

Авторефер
РЗЧ

Н

проф. Зриньку М. Г.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

РЕЗНИКОВ Лев Ефимович

УДК 621.594-932.214

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ
СИСТЕМ ГАЗИФИКАЦИИ КРИОПРОДУКТОВ ВЫСКОГО ДАВЛЕНИЯ

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1987

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

- Научный руководитель - доктор химических наук,
профессор ЦЫКАЛО А.Л.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор БРОДЯНСКИЙ В.М.
доктор технических наук,
доцент ЛАВРЕНЧЕНКО Г.К.
- Ведущая организация - Балашихинское ордена Ленина научно-
производственное объединение крио-
генного машиностроения имени
40-летия Октября.

Защита диссертации состоится "16" ноября 1987 г.
в 11 часов на заседании специализированного совета
К.068.27.01 при Одесском технологическом институте
холодильной промышленности по адресу:
270057, г. Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, СТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "9" октября 1987 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
Инст. техн. наук, доцент

Р.К.Никульшин

- Схема эле
усилител

1785

K_и

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В соответствии с решениями XXVII съезда КПСС одна из важнейших задач машиностроения состоит в создании продукции, превосходящей высший мировой уровень.

Перспективы развития многих отраслей народного хозяйства связаны с совершенствованием криогенных систем, обеспечивающих хранение жидких криопродуктов и выдачу сжатых газов. Высокие темпы роста потребления криопродуктов в условиях увеличения дефицита материальных и энергетических ресурсов определяют актуальность исследований и разработок, направленных на повышение эффективности газификационных установок (ГУ).

Оборудование ГУ - теплообменная аппаратура и терморегуляторы, насосы и изотермические емкости широко используется и в других криогенных системах - криостатах и хранилищах сжиженных газов, ожижителях и воздухоразделительных установках. Поэтому исследование и совершенствование газификационного оборудования важно для повышения уровня криогенной техники в целом.

Цель работы состояла в повышении эффективности систем газификации криопродуктов высокого давления с учетом взаимодействия элементов ГУ с окружающей средой и потребителями, а также в разработке математических моделей элементов ГУ.

Научная новизна. Впервые рассмотрено взаимодействие элементов системы газификации высокого давления: ГУ - окружающая среда - потребитель. На основе совместного анализа процессов нагрева криопродуктов в атмосферных испарителях высокого давления (АИВД) и наполнения баллонов обоснована целесообразность газификации без догрева электронагревателями после АИВД при температурах производного потока (ПП), соответствующих низким температурам атмосферного воздуха в зоне эксплуатации ГУ.

Теоретически обоснована и реализована на практике термостабилизация ПП, нагретого в испарителе выше заданной температуры, путем теплоотвода через вспомогательные гетерофазные среды с переменной тепловой проводимостью, на вход АИВД.

Предложены методы бездренажного хранения низкотемпературных веществ в виде неравновесных конденсированных фаз с управляемым тепловым контактом, способ утилизации тепла, рассеиваемого приводом засоса, и эффективные компоновки теплообменников.

xv 1312

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

Математическая модель теплообмена тонкой пластины, позволяющая рассчитывать распределения температур и тепловых потоков, использована для расчетов ребер сложной формы и многоточных матричных теплообменников. Разработаны методики и программы расчетов на ЭВМ теплообмена в АИВД и наполнения баллонов.

На основе выполненных исследований разработаны теплообменные аппараты и способы газификации, новизна которых подтверждена 22 авторскими свидетельствами.

Научные положения, защищаемые в работе.

Термостабилизация ПП на уровне низких температур атмосферного воздуха в зоне эксплуатации ГУ переменным тепловым потоком, направленным от выхода на вход АИВД, повышает эффективность ГУ.

Теплообменные системы на основе автогенерируемых гетерофазных сред с фиксируемыми параметрами обеспечивают терморегулирование тепловыделяющих объектов, в том числе продуктов газификации.

Основные научные результаты, полученные в работе.

Тепловая проводимость гетерофазных сред в системах терморегулирования пропорциональна температурным разбалам объектов.

Квазистационарные режимы газификации в условиях роста толщины инея в АИВД обеспечиваются компенсирующими процессами увеличения его теплопроводности вследствие уплотнения инея и интенсификации теплоотдачи из-за повышения скорости воздуха.

При низких (223...243К) температурах азота и кислорода, подаваемых в баллоны, точность дозирования по давлению соответствует требованиям стандартов.

Увеличение сроков хранения неравновесных конденсированных фаз (по сравнению с продуктами в виде шуги) обеспечивается повышением температуры жидкости и возможностью пополнения твердой фазы.

Многослойно-пленочное течение теплоносителей в компактных матричных теплообменниках с совпадающими перфорациями, встраиваемых в насос для снижения кавитационного запаса, обеспечивает интенсивный теплообмен при низком гидравлическом сопротивлении.

Практическая ценность и внедрение результатов работы.

Результаты исследований использованы при разработке АИВД и термостабилизаторов для газификационных установок нового поколения: Г-7, 4-0, 25/20; Г-7, 4-0, 5/20; Г-1, 6-0, 28/40; ПГ-3, 2-0, 63/20; АГУ-2М-1; АГУ-8К-1. В 1986...87 г.г. выпущено 420 стационарных и транспортных установок нового типа. Применение АИВД и термостабилизаторов позволило снизить энергозатраты на газификацию втрое, повысить автономность и надежность ГУ.

Упрощение и повышение точности дозирования сжатых газов при наполнении баллонов, снижение затрат энергии и увеличение производительности являются результатами внедрения режимов газификации на основе нового метода термостабилизации производственного газа. Результаты исследований могут быть использованы при создании систем терморегулирования различных тепловыделяющих объектов.

Охлаждение криопродукта перед всасывающим клапаном улучшает динамические характеристики насоса, а теплообмен электромеханического привода насоса с продуктом обеспечивает его догрев после испарителя за счет утилизации рассеиваемого тепла.

При раздельном хранении конденсированных фаз низкотемпературных продуктов может быть обеспечена эффективная компенсация теплопритоков и перелив жидкости без механических нагнетателей за счет снижения давления при конденсации пара на твердой фазе.

Хорошее совпадение результатов экспериментальных и теоретических исследований позволило использовать разработанные алгоритмы, методики и программы для выполнения проектных, проверочных и оптимизационных расчетов промышленных ГУ, а также для обработки экспериментальных данных.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Всесоюзных научно-технических конференциях: "Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха" (г. Ташкент, 1977), "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и криогенной техники" (Ленинград, 1981), "Криогенная техника - 82" (г. Балашиха, 1982), "Криогенная техника - 87" (Москва, 1987), на Всесоюзном научно-техническом семинаре "Научно-технические проблемы криогенной техники и кондиционирования" (Москва, МВТУ им. Баумана, 1984), а также на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ОТИП 1980...86 г.г.

Публикации. По результатам исследований опубликовано четыре статьи и получено 22 авторских свидетельства.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и приложений. Работа содержит 130 страниц основного текста, 56 рисунков и 12 таблиц. Библиография содержит 186 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В диссертации на основе литературных данных рассмотрены особенности методов газификации и оборудования криогенных ГУ,

а также о режимах эксплуатации и взаимодействии оборудования ГУ с окружающей средой и потребителями.

Насосные ГУ высокого давления, снабженные АИВД, по энергетической эффективности занимают промежуточное положение между установками, использующими для нагрева продукта источники тепла высокого потенциала и системами, в которых механическая энергия для сжатия криопродуктов вырабатывается в силовых циклах, реализуемых в интервалах температур окружающей среды и газифицируемых потоков (например, в термомеханических насосах). При этом, несмотря на значительную термодинамическую необратимость теплообмена, установки с АИВД вне конкуренции по простоте и надежности.

Рассмотрены особенности низкотемпературных испарителей различных типов. Разработана классификация испарителей по наиболее существенным признакам: в соответствии с типами источников тепла, принципами передачи тепла продукту, по особенностям конструкций и технологии производства.

Сложность и многообразие процессов теплообмена обрешения с влажным воздухом (конденсация водяного пара, выпадение и рефракционная иней), определяющих зависимость свойств инея от предистории развития слоя, затрудняют создание надежных методов расчета испарителей.

Одно из важных направлений совершенствования ГУ связано с оптимизацией температуры ПП. Многими исследователями отмечалась целесообразность наполнения реципиентов холодными газами в связи с возможностью обеспечения изотермичности процесса. Однако ранее не ставились задачи создания систем терморегулирования ПП, обладающих повышенной надежностью, и обоснования диапазонов температур ПП, обеспечивающих приемлемую точность дозирования.

В ряде работ рассмотрено взаимодействие отдельных элементов систем газификации, выполнен термодинамический анализ ГУ высокого давления, подтвердивший целесообразность использования АИВД. Однако потери энергии и криопродуктов в ГУ все еще велики.

В соответствии с целью работы на основе системного подхода сформулированы задачи исследования:

1. Выявить потери энергии и продуктов в ГУ, а также определить пути повышения эффективности оборудования и процессов ГУ.
2. Разработать оптимальные конструкции теплообменников для АИВД и высоконадежные терморегуляторы, обеспечивающие стабилизацию температуры ПП на низком уровне.

3. Разработать криогенные насосы с малым кавитационным запасом и простые методы бездренажного хранения криопродуктов.

4. Разработать математические модели АИВД и процессов наполнения баллонов, а также программы расчетов ГУ на ЭВМ.

5. Исследовать разработанное оборудование для определения реальных эксплуатационных характеристик и оценки эффективности разработанных расчетных методик.

Исследование и разработка атмосферных испарителей

В процессе создания серийной конструкции разработано и изготовлено девять полноразмерных АИВД. Исследованы аппараты из ребристых теплообменных элементов и системы на основе термосифонных контуров с испарителями вспомогательных теплоносителей (хладагентов) из прокатно-сварных панелей. Аппараты различались формой обрешения и методами его соединения с трубами (лестничные, с паяным обрешением, в виде литых теплообменных блоков, с приварными ребрами и на основе фасонных профилей из алюминиевых сплавов). Конструкция серийного АИВД определена по результатам экспериментальных и расчетных исследований и с учетом разработанной классификации испарителей. Предпочтительными для серийного производства оказались конструкции из унифицированных прямотрубных теплообменных элементов с продольнопластинчатым обрешением, технологичность которых обеспечена сочетанием высокопроизводительных процессов прессования и сборки ребристых профилей с трубами высокого давления. Соединение на основе спирально-шлицевого замка (рис. 1) сочетает механическую прочность и надежность с низким термическим сопротивлением (табл. I).

Таблица I.

Характеристики теплообменных элементов серийных АИВД

Характеристики	ЭТ 100 x 6	ЭТ 160 x 12
	"Звездочка"	"Снежинка"
Диаметр наружный, мм	100	160
Число ребер	6	12
Поверхность обрешения, м ² /м	0,5	1,4
Масса 1 пог. метра, кг	3,1	4,8
Давление максимальное, МПа	50	50

Экспериментальные стенды базировались на опытных и промышленных полноразмерных ГУ. Исследования в условиях промышленной эксплуатации позволили учесть факторы, оказывающие существенное влияние на режимы газификации, но трудновоспроизводимые в лабораторных условиях. Стенды рассчитаны на исследования АИВД производительностью 100...800 кг/час кислорода или азота под давлением до 42 МПа при температуре воздуха 223...323К и влажности до 100%. Стенды снабжены приборами для регистрации давлений, температур и расходов технологических потоков. Для регистрации распределения температур по ходу газифицируемого потока на изгибах трубопроводов между теплообменными элементами установлены поверхностные термодатчики. Приемлемая точность измерений достигнута за счет теплоизоляции зон установки и фиксации термодатчиков на трубах теплопроводным компаундом. Предельная погрешность измерений температуры поверхностными термодатчиками не превышала двух градусов.

Для расчета нагрева продукта в АИВД рассмотрены взаимосвязанные процессы теплопередачи: теплоотдача от внутренних стен трубы и от влажного воздуха (с учетом влаговыпадения и намораживания инея), а также теплопроводность слоистой стенки канала высокого давления, ребер сложной формы и слоя инея (с учетом изменения его характеристик).

На теплообменной поверхности АИВД последовательно сменяют друг друга четыре зоны, различающиеся по характеру теплообмена и физическим свойствам инея: зона сыпучего инея, легко уносимого потоком воздуха; зона плотного, устойчивого инея, зона капельной конденсации влаги и зона сухого теплообмена.

В элементах, соединенных последовательно, поочередно реализуется теплообмен по схемам прямоток-противоток. С учетом большого числа элементов и относительно незначительного изменения температуры воздуха, расход которого в 20...60 раз превышает подачу газифицируемого продукта, в качестве расчетной принята эквивалентная схема поперечноточного теплообменника. Значения параметров теплообмена в пределах каждого элемента принимались одинаковыми. Значения скорости воздуха принимались независимыми от координат, а его расчетная температура определялась как среднее арифметическое между температурами на входе и выходе теплообменного пакета.

При решении задачи теплообмена на ЭВМ численным методом

для учета динамики изменения расходов и скоростей воздуха в условиях инееобразования решалась система уравнений:

$$Q = \frac{a_0 + a_1 T_1 + a_2 T_2}{b_0 + b_1 T_1} ; \quad (1)$$

$$H = \left(\xi \frac{l}{d_0} + \xi_1 + \xi_2 \right) \frac{\rho_B W_B^2}{2} , \quad (2)$$

где T_1, T_2 - полиномы Чебышева; $T_1 = 0,02 \cdot H$; $T_2 = 2 \cdot H^2 - 1$; $a_0 = -32,074$; $a_1 = 99,14$; $a_2 = 47,73$; $b_0 = 1$; $b_1 = 4,82$.

Уравнение (1) аппроксимирует паспортную аэродинамическую характеристику осевого вентилятора В-0,6-300 №6,3; уравнение (2) в форме соотношения Дарси-Вейсбаха связывает расход воздуха и текущие геометрические параметры с сопротивлением воздушного тракта. Свободное сечение воздушного тракта рассчитывалось на основе данных о толщинах инея на всех элементах:

$$S_n = A \cdot B - \frac{\pi \cdot N \cdot d_0^2}{4} - n h \sum_i (\delta_p + \delta_u) . \quad (3)$$

Действующие поверхности теплообмена определялись с учетом заполнения инеем межреберного пространства:

$$f_{Ri} = \pi (D + \delta_{ui}) + [f_R - \pi (D + \delta_{ui})] \left\{ 1 - \left[\frac{4 n h p (\delta_p + \delta_{ui})}{\pi d^2} \right]^R \right\} . \quad (4)$$

Интенсивность нестационарного теплообмена в АИВД зависит от распределений масс, плотностей, "возрастов" инея. Относительно низкие темпы изменения параметров теплообмена в квазистационарном режиме газификации позволяют с достаточной точностью описать процесс зависимостями для стационарного теплообмена:

$$Q_i = K_i (\bar{T}_B - \bar{T}_{n_i}) \cdot L_i ; \quad (5) \quad d m_{ui}^i = \frac{d m_{ui} \cdot d}{150 + D - T_R} \quad (\text{при } T_R < 150\text{K}) ; \quad (7)$$

$$\delta_{ui} = \frac{m_{ui}}{\rho_{ui} \cdot f_i} ; \quad (6) \quad \lambda_i = 0,249 (1 + 10^{-4} \cdot \rho_i^2) . \quad (8)$$

Для воспроизведения пространственно-временной структуры температурных полей, потоков тепла, распределений масс, плотностей и толщин инея в основном программном цикле последовательно выполнялись расчеты теплопередачи на всех теплообменных элементах. На каждом шаге рассчитывался тепловой поток к продукту на i -м элементе (5); с помощью соотношения Меркеля вычислялась доля "влажного" тепла, подведенного при конденсации и вымораживании водяных паров, а при отрицательных темпе-

ратурах рассчитывались масса и возраст инея, его толщина (6) и теплопроводность (3). Среднеинтегральная по толщине плотность инея определялась на основе данных, полученных А.А. Гоголиным. Масса инея в зоне сыпучего инея (при $T_n < 150\text{K}$) рассчитывалась с помощью эмпирического соотношения (7), учитывающего унос инея. Для расчета термического сопротивления спирально-шлицевого соединения слой полимерной композиции сложной формы заменен эквивалентным по термическому сопротивлению цилиндрическим слоем.

Расчетные и экспериментальные зависимости недорекуперации от продолжительности газификации $\Delta T_n = f(\tau)$ и распределения температур по элементу приведены на рис. 2 и 3. Незначительность отклонений расчетных значений от экспериментальных параметров подтверждает адекватность модели реальным аппаратам (среднее квадратичное отклонение не превышает 5 градусов).

Ввиду отсутствия общего решения задачи определения эффективности тонких ребер сложной формы теплообмен раздвоенных ребер переменного сечения типа "Снежинка" рассчитывался итерационным путем. Пошаговым численным интегрированием системы дифференциальных уравнений с последовательными подстановками рассчитывались распределения температур $T(x)$ и тепловых потоков $q(x)$ по ребру (пластине).

$$\frac{\partial q}{\partial x} = 2n \cdot \lambda(\theta) \cdot \theta; \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = q(x) / [S_R(x) \cdot \lambda(T)], \quad (10)$$

граничные условия:

$$x = 0; q = 0; T_0 < T_{x=0} < T_a;$$

$$x = h; q = q_c = q_{nn}; T_{x=h} = T_0.$$

Целью оптимизации являлась минимизация приведенных затрат на изготовление АИВД. Анализировались варианты оребрения теплообменных элементов ЭТ 160x24, различавшиеся массой, ее распределением по высоте ребра, а также размерами оснований и ответственных участков ребер (рис. 1).

На основе выполненных расчетов установлено, что в диапазонах $\alpha_s = 2000 \dots 5000$ и $\alpha_n = 10 \dots 100$ оптимальным является оребрение, имеющее массу 3,0 кг/м с углом при вершине $\chi_1 = 2,0^\circ$.

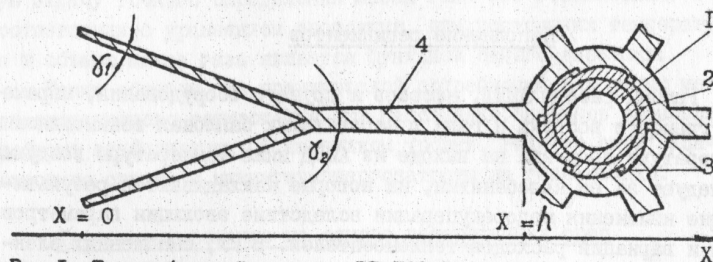


Рис. 1. Теплообменный элемент ЭТ 160x12.

1-труба высокого давления; 2-спирально-шлицевое соединение; 3-металлополимерный композит; 4-ребро.

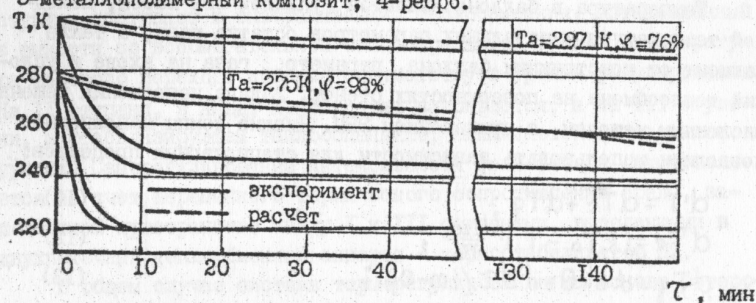


Рис. 2. Изменение температуры продукционного азота в газификаторе с атмосферным испарителем: а - без термостабилизации; б - с термостабилизацией на основе двухфазного RII_3 , $T_{пл} = 237\text{K}$; в - с термостабилизацией на основе трехфазной CO_2 , $T_T = 216,6\text{K}$.

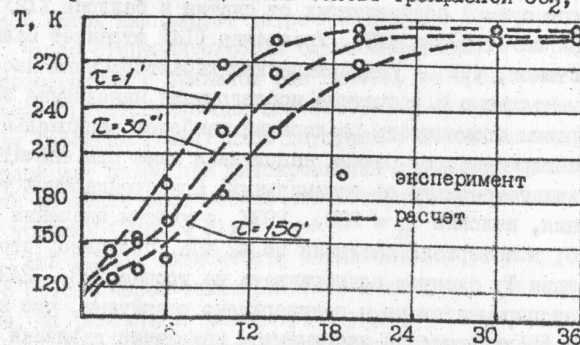


Рис. 3. Изменение распределений температур по элементам АИВД со временем. Продукт - азот; $Q = 300\text{кг/час}$; $T_a = 296\text{K}$; $\varphi = 76\%$.

Наполнение реципиентов

Режимы работы АИВД, насосов и другого оборудования, параметры греющего воздуха и газа в наполняемых баллонах взаимосвязаны. Температура продукта на выходе из АИВД ниже температуры воздуха и следует за ее колебаниями, на которые накладываются результирующие изменения недорекуперации вследствие эволюции параметров и вариаций расходов теплоносителей. В ГУ, снабженных электродогревателями, температуру III стабилизируют на уровне высших температур, достижимых в АИВД (273...300К).

Температура в баллоне является функцией его массы, исходной температуры и начальных параметров остатка газа, а также зависит от конструкции баллона, параметров газа на входе и условий теплообмена на поверхностях стенок. Задача наполнения решена численным методом, с применением ЭВМ. Низкие темпы наполнения позволили использовать зависимости для стационарных процессов:

$$dT = dT_c + dT_g; \tag{II}$$

$$dT_c = (kT_0 - T) \cdot \frac{dm}{m}; \tag{I2}$$

$$dT_g = \alpha_{вн} \theta_{вн} F dT / (m \cdot c_p); \tag{I3}$$

$$M_s \cdot c_s \cdot dT_s + \alpha_{вн} F_{вн} \theta_{вн} \cdot dT + \alpha_{нв} \theta_{нв} F_{нд} dT = 0; \tag{I4}$$

$$G = 0,95 V_{on} (1 - 0,008 P)^{1,5} \tag{I5}$$

Изменение температуры в баллоне при поступлении порции газа определялось суммой составляющих от сжатия в баллоне (I2) и от теплообмена со стенками (I3). Уравнение (I4) отражает баланс энергии для стенок, (I5) - гидравлическая характеристика насоса.

Экспериментальные и расчетные исследования наполнения баллонов подтвердили возможность реализации наиболее рационального, близкого к изотермическому режима наполнения даже при значительных отклонениях температур от оптимальных. При стандартных условиях наполнения, положив $T_a = 283...293K$, с учетом значения $K = 1,4...1,5$, в интервале давлений до 42 МПа, получено, что температуру газа T_0 следует поддерживать на уровне 223...243K. Установлено экспериментально и подтверждено расчетами, что в этих условиях последующее за наполнением изменение давления в состоянии термического равновесия с окружающей средой меньше допустимой стандартами погрешности дозирования. Таким образом, одновременно с энергетическим выигрышем удается решить актуаль-

ную задачу точного определения массы газа без взвешивания: в соответствии с уравнением состояния, при постоянных температуре и объеме масса газа является функцией одного давления.

Таким образом, из практической потребности в простых методах оперативного дозирования при наполнении баллонов возникла проблема стабилизации III на низком уровне. Решение этой задачи позволило свести к минимуму энергозатраты на газификацию.

Терморегулирование на основе гетерофазных сред

ГУ с терморегулированием III содержит три последовательные ступени теплообмена (рис. 4 в, г, ж). Сжатый криопродукт на I ступени поступает в вымораживающий теплообменник, установленный в емкости со вспомогательной теплопередающей средой, температура фазового перехода которой соответствует уровню регулирования. На II ступени, в АИВД, криопродукт нагревается, а на III ступени, в стабилизирующем теплообменнике, охлаждается до заданного уровня. Саморегулирование интенсивности теплообмена осуществляется за счет переменного термического сопротивления среды, заполняющей пространство между I и III ступенями, выделенными в двухточечный теплообменный аппарат - термостабилизатор III.

В общем случае система терморегулирования на основе гетерофазной среды содержит тепловыделяющий объект регулирования, охладитель и собственно регулятор, например, термостабилизатор ГУ, управляющий интенсивностью теплообмена от объекта в соответствии с величиной разбаланса температуры. Регулирующий тепловой поток инициирует встречные фазовые превращения в среде.

Число степеней свободы однокомпонентных гетерофазных сред, в соответствии с правилом фаз Гиббса, не превышает единицы. Для точной термостабилизации целесообразно использовать трехфазные среды (тройная точка) либо двухфазные сочетания жидкой фазы с твердой или паром при фиксированных давлениях. Возможность изменения давлений сред обеспечивает терморегулирование на переменных уровнях (рис. 4 е).

Для вывода зависимости интенсивности регулирующего теплового потока через теплоноситель, содержащий твердую и жидкую фазы, от разбаланса рассмотрена упрощенная схема с плоскопараллельными поверхностями теплообменников I и III ступеней. Толщина слоя твердой фазы на вымораживающем теплообменнике может быть определена с помощью зависимости:

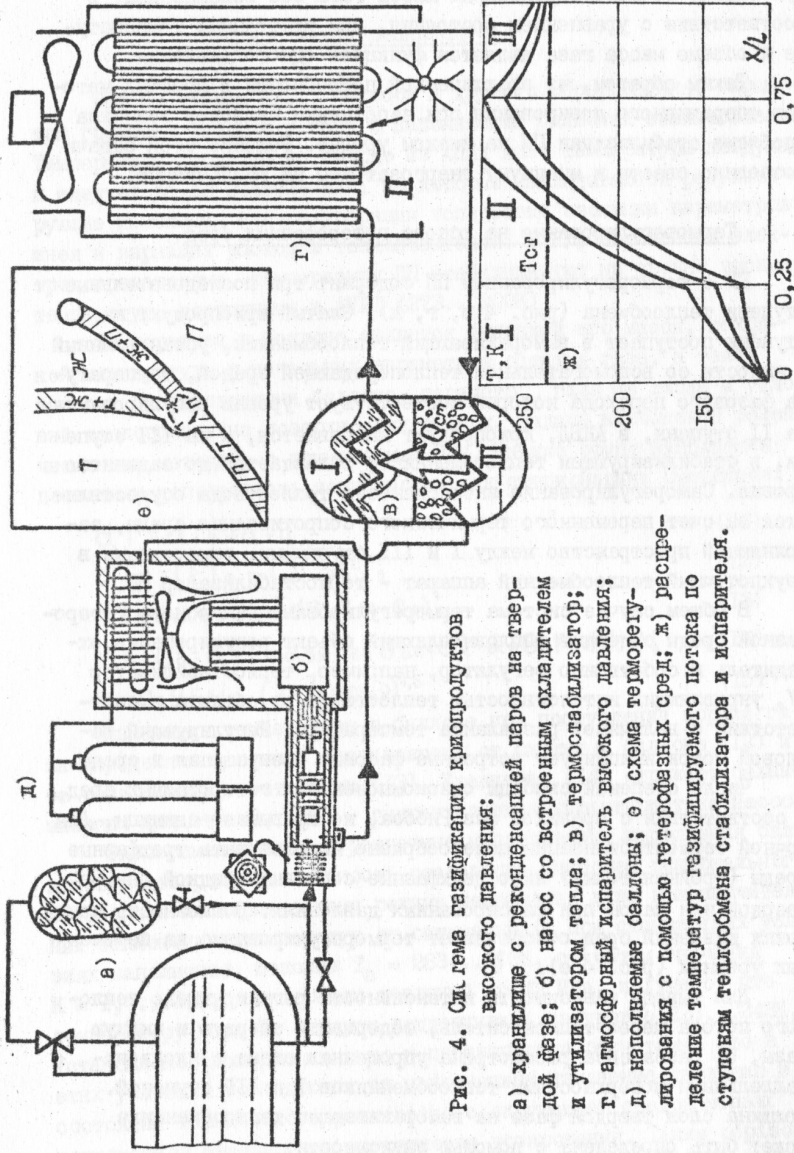


Рис. 4. Схема газификации криопродуктов высокого давления:
 а) хранилище с реконденсацией паров на твердой фазе; б) насос со встроенным охладителем и утилизатором тепла; в) термостабилизатор; г) атмосферный испаритель высокого давления; д) наполняемые баллоны; е) схема терморегулирования с помощью гетерофазных сред; ж) распределение температур газифицируемого потока по ступеням теплообмена стабилизатора и испарителя.

$$\delta_T = \frac{\lambda_T \cdot \theta_T}{q_T} = \frac{A_1}{q_T} \quad (16)$$

Эквивалентная теплопроводность жидкостного слоя, являющаяся функцией $G \cdot P \cdot \tau$, при постоянстве теплофизических свойств жидкости зависит от определяющего размера и температурного напора:
 $G \cdot P \cdot \tau = 0,5 \rho \delta_{ж}^3 \cdot \beta \cdot \theta_{ж} \cdot \frac{1}{\alpha} = A_2 \cdot \delta_{ж}^3 \cdot \theta_{ж} \quad (17)$

В области значений $10^3 < G \cdot P \cdot \tau < 10^6$ толщиной слоя жидкости можно пренебречь:

$$q_{ст} = 0,105 (A_2 \cdot \delta_{ж}^3 \cdot \theta_{ж})^{0,3} \cdot \lambda_{ж} \cdot \theta_{ж} \cdot \delta_{ж}^{-1} = A_3 \cdot \theta_{ж}^{1,3} \quad (18)$$

Прогрессивное увеличение теплового потока с ростом температурного напора, входящего в соотношение (18) с показателем степени выше единицы, свидетельствует об эффективности процессов теплообмена в двухфазных средах, содержащих жидкую и твердую фазы, применительно к решению задачи термостабилизации.

Распределение температур по стабилизирующему теплообменнику связано с функцией (18) интенсивности теплового потока:

$$T(x) = T_0 - \frac{\int q_{ст}(x) \cdot dx}{G \cdot C_p} \quad (19)$$

Расчет термостабилизатора выполняется численными методами для наиболее тяжелого режима с использованием соотношений (16)...(19). Минимальное расстояние между теплообменниками I и III рассчитывается с учетом условия непромерзания всего слоя вспомогательного теплоносителя в промежутке между ними.

Экспериментальные исследования подтвердили эффективность термостабилизаторов на основе теплоносителей, содержащих твердую фазу с жидкой (H₂O) и трехфазную (CO₂) среду (рис. 2).

Практически важен анализ взаимодействия термостабилизаторов с другими элементами систем газификации и влияния стабилизации на основные характеристики ГУ. Избыточное тепло от нагрева III сверх заданного уровня отводится на вход АИВД (рис. 4). При этом, вследствие уменьшения тепловой нагрузки на АИВД, интенсивность выпадения инея снижается. Например, если при $T_a = 293K$ уровень термостабилизации снижен с 293K до 210K, продолжительность работы ГУ до оттайки инея возрастает на 40%. В этом случае среднее давление нагнетания и мощность, потребляемая насосом при наполнении баллонов, снижаются на 35 и 45%, а производительность ГУ увеличивается на 6%.

Повышение эффективности оборудования газификаторов

Помимо использования тепла окружающей среды для газификации и терморегулирования на низком уровне, в ГУ имеются и другие резервы снижения энергозатрат и уменьшения потерь продуктов. В частности, потери мощности приводом насоса из-за рассеивания обмотками двигателя и парами трения достигают 15...60% (в зависимости от режимов). Система утилизации тепла, генерируемого приводом, содержит теплообменник-догреватель III, заключенный в теплоизолированную камеру совместно с приводом. Вентилятор системы охлаждения двигателя обеспечивает циркуляцию воздуха, передающего тепло от привода догревателю (рис. 4 б).

Величина нагрева III зависит от соотношения теплоемкости III и мощности утилизованного теплового потока, определяемой суммой электрических и механических потерь тепла через теплоизоляцию камеры.

Потери криопродуктов могут быть уменьшены за счет снижения кавитационного запаса насоса и компенсации теплопритоков в хранилище.

Устойчивая (без кавитации) работа насоса со встроенным теплообменником обеспечивается при давлении в емкости 0,01...0,03 МПа за счет охлаждения криопродукта перед всасывающим клапаном криоагентом, кипящим в рубашке насоса. Охлаждение обеспечивает и улучшение динамических характеристик насоса: пуск без продувок, неограниченное время работы. При этом исключаются невыкачиваемые остатки криопродукта в емкости (рис.4 б).

Компоновка матричного охладителя насоса с совпадающими перфорациями обеспечивает его высокую теплогидравлическую эффективность благодаря многослойно-пленочному течению теплоносителей и оптимальной форме наружных ребер. Интенсивность теплоотдачи при пленочном течении обратно пропорциональна расстояниям между матрицами и не зависит от скорости теплоносителя:

$$\alpha = 8 \cdot \lambda_{nn} / (\varepsilon \cdot \delta_{nn}) \quad (20)$$

В хранилище конденсированных газов использована теплообменная система контактного типа. Хранилище снабжено аккумулятором холода - емкостью для твердой фазы, соединенной паровой и жидкостной линиями с емкостью для жидкого продукта. Регулирование давления осуществляется путем управления скоростью конденсации неравновесной паровой фазы на замороженном продукте.

Расчетная длительность хранения разделенных неравновесных фаз превышает длительность хранения шугообразных продуктов благодаря более высокой среднеобъемной температуре, отсутствию ограничений содержания твердой фазы и возможности ее пополнения, а простота регулирования давления позволяет переливать жидкость без механических нагнетателей (рис. 4 а).

Упрощенный вариант хранилища содержит изотермическую емкость с придонными элементами для удержания твердой фазы.

Продолжительность хранения без дозаправки твердой фазой может быть оценена по значению параметра $X = \rho_T \zeta_T$, связывающего объемную хладоаккумуляцию твердой фазы $X = \rho_T \zeta_T$, среднеобъемную температуру продукта и коэффициент теплопередачи:

$$\tau_{xp} = \frac{\rho_T \zeta_T \beta_T}{Kv(Ta - Tnp)} \quad (21)$$

Эффективность метода оценивается с учетом значений хладоаккумуляции, которые, например, для метана, азота, аммиака и двуокиси углерода составляют от 24 до 330 МДж/м³.

Результаты анализа взаимодействия элементов ГУ, потребителей газов и окружающей среды обеспечили основу для совершенствования систем газификации криопродуктов и позволили сформулировать следующие

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Трехступенчатая схема теплообмена с использованием вспомогательных гетерофазных сред обеспечивает устойчивую термостабилизацию в ГУ. В зависимости от требований к точности и необходимости изменения температурных уровней объектов предложено использовать различные сочетания фаз вспомогательных сред. Метод применим для терморегулирования в электронике, энергетике, биологии.

2. Термостабилизация III на уровне низших температур воздуха в зоне эксплуатации позволяет снизить расход электроэнергии, а также повысить производительность ГУ и точность дозирования при заправке баллонов по давлению.

3. Технико-экономические преимущества АИВД на основе пресованных алюминиевых ребристых профилей, соединенных с трубами высокого давления спирально-шлицевым замком, обусловлены их технологичностью и высокой интенсивностью теплообмена.

xv 1312

4. Малокавитирующий насос со встроенным охладителем, система утилизации тепла, рассеиваемого приводом насоса, методы бездренажного хранения разделенных конденсированных фаз криопродуктов позволяют снизить материальные и энергетические потери в ГУ.

5. Прямоточная схема матричного теплообменника обеспечивает его высокую теплогидравлическую эффективность за счет организации многослойно-пленочного течения теплоносителей.

6. Расчетно-теоретические модели ребристых элементов, АИВД и процессов наполнения баллонов обеспечивают надежность инженерных методов расчетов оборудования ГУ и режимов газификации.

7. Выполненные исследования обеспечили создание и внедрение в серийное производство АИВД и термостабилизаторов ПП, составивших основу ресурсосберегающих ГУ нового поколения, в которых затраты электроэнергии по сравнению с установками старого типа снижены втрое. Годовой экономический эффект составляет 382 тыс.руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Резников Л.Е., Цыкало А.Л., Багмет А.Д. Использование гетерофазных теплоносителей для термостабилизации потоков в криогенных газификаторах. - Киев, 1986. - 23 с.: - Деп. в УкрНИИТИ 14.04.86, №1048.

2. Резников Л.Е. Термодинамические аспекты регулирования температуры тепло выделяющих объектов с помощью гетерофазных теплоносителей. - Киев, 1986. - 44 с.: - Деп. в УкрНИИТИ 13.08.86, №1901.

3. Браун В.М., Браиловский Я.Л., Резников Л.Е. Особенности наполнения баллонов на криогенных газификационных установках. - М., 1986. - 13 с.: - Деп. в ЦИТИХимнефтемаш 28.08.86г., №1588.

4. Резников Л.Е., Цыкало А.Л. Разработка и исследование атмосферных испарителей криогенных жидкостей. - Киев, 1987. - 76 с.: - Деп. в УкрНИИТИ 14.01.87 г., №383.

5. Резников Л.Е. Разработка и исследование эффективных газификаторов криогенных жидкостей. В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и криогенной техники" - Л.: 1981.

6. Браун В.М., Вайнштейн Г.Е., Резников Л.Е. Разработка и исследование эффективных криогазификаторов высокого давления. В кн.: Тезисы докладов III Всесоюзной научно-технической конференции "Криогенная техника - 82". - Балашиха, 1982.

7. А.с. 1019070 (СССР). Устройство для перекачивания крио-

генной жидкости/ Л.Е.Резников, В.М.Браун - Заявл. 27.01.82, № 3387109/23-26; опубл. в Б.И., 1983, № 19.

8. А.с. 1086339 (СССР). Теплообменный элемент/ Л.Е.Резников и др. - Заявл. 11.01.83, №3581697/24-06; опубл. в Б.И., 1984, №14.

9. А.с. 1126801 (СССР). Пакет матричного теплообменника/ Л.Е.Резников, В.А.Веселов - Заявл. 8.04.83, №3616831/24-06; опубл. в Б.И., 1984, № 44.

10. А.с. 1142693 (СССР). Способ газификации криогенной жидкости/ Л.Е.Резников, В.М.Браун, Н.Р.Васильев, О.Л.Гойхман - Заявл. 11.04.83, № 3581142/22-26; опубл. в Б.И., 1985, № 8.

11. А.с. 1153170 (СССР). Газификатор криогенной жидкости/ Л.Е.Резников, О.Л.Гойхман - Заявл. 11.01.83, № 3541933/23-26; опубл. в Б.И., 1985, № 16.

12. А.с. 1188444 (СССР). Хранилище для низкотемпературной жидкости/ Л.Е.Резников, Н.Р.Васильев - Заявл. 26.10.83, № 3655660/23-26; опубл. в Б.И., 1985, № 40.

Условные обозначения:

Q - объемный расход; H - напор вентилятора; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления; S - сечение; τ - время, "возраст"; B_1, B_2 - размеры сечения; l - длина; d - диаметр; w - скорость; N - количество элементов; n, δ, h - количество, толщина и высота ребер; q - тепловой поток; f - поверхность элемента; П, A, B, C, D - константы; K - коэффициент теплоотдачи; m, M - масса; G - массовый расход; $V_{оп}$ - описанный объем; ϵ - пористость; $\delta_{мт}$ - толщина матрицы с проставкой; λ - теплота плавления; θ - температурный напор; β - содержание твердой фазы; X - хладоаккумуляция.

Индексы при условных обозначениях:

i - номер элемента; O - начальный; бн - внутренний; н - наружный; с - сжатие; ж, т - жидкая и твердая фазы; ст - стабилизированный; а - атмосферный; в - воздух; ц - иней; р - ребро; пп - продукт; п - пакет; б - баллон; э - элемент; > - недорекуперация; м - матрица; исх - исходное приближение; q - тепловой; V - объемный.

Резн