

Автореферат
П 50

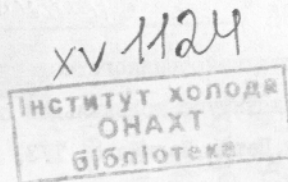
проф. Алексею В. П.
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

ПОЛИВАЛИН Николай Константинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА
В РЕГЕНЕРАТОРАХ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК
ПРИ ПОДОГРЕВЕ ГАЗА ОБРАТНОГО ПОТОКА

Специальность 05.04.03 - Гидравлические машины, машины и
аппараты холодильной и криогенной техники



А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1981

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
холодильной промышленности. Экспериментальная часть работы
выполнена в Производственно-техническом предприятии
"Укрэнергочермет"

Научный руководитель - заслуженный деятель науки УССР,
доктор технических наук,
профессор АЛЕКСЕЕВ В.П.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор КАЛЕНДАРЬЯН В.А.

- кандидат технических наук,
доцент ДЛТЧКОВ М.И.

Ведущая организация - НПО Криогенмаш, г.Балашиха,
Московской обл.

Защита диссертации состоится " 8 " июня 1981 года
в ^{11.00} на заседании специализированного совета К 068.27.01
при Одесском технологическом институте холодильной промышлен-
ности: 270000, Одесса, ГСП, ул.Петра Великого, 1/3, ОТИХП.

Диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Разослан " 6 " мая 1981 года.

Р.К.Никольшин

Актуальность работы

Одними из основных направлений совершенствования воздуходелительных установок (ВРУ) низкого давления являются увеличение до 8-10 лет продолжительности рабочих кампаний и снижение до 0,3-0,4 МПа давления разделяемого воздуха. Решение этих задач находится в непосредственной взаимосвязи с проблемой обеспечения незабываемости регенераторов, возникшей одновременно с созданием ВРУ низкого давления и до настоящего времени не получившей оптимального решения. Намечившееся в последние годы увеличение продолжительности рабочих кампаний ВРУ с I до I,5-2 лет объясняется, в основном, стабилизацией температурного режима регенераторов. Накапливание же примесей на насадке продолжается, что ведет к увеличению гидравлического сопротивления регенераторов и снижению качества очистки воздуха от CO₂ и углеводородов.

Учитывая сказанное, исследования, направленные на обеспечение незабываемости регенераторов и повышение качества очистки в них воздуха, представляются весьма актуальными и перспективными.

Цель диссертации

Разработка и исследование способов обеспечения незабываемости регенераторов ВРУ подогревом газа обратного потока.

Научная новизна

1. Впервые исследованы процессы теплообмена в периоды переключения регенераторов и обоснована необходимость их учета при проектировании воздуходелительных установок;
2. Описаны процессы теплообмена в регенераторах ВРУ с учетом периодов опорожнения и заполнения аппаратов воздухом;
3. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование очистки насадки и воздуха в регенераторах, работающих с подогревом газа обратного потока в начале периода холодного дутья.

Основные научные положения, защищаемые автором

1. Подогрев газа обратного потока в начале периода холодного дутья улучшает условия незабываемости регенераторов и повышает степень

очистки охлаждаемого в них воздуха;

2. При подогреве газа обратного потока степень очистки насадки от примесей увеличивается с повышением температурного уровня регенераторов, температуры газа и количества сечений, в которых он подогревается;

3. При периодическом подогреве газа обратного потока увеличение количества тепла, вводимого в регенератор подогретым газом за один цикл, улучшает очистку насадки и снижает удельный расход тепла.

Наиболее существенные научные результаты работы

1. Показано, что подогрев газа обратного потока обеспечивает незабываемость регенераторов отложениями CO_2 и н-пентана при давлении воздуха не ниже 0,36 МПа. При этом средняя концентрация двуокиси углерода в воздухе после регенераторов не превышает $1 \text{ см}^3/\text{м}^3$, а н-пентана - $1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$;

2. Установлено, что переключение регенераторов увеличивает на 15-25% потери холода от недорекуперации и уменьшает сублимационную способность газа обратного потока по двуокиси углерода в 1,2-1,4 раза, а по н-пентану - в 1,4 - 1,6 раза;

3. Разработана методика расчета регенераторов на забываемость с учетом опорожнения и заполнения их воздухом;

4. Разработана методика расчета возможной очистки насадки регенераторов от примесей.

Практическая ценность диссертации

1. Разработаны и защищены а.с. СССР шесть новых способов обеспечения забываемости регенераторов ВРУ. Три изобретения исследованы и рекомендованы для промышленного использования. Ими обеспечивается забываемость регенераторов при давлении воздуха 0,36 + 0,6 МПа. Внедрение изобретений на промышленных ВРУ позволяет увеличить продолжительность непрерывной эксплуатации регенераторов до 8-10 лет, на 5-10% повысить производительность установок и на 2-4% снизить себестоимость кислорода. Исследованные способы являются одной из важней-

ших предпосылок создания установок с давлением разделяемого воздуха 0,3+0,4 МПа.

2. Разработана методика расчета, которая может быть использована для исследования регенераторов и при проектировании промышленных ВРУ;

3. Обоснованы рекомендации по уменьшению свободных объемов холодных концов регенераторов ВРУ и клапанных коробок что учтено при проектировании ВРУ КтК-35-3 и КТ-70.

Реализация результатов работы в промышленности

1. Три разработанных способа обеспечения забываемости регенераторов внедрены на ВРУ БР-1Кч и БР-2 Ждановского метзавода им.Ильича, на установках БР-1, БР-2 и КтК-35-3 метзавода "Запорожсталь", на ВРУ БР-1М и БР-2 метзавода "Криворожсталь", на установках БР-1М и КтК-35-3 Днепровского металлургического завода им.Ф.Э.Дзержинского и на двух установках БР-5 Енакиевского метзавода. Экономический эффект составил 1,5 миллионов рублей (акты представлены в диссертации);

2. Алгоритм и программа расчета регенераторов на забываемость переданы в НПО Криогенмаш - головную организацию отрасли по проектированию и изготовлению ВРУ.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались на заседании секции энергетики и автоматизации научно-технического совета Министерства черной металлургии СССР (г.Москва, 1978 г.) на заседаниях секции по энергетике НТС МЧМ УССР (г.Днепропетровск, 1978, 1979 и 1980 г.г.) на 13 и 14 научно-технических конференциях в Запорожском индустриальном институте (г.Запорожье, 1977 и 1978 г.г.) и на научно-технических конференциях ОТИИП в 1977-80 г.г.

Совершенство разработанной методики расчета регенераторов подтверждено удовлетворительным соответствием расчетных данных с экспериментальными и результатами внедрения новых способов очистки регенераторов на 15 промышленных ВРУ.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков, 16 таблиц и состоит из введения, пяти глав, списка использованной литературы (102 наименования) и приложений на 16 с.

Постановка задачи и выбор предмета исследования

Для исследований отобраны способы, обеспечивающие непосредственно либо после оптимизации очистку насадки регенераторов от примесей при давлении воздуха 0,3-0,4 МПа.

Известные способы обеспечения незабываемости регенераторов разделены нами на три группы. К первой группе отнесены способы Линде, тройного дутья и др., очистка насадки которыми улучшается за счет уменьшения разности температур между газами прямого и обратного потоков в зоне вымораживания двуокиси углерода. Способами второй группы очистка насадки улучшается понижением давления, а третьей — повышением температуры газа обратного потока в начале периода холодного дутья.

Способы первой группы исключены из рассмотрения ввиду недостаточной эффективности при давлениях 0,3-0,4 МПа, а второй — вследствие больших затрат при промышленном использовании.

Для исследования и доработки выбраны малоизученные способы третьей группы, которые поддаются оптимизации и требуют незначительных изменений в схемах ВРУ при их реализации.

Методика расчета процессов тепло-и массообмена в регенераторах

Расчеты способов третьей группы показали, что при пониженном давлении воздуха они не обеспечивают незабываемость регенераторов. Для разработки новых способов было необходимо исследовать влияние параметров газовых потоков на очистку насадки от примесей. С этой целью проведено теоретическое исследование процессов тепло-и массообмена с использованием ЭВМ. Эти исследования позволяют определить изменения основных параметров на любом из элементов насадки регенератора за любой интервал времени цикла, что практически невыполнимо эксперимен-

тальными методами.

Для исследования выбрана методика, учитывающая влажность воздуха, его конденсацию на насадке, неравномерное осаждение и особенности возгонки примесей по высоте дисков и регенераторов, изменение теплоемкости насадки и газов, теплоприток через изоляцию и ряд других факторов.

Сравнительный анализ показал, что концентрации двуокиси углерода и н-пентана в воздухе после регенераторов, полученные расчетами и в экспериментах на регенераторах с чистой насадкой, близки между собой. Расчетное количество накапливающейся на насадке двуокиси углерода меньше экспериментального почти в 10 раз, а н-пентана — в 1,4 раза. Это объясняется недостатками методики расчета, не учитывающей переключение регенераторов, изменение коэффициентов тепло-и массообмена в пределах отдельных дисков насадки и ряд других факторов. В диссертации обоснована необходимость учета переключения регенераторов, которое на 15-25% увеличивает потери холода и в 1,3-1,6 раза снижает сублимационную способность газа обратного потока.

Математическая модель процессов тепло-и массообмена в регенераторах, включающая периоды переключения, описывается восемью системами дифференциальных уравнений. На участке регенератора без конденсации воздуха при заполнении аппарата и в период прямого дутья справедлива следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} G_H \cdot C_H \cdot \frac{\partial T_H}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_H \cdot \frac{\pi_H}{\Gamma} \cdot \frac{\partial T_H}{\partial x} \right) + \alpha \cdot (T_B - T_H) \cdot F_H + \frac{\partial Q_{np}}{\partial \tau} \cdot r_{np}; \\ G_B \cdot C_P \cdot \frac{\partial T_B}{\partial x} &= \alpha \cdot F_H \cdot (T_H - T_B) - G_P \cdot C_P \cdot \frac{\partial T_B}{\partial \tau} + Q_{ок.с.}; \\ - \frac{\partial Q_{np}}{\partial \tau} &= G_B \cdot \frac{\partial Z_{np}}{\partial x} + G_P \cdot \frac{\partial Z_{np}}{\partial \tau}; \\ - \left(G_B \cdot \frac{\partial Z_{np}}{\partial x} + G_P \cdot \frac{\partial Z_{np}}{\partial \tau} \right) &= \beta \cdot F_H \cdot (Z_{np} - Z_{Hnp}), \end{aligned}$$

где G_H, F_H — масса и поверхность теплообмена насадки, отнесенные к единице длины регенератора;

C_H, T_H, P_H, λ_H - теплоемкость, температура, площадь поперечного сечения и теплопроводность насадки, соответственно;

τ, Γ - время и геометрическая характеристика насадки, соответственно;

α, β - коэффициенты тепло- и массоотдачи, соответственно;

T_B, G_B, C_p - температура, массовый расход и теплоемкость воздуха, соответственно;

q_{np}, Γ_{np} - масса примеси, сконденсировавшейся на единице длины регенератора, и скрытая теплота конденсации, соответственно;

$Q_{ок.с.}$ - теплопритоки через изоляцию;

Z_{np} - концентрация паров примеси в воздухе;

Z_{Hnp} - концентрация насыщенных паров примеси при температуре насадки;

G_p - масса воздуха в свободном объеме насадки, отнесенная к единице длины регенераторов в расчетном сечении.

Аналогичны остальные системы уравнений, которые вследствие зависимости теплофизических свойств газов от температуры и давления в аналитическом виде не решаются. Для их решения нестационарные вдоль оси регенератора и во времени процессы тепло- и массообмена заменяются квазистационарными и рассматриваются на отдельных элементах насадки в течение малых интервалов времени, в которых принимаются неизменными температуры элементов насадки, температурные поля и поля концентраций. Указанный подход позволяет использовать для расчета регенераторов решения, полученные для стационарных процессов.

$$T_{H, j+1} = T_{L, j} \cdot (1 - e^{-\alpha \beta \tau}) + T_{H, j} \cdot e^{-\alpha \beta \tau};$$

$$T_{cp, i, j} = T_{L, j} - (T_{H, j+1} - T_{H, j}) / \ln \frac{T_{L, j} - T_{H, j}}{T_{L, j} - T_{H, j+1}};$$

$$T_{L, i, j} = T_{cp, i, j} + (T_{L, j} - T_{cp, i, j}) \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot F}{G_B \cdot C_p}};$$

$$\alpha = 1 - e^{-\frac{\alpha \cdot F_H}{G_B \cdot C_p}}; \quad \beta = \frac{G_B \cdot C_{py}}{C_H \cdot C_H}$$

где i - порядковый номер расчетного элемента насадки;

j - порядковый номер расчетного интервала времени;

τ - продолжительность расчетного интервала времени;

T - температура газа;

C_{py} - условная теплоемкость газа, включающая теплоприток из окружающей среды и тепло конденсации и паров примеси.

По приведенным зависимостям определяются температуры элементов насадки в конце расчетных интервалов времени и средние за интервал температуры насадки и газа на выходе из расчетных элементов насадки.

Концентрации примесей в газе, выходящем из расчетных элементов насадки, в каждом из интервалов времени периодов прямого и обратного дутья вычисляются по зависимостям:

$$Z_{i+1, j} = Z_{i, j} - (Z_{i, j} - Z_{H, i, j}) \cdot (1 - e^{-\frac{\alpha \cdot F_H}{\epsilon_A \cdot G_B \cdot C_p}}),$$

где ϵ_A - коэффициент Льюиса.

Расчет процессов тепло- и массообмена в регенераторах проводится до выхода аппарата на установившийся режим (обычно 25-30 циклов). В последнем цикле проверяются условия незабываемости насадки льдом H_2O , двуокисью углерода и углеводородами, а также очистка воздуха от CO_2 и углеводородов.

В исходную методику внесены дополнения для расчета регенераторов, работающих с подогревом газа обратного потока, и определения возможной степени очистки дисков от примесей, характеризующейся величиной безразмерного параметра $\theta = q_{возм. исп} / q_{ос}$. Под $q_{возм. исп}$ понимается количество примеси, которое может испариться с диска газом обратного потока при условии окончания возгонки с первого по ходу воздуха участка диска в конце последнего расчетного интервала времени периода холодного дутья, а под $q_{ос}$ - масса примеси, оставшейся на расчетном диске насадки к концу периода прямого дутья.

Для определения коэффициента теплоотдачи автором предложена зависимость

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \left(\frac{G_{i, j}}{G_0}\right)^{0,693} \cdot \left(\frac{T_{L, j}}{T_0}\right)^{0,384},$$

α_0 вычисляется предварительно для каждой зоны насадки при давлениях прямого и обратного потоков по известной зависимости

$$\alpha_0 = \frac{4,74 \cdot Re^{0,693}}{(\eta_{np} \cdot \cos \beta_0)^{-0,187} \cdot \left(\frac{h}{d_3}\right)^{-0,808} \cdot \left(\frac{\delta}{\delta_0}\right)^{-0,392} \cdot \left(1 + \frac{d_3 \cdot \cos \beta_0}{t}\right)} \cdot \frac{t \cdot \lambda}{t_0 \cdot d_3 \cdot 4E},$$

где Re - критерий Рейнольдса;

$h, d_3, \beta_0, \delta, t, \eta_{np}$ - геометрические характеристики насадки;

$$T_0 = 273 \text{ К.}$$

В диссертации количественно обоснована необходимость учета неравномерного осаждения примесей на дисковой насадке регенератора и разработана методика определения количества примеси q_k , высидившейся за период прямого дутья на отдельных участках диска:

$$q_k = q_{диска} \cdot A \cdot B^{k-1},$$

где $q_{диска}$ - количество примеси, высидившейся на всей поверхности диска;

k - порядковый номер участка диска по ходу воздуха;

$$A = (1-B) / \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot F_H}{\varepsilon_1 \cdot G_0 \cdot C_p}}\right); \quad B = e^{-\frac{\alpha \cdot F_H}{\varepsilon_1 \cdot G_0 \cdot C_p}}.$$

Расчетные данные по очистке воздуха от CO_2 и н-пентана, а также по накоплению н-пентана на насадке удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов на регенераторах с чистой насадкой. Расчетное количество накапливающейся на насадке двуокиси углерода остается в три раза меньше полученного в экспериментах и согласуется с ним лишь при $\theta = 2,3$. Поэтому при теоретических исследованиях регенераторов принято, что насадка двуокисью углерода не забивается при $\theta = 2,3$, а н-пентаном - при $\theta = 1$.

Теоретические исследования и разработка новых способов

обеспечения незабиваемости регенераторов

Основные результаты исследований способов обеспечения незабиваемости регенераторов подогревом газа обратного потока в одном и трех сечениях аппарата в каждом цикле приведены на рис. I. Из рис. Ia следует, что при относительном расходе тепла $Q_{отн}$, равном 1% тепловой нагрузки

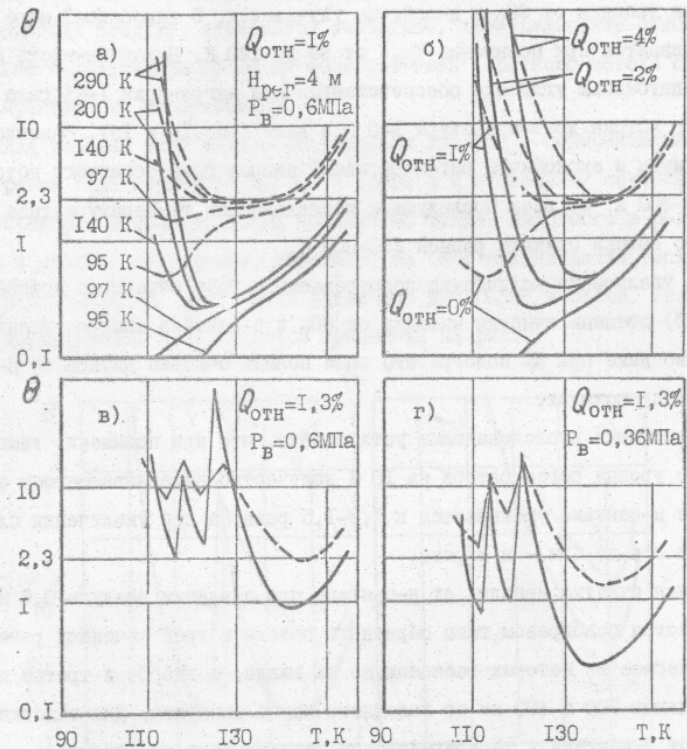


Рис. I. Степень очистки насадки регенератора от двуокиси углерода (---) и н-пентана (—) при подогреве обратного потока в каждом цикле:

- а) - в зависимости от температуры нагреваемого газа;
- б) - от относительного количества тепла, $Q_{отн}$;
- в) - при подогреве в трех сечениях регенератора со слоем насадки $H_{рег} = 6$ м при давлении воздуха $P_в = 0,6$ МПа;
- г) - то же при $P_в = 0,36$ МПа

регенератора, с повышением температуры газа обратного потока ($T_{об.}$) очистка насадки от CO_2 и н-пентана улучшается. В наибольшей мере θ увеличивается при повышении $T_{об.}$ от 95 до 140 К. Незабываемость насадки двуокисью углерода обеспечивается при нагревании 1-2% газа обратного потока до температуры 140 К и выше (рис.1а и 1б). Наиболее эффективен и экономичен регенеративный нагрев газа обратного потока до 120-300 К. Во всех последующих исследованиях температура газа обратного потока принята равной 290-300 К.

При увеличении количества подогреваемого газа обратного потока (рис.1б) степень очистки насадки от CO_2 и н-пентана быстро увеличивается, но даже при 4% подогретого газа полная очистка дисков от н-пентана не происходит.

Дальнейшими исследованиями установлено, что при повышении температурного уровня регенератора на 10 К количество накапливающегося на насадке н-пентана уменьшается в 1,3-1,5 раза, а при увеличении слоя насадки с 4 до 6 м - в 2 раза.

Полная очистка насадки от н-пентана при давлении воздуха 0,6 МПа достигается подогревом газа обратного потока в трех сечениях регенератора, первое из которых расположено на входе, а второе и третье на расстояниях 200 и 400 мм от холодного конца аппарата. Для очистки насадки от н-пентана в четырехметровом регенераторе расход тепла на подогрев обратного потока составляет 2,5%, а в шестиметровом аппарате - 1,3% тепловой нагрузки регенератора за цикл (рис.1в).

При давлении воздуха 0,36 МПа (рис.1г) подогревом газа обратного потока в каждом цикле не обеспечивается забываемость регенераторов ни двуокисью углерода, ни н-пентаном.

Исследования показали, что наибольшее воздействие на повышение эффективности рассматриваемых способов оказывает увеличение количества тепла, используемого для подогрева газа обратного потока. Учитывая, что при давлении воздуха 0,6 МПа с петлевым потоком из регенераторов отбирается не более 3% тепла от общей тепловой нагрузки аппарата, и

около 70% этого тепла расходуется на подогрев расширяемого в турбодетандерах воздуха, становится очевидным, что увеличение относительного количества тепла на подогрев газа обратного потока свыше 2% практически неосуществимо.

Для решения этой задачи разработаны способы с периодическим подогревом газа обратного потока в одном и в нескольких сечениях регенератора. Этими способами количество тепла, вводимого в регенератор в цикле с подогревом, например, за счет накапливания теплого газа в ресиверах, может быть увеличено до 20-30% и более. Результаты исследований этих способов приведены на рис.2.

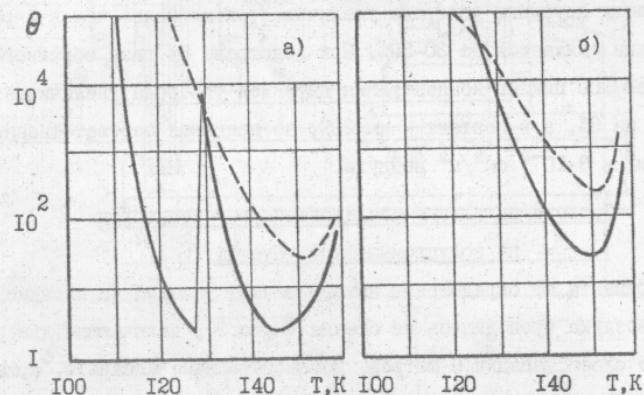


Рис.2. Степень очистки насадки регенераторов от двуокиси углерода (---) и н-пентана (—) при подогреве газа обратного потока через 100 циклов:
а) - при подогреве 8% газа обратного потока до 300 К.
Давление воздуха 0,6 МПа;
б) - при подогреве до 300 К 12% газа обратного потока.
Давление воздуха 0,36 МПа

Эти исследования показывают, что для обеспечения незабываемости регенераторов *n*-пентаном необходимо через каждые 100 циклов нагревать по 8% газа обратного потока при давлении воздуха 0,6 МПа и по 12% - при давлении воздуха 0,36 МПа. Удельные расходы нагретого до 300 К сжатого воздуха или азота, вдуваемых в регенератор для подогрева газа обратного потока, составляют соответственно 0,08 и 0,12% от расхода охлаждаемого воздуха. Дополнительные потери холода при регенеративном нагреве этих газов увеличивают общие холодопотери установок соответственно на 0,02 кДж/м³ (0,2%) и 0,04 кДж/м³ (0,4%).

Теоретические исследования качества очистки воздуха в регенераторах показали, что при подогреве газа обратного потока в каждом цикле концентрация двуокиси углерода увеличивается не более чем в 2 раза, а *n*-пентана снижается на 30-50%. При подогреве 8% газа обратного потока через 100 циклов концентрация двуокиси углерода увеличивается примерно на 3%, а *n*-пентана - на 20%, не превышая соответственно 0,4 см³/м³ и 3·10⁻⁵ см³/м³ воздуха.

Экспериментальные исследования регенераторов на полупромышленном стенде

Эксперименты по определению накопления примесей на насадке и по очистке воздуха проводились на стенде (рис.3), включающем два регенератора со слоем насадки 6 метров, вспомогательные аппараты, арматуру, ИИП и автоматику. Регенераторы и холодные аппараты смонтированы в кожухе, заполненном минеральной ватой. Потери холода компенсировались за счет испарения жидкого азота, а подача воздуха осуществлялась от турбокомпрессоров низкого давления.

Регенератор изготовлен из трубы $\varnothing 300 \times 3$ и заполнен алюминиевой дисковой насадкой. Высота дисков 50 мм, угол рифления - 60°. В регенераторе, начиная с холодного конца, установлено 8 промежуточных решеток через 200 мм насадки и 4 решетки через 400 мм. В образованных решетками камерах и в трубопроводе после регенератора установлены пробоотборники, датчики температур и давлений, а также патрубки для

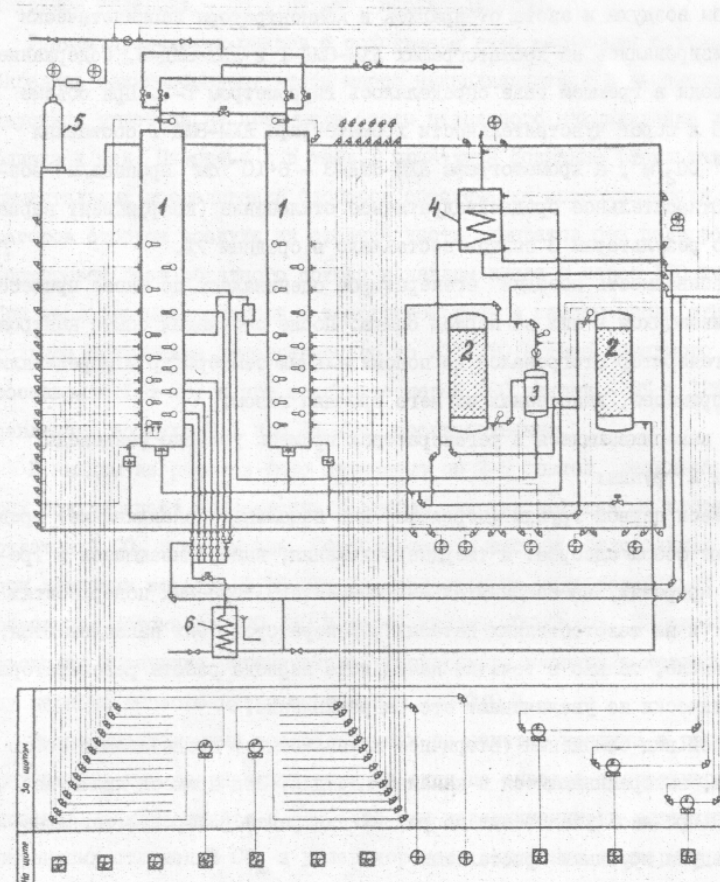


Рис.3. Схема стенда для исследования незабываемости регенераторов:

1- регенераторы; 2-газофазовые адсорберы; 3-теплообменник петлевого потока; 4-азотный охладитель газа обратного потока; 5-устройство дозировки *n*-пентана; 6-подогреватель газа обратного потока

ввода подогретого газа.

Пробы воздуха и азота отбирались в концентраторы изокинетически и анализировались на хроматографах ЛХМ-8МД-1 и ЛХМ-8МД-3. Содержание паров воды в греющем газе определялось гигрометром Г-2. При объеме проб 10 л порог чувствительности хроматографа ЛХМ-8МД-1 составлял $0,1 \text{ см}^3 \text{ CO}_2/\text{м}^3$, а хроматографа ЛХМ-8МД-3 - $6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3 \text{ пропана}/\text{м}^3$ воздуха. Относительное среднеквадратичное отклонение (коэффициент вариации) по результатам 3 опытов составляло в среднем 7%.

Незабываемость насадки регенераторов оценивалась по массе примесей, накапливающихся в них за период опыта. После окончания опыта контрольный регенератор отогревался до положительных температур и определялись массы примесей, вынесенных из него греющим газом.

Все накапливающиеся в регенераторах примеси условно разделены нами на 2 группы.

Примеси первой группы (первичное или начальное накопление) представляют собой адсорбат и твердые отложения, вымораживающиеся в трещинах, прорезях, на соединительных элементах, торцевых поверхностях дисков и на толстостенных деталях регенераторов. Они накапливаются, как правило, только в течение начального периода работы регенератора и практически не увеличивают его сопротивление.

Второй вид отложений (вторичное накопление) представляет собой примеси, вымораживающиеся в каналах насадки. Эти примеси являются главной причиной увеличения сопротивления регенераторов и загрязнения воздуха крупными кристаллами.

Незабываемость насадки следует считать обеспеченной, если в регенераторах накапливаются только первичные отложения. Определив массу и продолжительность периода первичного накопления, можно оценить минимально необходимую продолжительность опытов и оптимальные условия обеспечения забываемости регенераторов. В диссертации эта задача решена для двуокиси углерода при давлении воздуха в регенераторах стэнда 0,6 и 0,36 МПа. При этом продолжительность периодов первичного

накапливания составляет 20 и 22 часа, а массы первичного накапливания двуокиси углерода - 33 и 39 дм^3 , соответственно.

Режимы проведения опытов с подогревом газа обратного потока подбирались таким образом, чтобы масса накапливающейся в регенераторе двуокиси углерода не превышала массы первичного накапливания и была близка к ней. На рис.4 и в табл.1 приведены основные результаты экспериментальных исследований способов обеспечения забываемости регенераторов отбором воздуха из средней части аппаратов без подогрева и с подогревом газа обратного потока в каждом цикле и через 100 циклов. При исследовании способов с подогревом газа в каждом цикле относительное количество подогреваемого до 270-290 К газа обратного потока составляло 1,5-2%, а при подогреве через 100 циклов - 8% и 12% при давлениях воздуха 0,6 и 0,36 МПа, соответственно.

В каждом из режимов было проведено по 2-5 опытов, результаты которых подтверждают возможность надежной очистки насадки от вторичных отложений CO_2 и н-пентана. Незабываемость насадки отложениями воды при давлении воздуха 0,36 МПа была обеспечена подогревом 3-4% газа обратного потока до 270-280 К через каждые 30 циклов. Подогретый газ вводился в сечение регенератора, температура насадки в котором к концу периода теплого дутья составляла 220-240 К.

Экспериментальными исследованиями по очистке воздуха в регенераторах от CO_2 и н-пентана подтвержден один из выводов теоретических исследований, заключающийся в том, что при накапливании на насадке только первичных отложений CO_2 и углеводородов, нарушения температурного режима регенераторов не ведут к значительному загрязнению воздуха примесями. Так, в цикле, следующем за циклом с подогревом 8% газа обратного потока, концентрация н-пентана увеличивается лишь в 2-3 раза, а двуокиси углерода - в 3-4 раза и составляет соответственно $(1+3) \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ и $2+4 \text{ см}^3/\text{м}^3$ воздуха. В последующих циклах концентрация указанных примесей становится ниже среднего их содержания, которое при подогреве газа обратного потока через 100 циклов составило

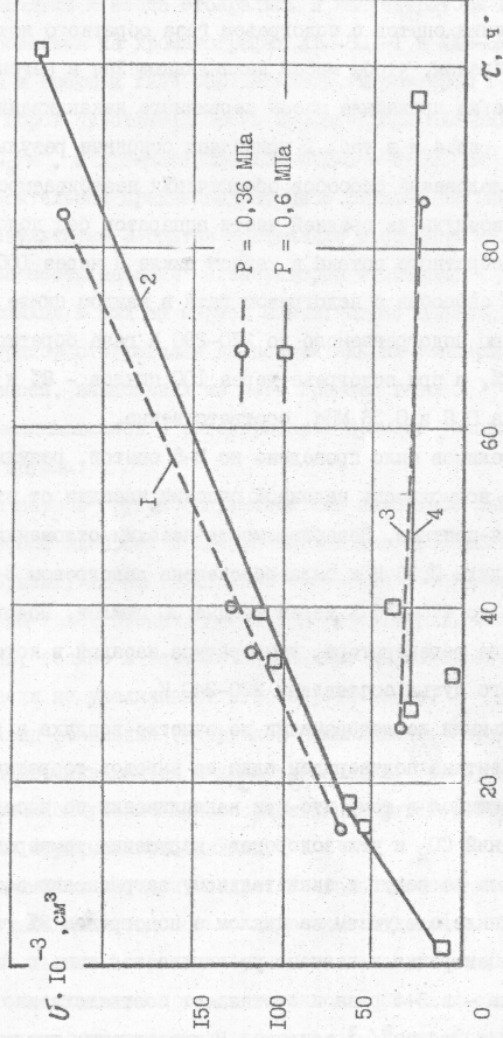


Рис. 4. Накапливание двуокиси углерода в экспериментальном регенераторе:

1, 2 — без подогрева газа обратного потока; 3, 4 — с подогревом 10 и 12 % газа обратного потока через 100 циклов, соответственно

Результаты экспериментальных исследований стоечных регенераторов

Про- должи- тель- ность опыта, ч	Метод обеспечения независимости давле- ние возду- ха	Давле- ние возду- ха, МПа	Накапливание двуокиси углерода				Накапл. н-пентана			
			Общее		Вторичное		Общее			
			абсол., дм ³ см ³ /м ³ воздуха	отн., дм ³ см ³ /м ³ воздуха	абсол., дм ³ см ³ /м ³ воздуха	отн., дм ³ см ³ /м ³ воздуха	абсол., дм ³ см ³ /м ³ воздуха	относ., дм ³ см ³ /м ³ воздуха	абсол., дм ³ см ³ /м ³ воздуха	относ., дм ³ см ³ /м ³ воздуха
2,5	Без подогрева газа обратного потока	0,6	9,1	10	3,9	4,33	5,2	5,8	44	0,049
15		0,6	56,7	10,5	25,4	4,72	31,3	5,8	110	0,0204
38		0,6	109,4	8	33	4,58	76,4	5,6		
102		0,6	246,2	6,7	33	4,58	213,2	5,8	251	0,0068
16	С подогревом 2% газа в каждом цикле	0,6	42,5	5,16	33	4,58	9,5	1,65	75	0,0091
40		0,6	43,1	3,16	33	4,58	10,1	0,7	59,8	0,0045
24	С подогревом 10% га- за через 100 цик- лов	0,6	28,4	3,28	28,4	3,28	-	-	114	0,0132
32		0,6	5,8	0,5	5,8	0,5	-	-	83	0,0072
96		0,6	29,2	0,85	29,2	0,85	-	-	138	0,004
15	Без подогрева газа обратного потока	0,36	62	11,5	27,05	5	34,95	6,5	136	0,0252
35		0,36	122	9,7	38,5	5	84,5	6,7	186	0,0144
82		0,36	229,8	7,8	38,5	5	191,3	6,5	349	0,0118
22	С подогревом 12% га- за через 100 циклов	0,36	34,9	44	34,9	44	-	-	105	0,0132
86		0,36	27	0,87	27	0,87	-	-	109	0,0037

XV 1124

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

0,9 см³СО₂/м³ и 5·10⁻⁵ см³ пентана/м³ воздуха. При подогреве в каждом цикле средняя концентрация двуокиси углерода составляла 0,6 см³/м³, а н-пентана 3·10⁻⁵ см³/м³ воздуха.

Экспериментальные исследования на промышленных ВРУ

Способы очистки регенераторов подогревом газа обратного потока в каждом цикле и через 10-1000 циклов экспериментально исследованы на промышленных ВРУ БР-5, БР-2 и КтК-35-3. На этих установках газ обратного потока подогревался вс духом, очищенным в регенераторах и нагретым до 280-300 К. Подогретый воздух накапливался в ресиверах и подавался в регенераторы через клапаны принудительного действия.

Исследованиями установлено, что подогревом до 270-300 К 1-1,5% газа обратного потока в каждом цикле и 8-12% газа - через 1000-2000 циклов сопротивление регенераторов поддерживается на начальном уровне в течение длительного времени. Так, ВРУ БР-5 отработала без увеличения сопротивления регенераторов свыше 680 суток, а установка КтК-35-3 - около 5 лет. Подогревом газа обратного потока регенераторы очищаются и от ранее накопившихся примесей. На установках БР-5 и БР-2 сопротивление насадки снижается в 1,5-2 раза за 6-10 часов работы с подогревом 3% газа обратного потока в каждом цикле, либо после 3-5 циклов с подогревом 8-12% газа обратного потока.

При повышении сопротивления насадки в зоне накопления двуокиси углерода не более, чем на 500 мм вод.ст., содержание СО₂ после регенераторов почти не увеличивается и составляет 2-3 см³/м³ воздуха. Дальнейшее повышение сопротивления насадки сопровождается быстрым возрастанием концентрации двуокиси углерода до 5-8 см³/м³ воздуха и выше.

После очистки насадки подогретым газом обратного потока концентрация двуокиси углерода вновь снижается до 2 - 3 см³/м³ воздуха.

Выводы

1. Способы обеспечения незабываемости регенераторов уменьшением разности температур между газами прямого и обратного потоков в зоне накопления двуокиси углерода не обеспечивают полной очистки насадки от примесей. Более перспективно параллельное использование указанных способов с подогревом газа обратного потока. При давлении воздуха 0,6 МПа достаточно подогревать перед регенератором до 270-300 К по 8-12% газа обратного потока через 1-2 тыс. циклов, а при давлении 0,3-0,4 МПа следует подогревать по 6-8% газа через 50-100 циклов последовательно в двух-трех сечениях регенератора.

2. Показано, что использованием на промышленных ВРУ способов очистки насадки подогревом газа обратного потока стабилизировано сопротивление регенераторов, исключено накопление двуокиси углерода и локальные взрывы углеводородов в конденсаторах, увеличено на 5-10% годовое производство и на 2-4% снижена себестоимость кислорода.

3. Количество тепла, необходимого для обеспечения незабываемости регенераторов периодическим подогревом газа обратного потока, уменьшается в 2-3 раза при повышении на 10-20 К температурного уровня насадки в периодах прямого дутья циклов с подогревом.

4. При подогреве газа обратного потока среднее содержание двуокиси углерода в воздухе после регенераторов не превышает 1 см³/м³, а н-пентана - 1·10⁻⁴ см³/м³.

Основные положения диссертации изложены в следующих

печатных работах

1. А.с. № 421866 (СССР). Способ удаления примесей из насадки регенераторов воздуходелительных установок. Н.К.Поливалин. - Опубл. в Б.И. 1974, № 12.

2. Векслер М.Д., Королев А.Я., Кашутская Т.П., Покора Н.М., Поливалин Н.К. Частичный отогрев конденсаторов, как метод борьбы со взрывами. - Химическая промышленность Украины, 1970, № 6, с.53-55.

3. Густов В.Ф., Даниленко Л.П., Павлова Л.А., Поливалин Н.К., Туманов А.И. Расчет процессов массообмена в регенеративных теплообменниках. - В кн.: Процессы, технология и контроль в криогенном машиностроении: Сб. науч. тр. Балашихинское НПО Криогенмаш. - Балашиха, 1976, с. II-21.

4. А.с. № 328307 (СССР). Способ очистки насадки регенераторов Н.К.Поливалин. - Оpubл. в Б.И., 1972, № 6.

5. А.с. № 690257 (СССР). Способ охлаждения и очистки газа в регенераторах. Н.К.Поливалин. - Оpubл. в Б.И. 1979, № 37.

6. Поливалин Н.К., Даниленко Л.П.. Повышение эффективности азотных регенераторов воздухоразделительных установок. - Кислородная промышленность, 1973, № 3, с.3-9.

7. Поливалин Н.К., Даниленко Л.П. Повышение технико-экономических показателей установок разделения воздуха. - Промышленная энергетика, 1974, № 7, с.17-19.

8. Поливалин Н.К., Даниленко Л.П., Туманов А.И. Влияние переключения потоков в регенераторах на тепло-и массообмен. - Балашиха, Харьков, 1980. - 22 с. - Рукопись представлена НПО Криогенмаш, ПТП "Укрэнергочермет". Деп. в ЦИНТИхимнефтемаше, 1980.

9. Поливалин Н.К., Даниленко Л.П., Туманов А.И. Очистка насадки регенераторов от примесей частичным подогревом газа обратного потока. Балашиха, Харьков, 1980, - 20 с. - Рукопись представлена НПО Криогенмаш, ПТП "Укрэнергочермет". Деп. в ЦИНТИхимнефтемаше, 1980.