчета фиксированной высоты адсорбера – 1,8 м. Полученные скорости потоков соответствуют рекомендованным значениям, имеющимся в литературных источниках. При решении задачи унификации адсорберов путем выбора одинакового диаметра или поиска ограниченных по высоте конструкций адсорберов при соблюдении рекомендуемых скоростей потока возможно в диалоговом режиме работы программы варьирование скоростью потока. Таким образом можно, например, попробовать подобрать вариант адсорбера для комплексной осушки смеси и одновременной очистке от двуокиси углерода.

В зависимости от поставленной задачи для численного эксперимента с помощью представленной программы можно сделать множество различных выводов и получить различные конструкторские решения. Например, изменяя толщину изоляции, можно найти ее оптимальное значение, или определить нерасчетные режимы осушки, когда теплотраты принимают отрицательное значение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Головко Г.А.** Криогенное производство инертных газов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 416 с.
2. **Кельцев Н.В.** Основы адсорбционной техники. – М., Химия, 1984. – 592 с.
3. **Игнатов В.Я., Головко Г.А.** Очистка криогенных газов: Учеб. пособие. – Л., 1979. – 75 с.
4. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков. Под ред. М.П. Малкова. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
5. **Зельвенский Я.Д., Харьковская Е.Н.** Тонкая очистка газа от двуокиси углерода методом адсорбции при низкой температуре // Химическая промышленность. 1960. № 4. С. 293–302.
6. Примеры расчета установок глубокого охлаждения/ Под ред. С.С. Будневича. – Л.: Машиностроение, 1972. – 288 с.
7. **Игнатов Ю.Я.** Примеры расчетов криогенных адсорбционных систем: Учеб. пособие. – Л.: ЛТИХП, 1985. – 81 с.
8. **Игнатов Ю.Я.** Расчеты адсорберов криогенных установок: Учеб. пособие. – Л.: ЛТИХП, 1988. – 73 с.
9. **Солнцев Ю.П., Борзенко Е.И., Вологжанина С.А.** Материаловедение. Применение и выбор материалов: Учеб. пособие. – СПб.: Химиздат, 2007.
10. **Лацинский А.А., Торчинский А.Р.** Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. – Л.: Машиностроение. 1970. – 476 с.
11. Теплофизические свойства криопродуктов / Л.А. Акулов, Е.И. Борзенко, В.Н. Новотельнов, А.В. Зайцев. – СПб.: Политехника, 2001. – 242 с.
12. **Немнюгин М.А., Стесик О.Л.** Современный Фортран. Самоучитель. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 496 с.
13. **Бартенев О.В.** Современный Фортран – М.: Диалог-МИФИ, 1998. – 397 с.
14. **Архаров А.М., Беляков В.П.** и др. Криогенные системы. Т. 2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем. – М.: Машиностроение, 1999. – 719 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Тексты модулей компьютерной программы

```
program Adsorb
```

```
open(9,file='AdRez.txt') !открытие файла для результатов расчета
call AdDataK !загрузка конструктивных характеристик
!-----открытие файла с исходными данными
!open(1,file='AdDataH2O.txt')
!open(1,file='AdDataCO2(NaX).txt')
!open(1,file='AdDataCO2(CaA).txt')
!open(1,file='AdDataCO2(CKT-4).txt')
open(1,file='AdDataN2.txt')
call AdInOut(na1,na2) !ввод данных из AdData...txt или вручную (и в файл)
close(1) !закрытие файла данных
call AdDataA(na1,na2) !загрузка характеристик адсорбата-адсорбента
call AdDez(na1,na2) !расчет адсорбции; конструкторский расчет
call AdRDPO !расчет регенерации/десорбции/продувки/охлаждения

print*, 'Ħ бзГ'в § €@-зГ'-';read*
end
```

---

```
subroutine AdDataK !конструктивные данные
real Dtr1(61),dltr1(61),Dtr2(61),dltr2(61)
common /dat/Vb(61),Db(61),dlb(61),Dtr(61),dltr(61),hLb(61),Gb(61)
common /dM/rom,cm,roiz,ciz,fliz,dliz !пл.-тепл. мет., пл.-тепл.-тепл.-толщ. изоля-
ции
common /dP/sigv,zn,ze,zfo,cck,zk,zfd,dotv !прочностные характеристики
common /dat1/ntip,nvar,Dn,Dvn,hLad,nad,Gad,Gpr,dldn

!Таблица труб (ООО «Метэко Стайнлесс»). Труба круглая 08X18H10 (AISI 304)
data Dtr1/17.2,2*21.3,2*26.9,2*28.,32.,3*33.7, 2*38.,2*42.4, &
      3*48.3,50.8,2*57.,3*60.3,70.,2*76.1,2*88.9,101.6,104.,2*114.3, &
      139.7,3*168.3,2*219.1,273.,323.9,355.,2*406.4,508.,16*0./ !внешний диа-
метр, мм
data dltr1/2*1.5,2.6,1.5,2.6,1.5,2.,2*1.5,2.6,3.,2.,2*1.5,3.,1.5,2.6,3.,2*1.5,2.,1.5, &
      2.,3.,2.,1.5,2.,1.5,3*2.,1.5,3*2.,2.6,3.,2.,3.,2.5,3., &
      2.5,3.,2*4.,16*0./ !толщина стенки, мм
```

!Таблица труб по ГОСТ 9940-81 (выбираем трубы с диаметром 102-168 мм, толщиной стенки 4-7 мм)

```
data Dtr/2/5*102.,5*108.,5*114.,5*121.,5*127.,7*133.,7*140.,7*146., &  
7*152.,7*159.,168./ !внешний диаметр, мм  
data dltr/5.,5.5,6.,6.5,7.,5.,5.5,6.,6.5,7.,5.,5.5,6.,6.5,7.,5.,5.5,6.,6.5,7., &  
5.,5.5,6.,6.5,7.,4.,4.5,5.,5.5,6.,6.5,7.,4.,4.5,5.,5.5,6.,6.5,7., &  
4.,4.5,5.,5.5,6.,6.5,7.,4.,4.5,5.,5.5,6.,6.5,7., &  
4.,4.5,5.,5.5,6.,6.5,7.,7./ !толщина стенки, мм
```

!Таблица баллонов по ГОСТ 949-73 для  $p \leq 9,8$  МПа из углеродистой стали

```
data Vb/.4.,.7,1.,1.3,2.,2.,3.,3.,4.,5.,6.,7.,8.,10.,12.,20.,25.,32.,40.,50.,41*0./ !объем, л  
data Db/2*70.,3*89.,2*108.,8*140.,5*219.,41*0./ !внешний диаметр, мм  
data dlb/2*1.6,3*1.9,2*2.4,8*3.1,5*5.2,41*0./ !толщина стенки, мм  
data hLb/.165.,.255.,.24.,.295.,.425.,.32.,.445.,.31.,.385.,.46.,.535, &  
.61.,.68.,.83.,.975.,.73.,.89,1.105,1.35,1.66,41*0./ !длина корпуса (высота), м  
data Gb/.6.,.9,1.2,1.5,2.1,2.5,3.4,4.1,5.0,5.8,6.7,7.6, &  
8.5,10.2,11.9,28.5,34.,42.,51.5,62.5,41*0./ !масса, кг
```

```
gom=7850. !плотность металла, кг/куб.м (уточнить)  
cm=.54 !теплоемкость металла при  $T_a2$  (уточнить аппр. от T)  
ciz=.7 !теплоемкость изоляции при  $T_{izs}$ , кДж/кг (Малков)  
fliz=.037 !средняя теплопроводность изоляции (CryoTherm)  $T_{izs}$ , Вт/(м*К)  
roiz=190. !плотность изоляции (CryoTherm), кг/куб.м  
dliz=30. !толщина слоя изоляции, мм
```

```
!Расчет толщины стенки обечайки и днища на прочность  
sigv=490. !предел прочности выбранной стали (490 - 1710 МПа)  
zn=3.00 !коэффициент запаса прочности (2,35 - 4,00)  
ze=.9 !поправочный коэфф. на условия экспл. (0,9 - 1,0)  
zfo=1. !коэфф. ослабления из-за сварки обечайки (0,8 -1,0)  
cssk=0. !прибавка на коррозию (1 мм и более)  
zkc=.58 !коэффициент конструкции днища (плоское круглое)  
dotv=63. !диаметр отверстия в днище, мм (dotv=0. - нет отверстий)  
zfd=.85 !коэфф. ослабления из-за приварки днища (0,8 -1,0)
```

```
! continue  
!print*,',лЎГ'аЕвГ' ѓ аЕ -в: 1-варЎ AISI 304, 2-варЎ 'Г'Г', 3-Ў ««®- 'Г'Г' 949-73'  
!read*,ntip !выбор типа конструкции  
!if(ntip>3.or.ntip<1)goto 2  
ntip=2 !по умолчанию выбираем ГОСТ 9940-81  
if(ntip==1)then;Dtr=Dtr1;dltr=dltr1;nvar=45;endif !выбор трубы AISI 304  
if(ntip==2)then;Dtr=Dtr2;dltr=dltr2;nvar=61;endif !выбор трубы ГОСТ 9940-81  
if(ntip==3)then;Dtr=Db;dltr=dlb;nvar=20;endif !выбор баллона ГОСТ 949-73  
end
```

```

subroutine AdDataA(na1,na2) !Данные по адсорбату-адсорбенту
real svA(9),svE(7) !рабочие массивы
common/dA/fM,Ttr,Tkr,rotr,bv,baff,qd,cada,gorr !свойства адсорбатов
common/dE/W0,B,roa2,ck,cade,dz,esi !свойства адсорбентов
common/psA/cps(6) !коэфф. аппроксимации ps адсорбатов (Малков)
common/izo/pi(7),ai(7),ni,Ti !табл. данные по изотерме адсорбции

```

!-----С в о й с т в а а д с о р б а т о в-----

```

select case(na1)
case(1) !-----H2O-----
!svA(:)=(/.0,.0,.0,.0,.0,.0,2478.,4.1868,999.73/)
svA(:)=(/.0,.0,.0,.0,.0,.0,2478.,4.1868,1.29/)
!cps(:)=( / )
case(2) !-----CO2-----
svA(:)=(/44.,216.55,304.19,1178.,.0427,2.31,694.5,.846,1.977/)
cps(:)=(/-1353.202,27.6250,6.259156e-3,0.,0.,-8.142537/)
!cps(:)=(/-1210.27,9.06631,0.,0.,0.,0./)
case(3) !-----N2-----
svA(:)=(/28.013,63.148,126.25,868.1,.0386,1.,521.1,1.042,1.165/)
!cps(:)=(/-325.52,7.17531,0.,0.,0.,0./)
cps(:)=(/-341.619,7.906745,-.0062649,0.,0.,0./)
end select

```

```

fM=svA(1) !молекулярный вес
Ttr=svA(2) !Т тройной точки
Tkr=svA(3) !Т критическая
rotr=svA(4) !плотность в тройной точке
bv=svA(5) !
baff=svA(6) !коэффициент афинности
qd=svA(7) !теплота десорбции
cada=svA(8) !теплоемкость
gorr=svA(9) !плотность при норм. условиях, кг/куб.м

```

!-----С в о й с т в а а д с о р б е н т о в-----

```

select case(na2)
case(1) !-----AOA-2-----
svE(:)=(/.0,.0,550.,.5,1.05,4.e-3,.75/)
case(2) !-----NaX-----
svE(:)=(/.235,6.55e-6,670.,.343,.88,2.e-3,.4/)
case(3) !-----CaA-----
svE(:)=(/.233,5.5e-6,650.,.49,.88,2.e-3,.4/)
case(4) !-----СКТ-4-----
svE(:)=(/.515,8.4e-6,430.,.85,.84,4.e-3,.35/)
end select

```

```

W0=svE(1) !структурная константа
B=svE(2) !структурная константа

```

```

roa2=svE(3) !плотность
ck=svE(4) !коэфф. перевода адсорбции стат. в дин.
cade=svE(5) !теплоемкость
dz=svE(6) !диаметр гранулы, м
esl=svE(7) !пористость

```

```
!-----Свойства адсорбата-адсорбента-----
```

```
!аппроксимация изотерм адсорбции
```

```
if(na1==1.and.na2==1)then !-----H2O-AOA-----
```

```
pi(:)=(/0.,4.67e-4,9.36e-4,14.03e-4,18.71e-4,23.39e-4,0./)
```

```
ai(:)=(/0.,.0551.,.0751.,.1052.,.1803.,.3506,0./)
```

```
ni=6; Ti=293.
```

```
elseif(na1==2.and.na2==2)then !-----CO2-NaX-----
```

```
pi(:)=(/1.33e-3,6.67e-3,13.32e-3,26.66e-3,39.99e-3,53.33e-3,66.66e-3/)
```

```
ai(:)=(/2.2,46.5,60.6,65.7,68.,70.3,71.2/)
```

```
ni=7; Ti=293.
```

```
elseif(na1==2.and.na2==3)then !-----CO2-CaA-----
```

```
pi(:)=(/1.33e-3,6.67e-3,13.32e-3,26.66e-3,39.99e-3,53.33e-3,0./)
```

```
ai(:)=(/14.6,35.,51.,57.5,58.1,58.3,0./)
```

```
ni=6; Ti=293.
```

```
elseif(na1==2.and.na2==4)then !-----CO2-CKT-----
```

```
baff=1.25
```

```
elseif(na1==3.and.na2==4)then !-----N2-CKT-----
```

```
pi(:)=(/1.33e-3,6.67e-3,13.32e-3,26.66e-3,39.99e-3,53.33e-3,66.66e-3/)
```

```
ai(:)=(/332.,369.,395.,418.,422.,428.,431.8/)
```

```
ni=7; Ti=293.
```

```
ck=.85
```

```
endif
```

```
!pi - значения давлений на изотерме
```

```
!ai - значения адсорбций на изотерме
```

```
!ni - количество точек на изотерме
```

```
!Ti - температура расчетной изотермы
```

```
return;end
```

```
subroutine AdInOut(na1,na2) !Ввод исходных данных
```

```
common /in/V,pad,Tad,c0,tau,Ta0,Ta1,Ta2n,Ta2k,taur,Tad2,taup,tauo,pn,Tn,Tos
```

```
!
```

```
!----- В в о д д а н н ы х
```

```
do i=1,6; read(1,*); enddo !пропуск первых пяти строчек
```

```
read(1,*)nvd !ввод параметра управления вводом данных
```

```
if(nvd==1)then !ввод исходных данных из файла данных
```

```
read(1,*)na1,na2 !ввод типа адсорбата(примеси), адсорбента
```

```

read(1,*)V,pad,Tad,c0,tau
!расх.,куб.м/ч;давл.МПа;темп.К;кол.примеси,%об.;время,ч
read(1,*)Ta0,Ta1,Ta2n,Ta2k,taur !Т азота(рег.) вх.нагр.;вх.; нач.вых.; кон.вых.;
время рег.,ч
read(1,*)Tad2,taup,tauo !Т адс.кон.продувки; время продувки; время кип.,ч
else !ввод исходных данных с клавиатуры (и запись в файл данных)
print*,'Таб@аУ в (İаЕ-Гбм): 1-Н2О; 2-СО2; 3-Н2'
print*,'ÿГ@ЕвГ -@-Га аб@аУ в '
read*,na1 !ввод данных с клавиатуры
print*,'Таб@аУГ-в: 1 - «о-@JГ«м; 2 - NaX; 3 - CaA; 4 - СКТ-4'
print*,'ÿГ@ЕвГ -@-Га аб@аУГ-в '
read*,na2 !ввод данных с клавиатуры
write(1,*)na1,na2 !запись в файл данных
print*,'ÿГ@ЕвГ а бе@а, Єгÿ.-/з; а ÿ«. , ЫЦ ; ГГ-İ., ЛЬ; İаЕ-Гбм, %@ÿ.; ÿаГ-п, з'
read*,V,pad,Tad,c0,tau !ввод данных с клавиатуры
write(1,*)V,pad,Tad,c0,tau !запись в файл данных
print*,'ÿГ@ЕвГ ' §@в İаЕ аГJГ-Га жЕЕ - ÿе@аГ ÿ - Ja.; - ÿе. ÿ аб.; - ÿле. - з.; -
ÿле. Є@-.; ÿаГ-п аГJ.'
read*,Ta0,Ta1,Ta2n,Ta2k,taur !ввод данных с клавиатуры
write(1,*)Ta0,Ta1,Ta2n,Ta2k,taur !запись в файл данных
print*,'ÿГ@ЕвГ ' Є@-ж İа@аГÿЄЕ; ÿаГ-п İа@аГÿЄЕ; ÿаГ-п ЄЕİГ-Еп'
read*,Tad2,taup,tauo !ввод данных с клавиатуры
write(1,*)Tad2,taup,tauo !запись в файл данных
endif
рп=.1013;Тп=273.15 !давление (МПа) и температура (К) при норм. условиях
Тos=293. !Температура окружающей среды, К
close(1) !закрываем прочитанный файл данных

```

```

print*;print*,'‡ а -ЕГ: а бзЕв вм аб@аУГа, гзЕвлÿ п İа@жГббл:'
print*,'- аб@аУжЕЕ'
if(taur/=0)then;print*,'- аГJГ-Га жЕЕ Е«Е аГб@аУжЕЕ'; endif
if(taup/=0)then;print*,'- @е« |аГ-Еп İа@аГÿЄ@Є е@«@а-@J@ J § ' ; endif
if(tauo/=0)then;print*,'- @е« |аГ-Еп ЄЕİпÿЕ- е« а JГ-в@-'; endif

```

!----- В ы в о д р е з у л ь т а т о в (в процессе расчета)

```

write(9,*);write(9,*)
write(9,*)' И С Х О Д Н Ы Е Д А Н Н Ы Е : '
write(9,*)' ====='
selectcase(na1);case(1);write(9,*)'Адсорбат - пары воды (H2O)'
print*,'Таб@аУ в - İ ал ÿ@ал (H2O)'
case(2);write(9,*)'Адсорбат - двуокись углерода (CO2)'
print*,'Таб@аУ в - аÿг@ЄЕбм гJ«Га@а (CO2)'
case(3);write(9,*)'Адсорбат - азот (N2)'
print*,'Таб@аУ в - §@в (N2)'
case default;print*,'!!! К... ‡Т,,ТК Т,,ТђГТ";read*;endselect
selectcase(na2);case(1);write(9,*)'Адсорбент - активная окись алюминия'
print*,'Таб@аУГ-в - ЄвЕÿ- п @ЄЕбм «о-Е-Еп'
case(2);write(9,*)'Адсорбент - цеолит NaX'

```

```

        print*, 'Ъаб@aУГ-в - жГ®«Ев NaX'
        case(3);write(9,*)'Адсорбент - цеолит CaA'
        print*, 'Ъаб@aУГ-в - жГ®«Ев CaA'
        case(4);write(9,*)'Адсорбент - активный уголь СКТ-4'
        print*, 'Ъаб@aУГ-в - ЄвЕй-л© гJ®«м СКТ-4'
        case default;print*, '!!! К... ‡Ъ,,ЪКЪ,,‘ЪђГ...К’';read*;endselect
print*
write(9,'(a50,f7.3)')' Расход очищаемого потока, куб.м/ч           ',V
write(9,'(a50,f6.2)')' Давление адсорбции, МПа                   ',pad
write(9,'(a50,f6.2)')' Температура на входе в адсорбер, К        ',Tad
if(na1==1)then;write(9,'(a50,f6.3)')'      Количество           примеси,           г/кг
',c0
else;write(9,'(a50,f6.3)')' Количество примеси, % об.           ',c0; endif
write(9,'(a50,f6.2)')' Время адсорбции, ч                         ',tau
write(9,'(a50,f6.2)')' Т потока при рег./десорбции на вх. в эл. нагрев., К      ',Ta0
write(9,'(a50,f6.2)')' Т потока при рег./десорбции на входе в адсорбер, К      ',Ta1
write(9,'(a50,f6.2)')' Т потока на выходе в начале рег./десорбции, К          ',Ta2n
write(9,'(a50,f6.2)')' Т потока на выходе в конце рег./десорбции, К          ',Ta2k
write(9,'(a50,f6.2)')' Время регенерации/десорбции, ч           ',taur
if(taup==0.)then;Tad2=.5*(Ta1+Ta2k) !средняя Т адсорбера в конце регенерации
!write(9,*)' Этап охлаждения продувкой не предусмотрен'
else;write(9,'(a50,f6.2)')' Т адсорбера в конце продувки, К      ',Tad2
write(9,'(a50,f6.2)')' Время охлаждения продувкой, ч             ',taup;endif
if(tauo==0.)then; !write(9,*)' Этап оконч. охлаждения кипением не предусмотрен'
else;write(9,'(a50,f6.2)')'      Время      оконч.      охлаждения      кипением,      ч
',tauo;endif
write(9,*)';write(9,*)'
        write(9,*)'
                                РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА:'
                                ====='
end

```

```

subroutine AdDez(na1,na2) !Расчет конструкции адсорбера (designing)
common /in/V,pad,Tad,c0,tau,Ta0,Ta1,Ta2n,Ta2k,taur,Tad2,taup,tauo,pn,Tn,Tos
common /dat/Vb(61),Db(61),dlb(61),Dtr(61),dltr(61),hLb(61),Gb(61)
common /dat1/ntip,nvar,Dn,Dvn,hLad,nad,Gad,Gpr,dldn
common /dP/sigv,zn,ze,zfo,cck,zk,zfd,dotv !прочностные характеристики
common/dA/fM,Ttr,Tkr,rotr,bv,baff,qd,cada,ropr !свойства адсорбатов
common/dE/W0,B,roa2,ck,cade,dz,esl !свойства адсорбентов
COMMON/T6/cpk1,срк2,срк3,rok1,rok2,rok3 !св-ва чистых комп. смеси

```

! ----- С о с т а в , к о л - в о -----

```

Vrab=V*Tad*pn/pad/Tn !расход газа при рабочих условиях, куб.м/ч
if(na1==1.and.na2==1)then !ОСУШКА; c0=[г H2O /кг смеси]
!print*, 'H2O-AOA: Ъ,,‘ЪђГ—Єц ‘—Є’Ъ...’ц ЦЪ Є‡Ъ’...ђЪ...’
!adin=Adlzo(ppr,Tad) !адсорбция паров воды, кг/кг
rok1=.1785;rok2=1.25;rok3=1.429 !плотности гелия, азота, кислорода, кг/куб.м

```

```

call RCS(.47,.30,.23,.45,cps,ros,SM,SL) !теплофиз. св-ва смеси
Gpr=V*ros*c0*1.e-3*tau !масса влаги, кг
!adin=0.07 !(Малков, стр. 298), кг/кг
adin=0.07-.045*(Tad-278.)/35. !линейная аппроксимация по данным при T 278 и
313 K (0,07 и 0,025)
write(9,'(a50,f8.3)') 'Масса влаги, кг',Gpr
write(9,'(a50,f8.3)') 'Динамическая емкость адсорбента, г/г',adin
Gad=Gpr/adin !масса адсорбента, кг
else !ОЧИСТКА; c0=[% объемн]
Vpr=V*c0*tau/100. !количество примеси, куб.м
Gpr=Vpr*ropr !масса примеси, кг
ppr=pad*c0/100. !парциальное давление адсорбата (примеси), МПа
ast1=AdDR(ppr,Tad) !статическая емкость по ур. Дубинина-Радушкевича
ast2=Adlzo(ppr,Tad) !статическая емкость по изотерме адсорбции
print*,'a_stat(Dub-Rad)='ast1,'a(izotherma)='ast2
print*,'‡ † ©вГ 3 €®нддЕжЕГ-в б-Е!Г-Еп бв вЕзГб€®© с-€®бвЕ'
print*,'Е§-§ ь«Еп-Еп † ь«Г-Еп, Е§-§ †Е- †ЕЕЕ, Е§-§ ь« JE:;!read*,ck1,ck2,ck3
adin=ck1*ck2*ck3*ast1 !динамическая емкость
write(9,'(a50,f8.4)') 'Количество примеси, куб.м',Vpr
write(9,'(a50,f8.3)') 'Масса примеси, кг',Gpr
write(9,'(a50,f8.3)') 'Парциальное давление примеси, кПа',ppr*1000.
write(9,'(a50,f8.3)') 'Статическая емкость адсорбента, куб.см/г',ast1
write(9,'(a50,f8.3)') 'Динамическая емкость адсорбента, куб.см/г',adin
Gad=Vpr*1.e3/adin !масса адсорбента, кг
endif
Vad=Gad/roa2 !объем адсорбента, куб.м

write(9,'(a50,f8.3)') 'Расход смеси при рабочих условиях, куб.м/ч',Vrab
write(9,'(a50,f8.3)') 'Масса адсорбента, кг',Gad
write(9,'(a50,f8.4)') 'Объем адсорбента, куб.м',Vad

! ----- Конструирование адсорбера -----

if(ntip/=3)then !тип адсорбера: - из труб
write(9,*);select case(ntip) !выбор типа трубы
case(1);write(9,*)'Параметры подходящей трубы круглой 08X18H10 (AISI 304)'
case(2);write(9,*)'Параметры подходящей трубы по ГОСТ 9940-81'
end select
write(9,*)'-----'
nad=1 !количество адсорберов (из выбранной трубы) - пока задаем
print*,'‡ † ©вГ ьлб®вг †б®аУГа , †; (Гб«Е "0", в® а бзГв İ® б€®а®бвЕ):'
read*,hh; !высота адсорбера
if(hh/=0.)then;hLad=hh-.1 !расчет с фикс. высотой слоя (10 см - демпферное пр-
во)
else;print*,'‡ † ©вГ б€®а®бвм, †/-Е-';read*,w;endif !расчет по скорости (диалог)
4 if(hh/=0.)then;Fb=Vad/(hLad*nad) !живое сечение трубы при заданной высоте,
кв.м

```



```

write(9,'(a50,f6.1)') Прибавка на коррозию (от 1 мм)          ',cck
write(9,'(a50,f8.3)') Расчетная толщина стенки обечайки, мм      ',dltrp
write(9,'(a50,f8.3)') Расчетная толщина стенки плоского днища, мм  ',dldn
if(dltrp>dltr(mad))write(9,*)ВАРИАНТ НЕ ПРОХОДИТ ПО ПРОЧНОСТИ!!!

else
! Анализ и выбор конструкции адсорбера из таблицы баллонов по ГОСТ 949-73
print*,'К... Т'ТТ...КТ ълУ@a €@«-ў ĩ@б«Г'а/Ī а «« Ÿ ««@-@ў';read*
nad=0 !начало перебора количества адсорберов в блоке
wi=.2;wa=2. !рекомендуемые min и max скорости, м/мин
wmax=Vrab/(60.*.785*(Db(1)-dlb(1))**2.*1.e-6) !max скорость в 1 баллоне
if(wmax<wi)then !скорость w=.2-2. м/мин недостижима
print*,'Ц@«гз Г- б€@a@бвм -Г-миГ 0,2 -/-Е-'
print*,'лЎЕа Г- б -л@ г$€Е@ Ÿ ««@- Е а бĪ@« Ј Г- Ее ĩ@б«Г'а@ў вГ«м-@'
wi=wmax-.1; wa=wmax+.1;endif !выбираем самый узкий баллон
w=0. !скорость газа по полному сечению (начало поиска), м/мин
do while(w==0.) !расчеты при переборе различных адсорберов
nad=nad+1 !изменение количества адсорберов
do i=1,nvar !перебор типоразмеров адсорберов по ГОСТ 949-73
if(Vad<nad*Vb(i)*1.e-3)then !достаточный объем nad баллонов для адсорбента
Dvn=Db(i)-2.*dlb(i) !внутренний диаметр баллона, мм
Fb=.785*Dvn*Dvn*1.e-6 !живое сечение баллона, кв.м
w=Vrab/(nad*Fb*60.) !скорость потока, м/мин!
mad=i !номер адсорбера в таблице типоразмеров
print*,'w,i,nad;read*
if(w>wi.and.w<wa)exit !скорость удовлетворяет условиям, к след.вар-ту
w=0.; endif; enddo; enddo !для дальнейшего поиска при большем nad
Dn=Db(mad) !найденный наружный диаметр трубы (баллона), мм
hLad=hLb(mad) !высота выбранного адсорбера (баллона)
Gm=Gb(mad) !масса выбранного баллона
write(9,*)'-----'
write(9,*)'Баллон по ГОСТ 949-73 /строка - ',mad
write(9,*)'Количество баллонов, шт.          ',nad
write(9,*)'Скорость потока в баллоне, м/мин ',w
write(9,*)'Высота баллона (слоя), м          ',hLad
write(9,*)'Наружный диаметр, мм            ',Dn
write(9,*)'Толщина стенки, мм              ',dlb(mad)
write(9,*)'Объем баллона, л                 ',Vb(mad)
write(9,*)'Масса баллона, кг                ',Gm
write(9,*)'-----';write(9,*)
!fN0=V*c0*tau*2.687e25/nad !общее число молекул примеси в 1 баллоне
!hLmin=2.3*w*(-alog10(fN0)+alog10(tau))/b0 !min высота слоя адсорбента, м
!if(hLb(mad)<30.*hLmin)then !проверка усл.достаточной высоты слоя адсорбента
!print*,'>Т'Т 'ТЦ < Ъ€К€Ъ"ЪТ! "...€—ъ 'Л'ТĥТ"ъ!';read*;endif
endif

return;end

```

```

subroutine AdPro(p,Dvn,Dn,sso,ssd) !Расчет на прочность
common /dP/sigv,zn,ze,zfo,cck,zk,zfd,dotv !прочностные характеристики
!-----Расчет обечайки-----
sig=ze*sigv/zn
sfp=sig*zfo/p
if(sfp>=.91.and.sfp<5.5)then
bet=Dn/(Dvn+2.*cck)
sso=(.5*Dvn+cck)*(bet-1.); endif !толщина стенки обечайки
if(sfp>=5.5.and.sfp<25.)then
sso=Dvn/(2.*sfp-1.); endif !толщина стенки обечайки
if(sfp>=25.)then
sso=.5*Dvn/sfp; endif !толщина стенки обечайки
sso=sso+cck
!-----Расчет плоского днища-----
dd=dotv/Dvn
if(dd==0.)zk0=1. !коэффициент ослабления отверстиями
if(dd<.35)then;zk0=1.-.43*dd !коэффициент ослабления отверстиями
else;zk0=.85;endif !коэффициент ослабления отверстиями
ssd=zk*Dvn*sqrt(p/sigv/zfd)/zk0+cck !толщина стенки днища
return;end

```

---

```

Subroutine AdRDPO !Регенерация/десорбция/продувка/охлаждение
common /in/V,pad,Tad,c0,tau,Ta0,Ta1,Ta2n,Ta2k,taur,Tad2,taup,tauo,pn,Tn,Tos
common /dat1/ntip,nvar,Dn,Dvn,hLad,nad,Gad,Gpr,dldn !конструктивные парамет-
ры
common/dA/fM,Ttr,Tkr,rotr,bv,baff,qd,cada,ropr !свойства адсорбатов
common/dE/W0,B,roa2,ck,cade,dz,esl !свойства адсорбентов
common /dM/rom,cm,roiz,ciz,fliz,dliz !пл.-тепл. мет., пл.-тепл.-тепл.-толщ. изоля-
ции

```

```

!call RSN2 !для расчета теплофизических свойств рабочего потока (азота)
call RSAer !для расчета теплофизических свойств рабочего потока (воздуха)
roa=CRRO(pn,Tn,1) !плотность потока при нормальных условиях, кг/куб.м
сра=CRCP(roa,Tn) !теплоемкость потока при нормальных условиях, кДж/кг

```

```

if(ntip/=3)then !адсорбер из трубы
Gm1=.785e-6*(Dn*Dn-Dvn*Dvn)*hLad*rom !вес цилиндрической части баллона,
кг
!Gm2=(4./6.)*3.14e-9*((Dn/2.)**3.-(Dvn/2.)**3.)*Rom !вес полусферического дни-
ща, кг
Gm2=.785e-9*Dn*Dn*dldn*Rom !вес плоского днища (из прочностного расчета),
кг
Gmb=Gm1+Gm2 !вес баллона,кг
Gmk=.2*Gmb !вес крышки с коммуникациями (15-20% от веса баллона), кг
Gm=Gmb+Gmk !масса баллона с коммуникациями, кг
write(9,*);write(9,*)'-----'
write(9,'(a50,f8.3)') Масса баллона с коммуникациями, кг           ',Gm

```

endif

Diz=Dn+2.\*dliz !диаметр изоляции, мм  
Hiz=hLad+.5 !высота изоляции, м (0,2 м добавлено на коммуникации...)  
Fvniz=3.14\*Dn\*1.e-3\*Hiz !площадь внутр. пов-ти изоляции, кв.м  
Fniz=3.14\*Diz\*1.e-3\*Hiz !площадь внешн. пов-ти изоляции, кв.м  
Giz=nad\*.785e-6\*(Diz\*\*2-Dn\*\*2)\*Hiz\*roiz !масса изоляции, кг  
write(9,'(a50,f8.3)') Масса изоляции, кг ',Giz

!-----РЕГЕНЕРАЦИЯ / ДЕСОРБЦИЯ-----  
-----

Ta2=.5\*(Ta2n+Ta2k) !средняя Т потока при регенерации на выходе из адсорбиров

Tmks=.5\*(Ta1+Ta2k) !средняя Т металла в конце регенерации

Tizs=.5\*(Tmks+Ta2n) !средняя температура изоляции при регенерации

if(taur/=0.)then !условие наличия процесса десорбции/регенерации

write(9,\*) ; write(9,\*) 'Регенерация/десорбция:'

write(9,\*) '-----'

write(9,'(a50,f8.3)') Средняя Т потока на выходе, К ',Ta2

write(9,'(a50,f8.3)') Средняя Т металла в конце регенерации, К ',Tmks

write(9,'(a50,f8.3)') Средняя Т изоляции в конце регенерации, К ',Tizs

Q1=nad\*Gm\*cm\*(Tmks-Tad) !Q на нагрев металла (всех баллонов), кДж

Q2=Gad\*cade\*(Tmks-Tad) !Q на нагрев адсорбента, кДж

Q3=Gpr\*(qd+(373.-Ta2n)\*cada) !Q на десорбцию/регенерацию адсорбата, кДж

Q4=Giz\*ciz\*(Tizs-Ta2n) !Q на нагрев изоляции, кДж (берут 20%, т.к. мала теплопроводность)

!Q5=.2\*(Q1+Q2+Q4) !Q потери в окр. среду - 20% от нагрева, кДж

Q5=fliiz\*taur\*3.6e3\*(Tizs-Tos)\*sqrt(Fvniz\*Fniz)/dliz !Q потери через изоляцию в окр.среду, кДж

write(9,\*) 'Потребное количество теплоты, кДж:'

write(9,'(a50,f8.3)') на нагрев металла ',Q1

write(9,'(a50,f8.3)') на нагрев адсорбента ',Q2

write(9,'(a50,f8.3)') на регенерацию/десорбцию ',Q3

write(9,'(a50,f8.3)') на нагрев изоляции ',Q4

write(9,'(a50,f8.3)') через изоляцию в окр. среду ',Q5

Va=(Q1+Q2+Q3+Q4+Q5)/(roa\*cpa\*(Ta1-Ta2)\*taur) !расход греющего потока, куб.м/ч

ск=1.1 !коэфф. запаса электроподогревателя

pa=.15 !избыточное давление потока на нагрев, МПа

AN=ск\*Va\*roa\*cpa\*(Ta1-Tos)/3600. !мощность электроподогревателя, кВт

wa=Va\*Ta1\*pn/(Tn\*pa\*nad\*.785e-6\*Dvn\*\*2\*3600.) !скорость газа(полн.сечение), м/с

wad=wa\*Ta2/Ta0 !скорость газа, приведенная к рабочим условиям, м/с

de=4./6.\*esl/(1.-esl)\*dz !эквивалентный диаметр каналов между зернами, м

roa1=CRRO(pa,Ta1,1) !плотность потока при рабочих условиях (Ta1)

fmu1=FMU(roa1,Ta1) !динамическая вязкость потока при Ta1, Па\*с

```

Re=wad*de*roa1/(esl*fmua1) !критерий Рейнольдса
f=2.2 !коэфф.гидравл.сопротивления (график [справочник])
dp=2.*f*roa1*hLad*nad*(wad/esl)**2/de !гидравл.сопр. слоя, Па
write(9,'(a50,f8.3)') Расход потока, куб.м/ч ',Va
write(9,'(a50,f8.3)') Мощность электроподогревателя, кВт ',AN
write(9,'(a50,f8.3)') Скорость потока (н.у.), м/с ',wa
!write(9,'(a50,f8.3)') Скорость потока (р.у.), м/с ',wad
!write(9,'(a50,f8.3)') Критерий Рейнольдса ',Re
!write(9,'(a50,f8.3)') Гидравлическое сопротивление, __ ',dp
endif

```

!-----О Х Л А Ж Д Е Н И Е П Р О Д У В К О Й-----

```

if(taup/=0.)then !условие наличия процесса охлаждения продувкой
write(9,*);write(9,*)'Охлаждение адсорбера продувкой потока:'
write(9,*)'-----'
Tas=.5*(Tmks+Tad2) !средняя Т охлаждающего потока при продувке
if(Tas<Tad2)then;print*,'КГ'йГ'а-л© вГ'Г'а вга-л© аГ'ЕГ'!'
print*,'«Г'аГ'в г-Г'-миЕвм ' ¢б®аУ'Га ў €®-жГ' Ia®аГ'ёЄ.';endif
write(9,'(a50,f8.3)') Средняя Т охлаждающего потока, К ',Tas

```

```

Q1=nad*Gm*cm*(Tmks-Tad2) !Q аккумулированная металлом, кДж
Q2=Gad*cade*(Tmks-Tad2) !Q аккумулированная адсорбентом, кДж
Q4=Giz*ciz*(Tizs-Tad2) !Q аккумулированная изоляцией, кДж
!Q5=.2*(Q1+Q2+Q4) !Q потери в окр. среду - 20% от нагрева, кДж
Q5=fliz*taup*3.6e3*(Tizs-Tos)*sqrt(Fvniz*Fniz)/dliz !Q через изол. в окр.среду, кДж
write(9,*)'Аккумулированное количество теплоты, кДж:'
write(9,'(a50,f8.3)') на нагрев металла ',Q1
write(9,'(a50,f8.3)') на нагрев адсорбента ',Q2
write(9,'(a50,f8.3)') на нагрев изоляции ',Q4
write(9,'(a50,f8.3)') Потери через изоляцию в окр. среду, кДж ',Q5

```

```

roa=CRRO(pa,Tas,1) !плотность потока при продувке, кг/куб.м
сра=CRCP(roa,Tas) !теплоемкость потока, кДж/кг
Va=(Q1+Q2+Q4-Q5)/(roa*сра*(Tas-Tad2)*taup) !расход охл. потока, куб.м/ч
!print*,Q1,Q2,Q4,Q5,roa,сра,(Tas-Tad2),taup;read*
pa=.15 !давление потока, МПа
wa=Va/(nad*.785e-6*Dvn**2*3600.) !скорость потока (полн.сечение), м/с
write(9,'(a50,f8.3)') Расход охлаждающего азота, куб.м/ч ',Va
write(9,'(a50,f8.3)') Скорость охлаждающего азота, м/с ',wa
endif

```

!-----О Х Л А Ж Д Е Н И Е П Р И К И П Е Н И И-----

```

if(tauo/=0.)then !условие наличия процесса охлаждения кипением
write(9,*);write(9,*)'Окончательное охлаждение кипением:'
write(9,*)'-----'
Tizo=.5*(Tad2+Tad) !средняя Т изоляции, К
write(9,'(a50,f8.3)') Средняя Т изоляции, К ',Tizo

```

```

смо=.419;cado=cade;cizo=.585 !теплоемкости (Головко с.262)кДж/(кг*К)
Q1=nad*Gm*смо*(Тad2-Тad) !Q отводимая от металла, кДж
Q2=Gad*cado*(Тad2-Тad) !Q отводимая от адсорбента, кДж
Q4=Giz*cizo*(Тizo-Тad) !Q отводимая от изоляции, кДж
!Q5=q*V !Q потери холода-теплоприток через изоляцию (Головко с.262), кДж/ч
Q5=fliz*tauo*3.6e3*(Тos-Тizo)*sqrt(Fvniz*Fniz)/dliz !Q потери холода через изол.,
кДж
write(9,*)'Отводимое кипением количество теплоты, кДж:'
write(9,'(a50,f8.3)') от металла ',Q1
write(9,'(a50,f8.3)') от адсорбента ',Q2
write(9,'(a50,f8.3)') от изоляции ',Q4
write(9,'(a50,f8.3)') Потери холода через изоляцию, кДж ',Q5

rro=195.3 !теплота испарения (азота), кДж/кг
Vo=(Q1+Q2+Q4+Q5)/(rro*tauo) !кол-во хладагента на охл. до Тад, кг/ч
write(9,'(a50,f8.3)') Расход кипящего азота, кг/ч ',Vo
endif

return; end

```

---

```

function AdDR(p,T) !Расчет адсорбции по ур. Дубинина-Радушкевича
common/dA/fM,Ttr,Tkr,rotr,bv,baff,qv,sada,ropr !свойства адсорбатов
common/dE/W0,B,roa2,ck,cade,dz,esl !свойства адсорбентов
common/psA/cps(6) !коэфф. аппроксимации ps адсорбатов (Малков)

```

```

rozkr=fM/bv
al=log10(rotr/rozkr)/.434/(Тkr-Тtr)
roz=10.**(alog10(rotr)-.434*al*(Т-Тtr))
vz=fM/roz
cc=cps(6)*alog10(Т); do i=1,5; cc=cc+cps(i)*Т**(i-2);enddo
ps=10.**(cc)*1.e-4 !МПа
AdDR=W0*22.4*exp(-B*(Т*alog10(ps/p)/baff)**2)/vz
!print*,AdDR,W0,B,Т,ps,p,baff,vz;read*
return;end

```

---

```

function Adlzo(p,T) !Расчет адсорбции аппроксимацией изотермы
common/dA/fM,Ttr,Tkr,rotr,bv,baff,qd,cada,ropr !свойства адсорбатов
common/izo/pi(7),ai(7),ni,Ti
!Кусочно-линейная аппроксимация функции
!pi(i) - переменная (по оси абсцисс), i=1...ni
!ai(i) - точечная функция ai(pi(i))
if(p<pi(1))then
print*,!ajE «м-®Г ы ў«Г-ЕГ ĩaE-ГбE =',p
print*,!ЪE-E-ĳ «м-®Г ы ў«Г-ЕГ - § ы --®© E§®вГa-Г ыб®aЎжEE ',pi(1)
Adlzo=ai(1);return
elseif(p>pi(ni))then

```

```

print*, 'Ц ажЕ «м-®Г ² ÿ«Г-ЕГ ĩаЕ-ГбЕ =', p
print*, 'Ъ СбЕ- «м-®Г ² ÿ«Г-ЕГ - § ² --®© Е§®вГ'а-Г' ²б®аŸжЕЕ ', pi(ni)
Adlzo=ai(ni);return
endif

```

```

i=1; adi=ai(1)
if(p>pi(1))then
do while(p>pi(i))
i=i+1
if(i>ni)then
print*, ',, Ÿ«Г-ЕГ', p, ',, Ÿ®«миГ ²®ĭгбвЕ-®J® - Е§®вГ'а-Г', pi(ni)
adi=ai(ni);endif;enddo
adi=ai(i-1)+(ai(i)-ai(i-1))*(p-pi(i-1))/(pi(i)-pi(i-1))
else;print*, ',, Ÿ«Г-ЕГ', p, '-Г-миГ ²®ĭгбвЕ-®J® - Е§®вГ'а-Г', pi(1)
endif
!ro=... !плотность при p и T
ro=ropr !пока задаем плотность при Тад
Adlzo=adi*ro/ropr !значение адсорбции при p и T
return;end

```

```

subroutine RCS(y1,y2,y3,a,cps,Ros,SM,SL) !расчет состава смеси
! 1 - гелий, 2 - азот, 3 - кислород
COMMON/T5/MUK1,MUK2,MUK3,LAMDAK1,LAMDAK2,LAMDAK3
COMMON/T6/CPK1,CPK2,CPK3,ROK1,ROK2,ROK3
real Muk1,Muk2,Muk3,Lamdak1,Lamdak2,Lamdak3
real y(3),AM(3),yM(3),cp(3),Ro(3),SLam(3),SMu(3)

```

```

AM(1)=4.; AM(2)=28.; AM(3)=32. !молекулярные массы компонентов
y(1)=y1;y(2)=y2;y(3)=y3 !состав
Ro(1)=Rok1;Ro(2)=Rok2;Ro(3)=Rok3 !плотность
cp(1)=CPk1;cp(2)=CPk2;cp(3)=CPk3;
SLam(1)=Lamdak1;SLam(2)=Lamdak2;SLam(3)=Lamdak3
SMu(1)=Muk1;SMu(2)=Muk2;SMu(3)=Muk3
ys=0.;Ros=0.;SL1=0.;SL2=0.;SM=0.;cps=0.
do i=1,3
ys=ys+y(i)*AM(i)
enddo
do i=1,3
yM(i)=y(i)*AM(i)/ys
Ros=Ros+yM(i)*Ro(i)
cps=cps+yM(i)*cp(i)
SL1=SL1+y(i)*SLam(i)
SL2=SL2+y(i)/SLam(i)
SM=SM+y(i)*SMu(i)
enddo
SL=a*SL1+(1.-a)/SL2
return;end

```

## Теплофизические свойства адсорбатов и адсорбентов

*Давление насыщенных паров.*

Зависимость давления паров над жидкостью  $p_s$  от температуры является прямолинейной в координатах  $\lg p - 1/T$  и может быть аппроксимирована с погрешностью 1–2 % в широком диапазоне температур полиномом [2]:

азот (50–126 К):

$$\lg p_s = 7,17531 - \frac{325,52}{T};$$

диоксид углерода (140–300 К):

$$\lg p_s = 9,06631 - \frac{1210,27}{T};$$

кислород (53–150 К):

$$\lg p_s = 7,1648 - \frac{377,153}{T}.$$

Также возможно использовать полиномы более высоких степеней с повышенной точностью результатов.

*Аппроксимация свойств азота на линии насыщения [14].*

Температура, К

$$T_s = \frac{302,8255}{5,92 - \lg p_s}.$$

Плотность пара, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_i = \frac{p_s}{0,289T_s - 0,0046p_s}.$$

Плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_x = \frac{1000}{0,00943T_s + 0,57}.$$

Теплота парообразования, кДж/кг

$$R = \frac{24867,26 - 6811,51 \lg p_s}{4,03 - \lg p_s} \cdot 28.$$

Поверхностное натяжение жидкости, Н/м

$$\sigma = 25,16 - 0,211T_s \cdot 10^{-3}.$$

*Свойства адсорбатов [3].*

Характеристика	Вещество		
	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Теплота десорбции, кДж/кг	2478 + Q парообр.	694,5	521,1
Молярная масса адсорбата, г/моль	18	44	28
Критическая температура, К	–	304,19	126,25
Температура тройной точки, К	–	216,55	63,148
Плотность в тройной точке, кг/м <sup>3</sup>	–	1178	868,1
Температура кипения при норм. условиях, К	273	194,67	77,34
Плотность жидкости при температуре кипения, кг/м <sup>3</sup>	999,73	793	812
Плотность пара (газа) при нормальных условиях, кг/м <sup>3</sup>	0,0048	1,977	1,251
Теплоемкость при нормальных условиях, кДж/(кг·К)	4,1868	0,846	1,042
Константа уравнения Ван-Дер-Ваальса, см <sup>3</sup> /моль	–	0,0427	0,0386
Коэффициент аффинности β	–	2,31	1,0

*Свойства адсорбентов [1, 3].*

Показатель	Активная окись алюминия (для H <sub>2</sub> O)	NaX (для CO <sub>2</sub> )	CaA (для N <sub>2</sub> )	СКТ-4 (для N <sub>2</sub> )
Диаметр гранулы, мм	4	2,7		4
Пористость слоя,	0,75	0,4		0,35
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	600 (550–750)	750		430
Удельная теплоемкость (при средней <i>T</i> азота на выходе), кДж/(кг·К)	1,05 (Клименко)	0,88		0,84 (Касаткин)
Предельный объем адсорбционного пространства <i>W</i> <sub>0</sub> , см <sup>3</sup> /г	–	0,255	0,233	0,515
Структурная константа <i>B</i> , К <sup>-2</sup>	–	6,55·10 <sup>-6</sup>	5,5·10 <sup>-6</sup>	8,4·10 <sup>-6</sup>

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . . .	3
ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ АДСОРБЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ . . . . .	5
МЕТОДИКА РАСЧЕТА БЛОКА АДСОРБЦИИ . . . . .	13
Определение количества примесей и адсорбента . . . . .	14
Конструктивные параметры адсорбера . . . . .	17
Расчет на механическую прочность . . . . .	18
Расчет процесса регенерации/десорбции, охлаждения адсорбе- ра продувкой азота, охлаждения адсорбера кипящим азотом . . . .	22
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ БЛОКА АДСОРБЦИИ . . . . .	27
Примеры расчета адсорбера . . . . .	30
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .	36
ПРИЛОЖЕНИЯ . . . . .	37



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

---

## ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



Институт холода и биотехнологий является преемником Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ), который в ходе реорганизации (приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 2209 от 17 августа 2011г.) в январе 2012 года был присоединен к Санкт-Петербургскому национальному исследовательскому университету информационных технологий, механики и оптики.

Созданный 31 мая 1931года институт стал крупнейшим образовательным и научным центром, одним их ведущих вузов страны в области холодильной, криогенной техники, технологий и в экономике пищевых производств.

В институте обучается более 6500 студентов и аспирантов. Коллектив преподавателей и сотрудников составляет около 900 человек, из них 82 доктора наук, профессора; реализуется более 40 образовательных программ.

Действуют 6 факультетов:

- холодильной техники;
- пищевой инженерии и автоматизации;
- пищевых технологий;
- криогенной техники и кондиционирования;

- экономики и экологического менеджмента;
- заочного обучения.

За годы существования вуза сформировались известные во всем мире научные и педагогические школы. В настоящее время фундаментальные и прикладные исследования проводятся по 20 основным научным направлениям: научные основы холодильных машин и термотрансформаторов; повышение эффективности холодильных установок; газодинамика и компрессоростроение; совершенствование процессов, машин и аппаратов криогенной техники; теплофизика; теплофизическое приборостроение; машины, аппараты и системы кондиционирования; хладостойкие стали; проблемы прочности при низких температурах; твердотельные преобразователи энергии; холодильная обработка и хранение пищевых продуктов; тепломассоперенос в пищевой промышленности; технология молока и молочных продуктов; физико-химические, биохимические и микробиологические основы переработки пищевого сырья; пищевая технология продуктов из растительного сырья; физико-химическая механика и тепло-и массообмен; методы управления технологическими процессами; техника пищевых производств и торговли; промышленная экология; от экологической теории к практике инновационного управления предприятием.

В институте создан информационно-технологический комплекс, включающий в себя технопарк, инжиниринговый центр, проектно-конструкторское бюро, центр компетенции «Холодильщик», научно-образовательную лабораторию инновационных технологий. На предприятиях холодильной, пищевых отраслей реализовано около тысячи крупных проектов, разработанных учеными и преподавателями института.

Ежегодно проводятся международные научные конференции, семинары, конференции научно-технического творчества молодежи.

Издаются журнал «Вестник Международной академии холода» и электронные научные журналы «Холодильная техника и кондиционирование», «Процессы и аппараты пищевых производств», «Экономика и экологический менеджмент».

В вузе ведется подготовка кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре по 11 специальностям.

Действуют два диссертационных совета, которые принимают к защите докторские и кандидатские диссертации.

Вуз является активным участником мирового рынка образовательных и научных услуг.

Борзенко Евгений Иванович  
Зайцев Андрей Викторович

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЛОКА АДСОРБЦИИ**

Учебно-методическое пособие

*Ответственный редактор*  
Т.Г. Смирнова

*Титульный редактор*  
Р.А. Сафарова

*Компьютерная верстка*  
А.В. Зайцев

*Дизайн обложки*  
Н.А. Потехина

*Печатается  
в авторской редакции*

---

Подписано в печать 19.12.2014. Формат 60×84 1/16  
Усл. печ. л. 3,49. Печ. л. 3,75. Уч.-изд. л. 3,5  
Тираж 50 экз. Заказ № С 82

---

НИУ ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49  
ИИК ИХиБТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9