

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

КРИОГЕННАЯ ИСПАРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение, 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов

САМАРА
Издательство Самарского университета
2023

УДК 621.59(075)

ББК 3392я7

К820

Авторы: *Д.В. Сармин, В.М. Боровик, А.Б. Шиманова,
О.В. Тремкина, А.Л. Лопатин, Д.А. Угланов,
А.А. Шиманов*

Рецензенты: д-р тех. наук, проф. И. В. Кудин о в ;
д-р тех. наук, проф. А. А. И г о л к и н

К820 Криогенная испарительная система охлаждения: учебное пособие / *Д.В. Сармин, В.М. Боровик, А.Б. Шиманова [и др.]*. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 100 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-1984-1

Приведены основы методики расчета параметров криогенной испарительной системы охлаждения. Рассмотрены основные схемы реализации на практике криогенных систем охлаждения.

Предназначено для обучающихся по направлениям подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение, для специализации «Технологии проектирования энергетических систем холодильной и криогенной техники», 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов, а также может быть полезно слушателям курсов, аспирантам и специалистам, изучающих современные энергосберегающие технологии.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

УДК 621.59(075)

ББК 3392я7

ISBN 978-5-7883-1984-1

© Самарский университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	7
1.1 Дроссельные системы	7
1.2 Жидкостные криогенные системы.....	13
1.3 ГКМ по циклу Стирлинга	21
2 РАСЧЕТ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	26
2.1 Расчет теплопритоков к рабочему телу через трубопровод.....	27
2.2 Тепловой расчет сосуда криостата	35
2.2.1 <i>Определение потерь холода при хранении</i>	35
2.2.2 <i>Определение потерь рабочей жидкости</i>	38
3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	40
3.1 Конструкция криогенной испарительной установки.....	43
3.2 Сосуд Дьюара	46
3.3 Гибкий вакуумный трубопровод	48
3.4 Конструкция криостата.....	50
3.5 Конструкция корпуса блока управления установкой	51
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	53
Лабораторная работа №1 «Определение теплопритоков через криостат»	53
Лабораторная работа №2 «Определение удельной теплоемкости материала металлической заготовки»	57

Лабораторная работа №3 «Определение холодопроизводительности криогенной испарительной системы охлаждения»	62
Лабораторная работа №4 «Определение концентрации компонентов бинарной смеси».....	71
5 ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ	77
5.1 Примеры решения задач	77
5.2 Задачи для раздела	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86
ПРИЛОЖЕНИЕ А	88
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	90
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	91
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	92
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	96

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире особое внимание уделяется криогенным системам, чья эффективность непосредственно связана с дальнейшим освоением космического пространства. Она во многом определяется достижениями в области бортовых энергетических и двигательных установок космических аппаратов. В результате создания и применения более эффективных энергетических систем, которые могут повысить точность управления космическими аппаратами, открываются принципиально новые пути использования космического пространства в различных целях.

Вполне очевидно, что для последующего развития космических систем различного назначения необходимо своевременно совершенствовать всевозможные бортовые системы, в которые входят энергетические установки, специальное оборудование, генераторы электрической энергии, системы жизнеобеспечения для пилотируемых кораблей, двигательные установки, необходимые для приведения космического аппарата в движение и другие агрегаты.

Актуальность данной темы непосредственно связана с областями применения криогенной техники в современном мире. Криогеника охватывает широкий спектр разнонаправленных видов деятельности, как например:

- Исследования в области физики высоких энергий;
- Электроника, где микроволновые элементы охлаждаются до криогенных температур. А также сверхпроводники, где применение низких температур само собой разумеющееся;
- Механические конструкции, где криогенные жидкости находят применение в таких устройствах, как сверхпроводящие двигатели, гироскопы, подшипники, сконструированные на основе использования эффекта Мейснера и другие;

– Медицина, где для сохранения биологических тканей и жидкостей используются специальные контейнеры, охлаждаемые жидким азотом;

– Технологические процессы, связанные с получением и хранением различных веществ в чистом виде.

Главные требования к энергетическим установкам сводятся к обеспечению заданного уровня потребляемых электрических мощностей по определенной программе в течение назначенного периода времени, а также к эффективной работе агрегата на всех заданных режимах. А значит можно выделить одну из наиболее весомых проблем, связанных с обеспечением потребителей хладагентами: тепловые потери энергии через трубопроводы и агрегаты комплекса систем, в частности испарительной установки и криостата, в процессе эксплуатации.

1 ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

За последние годы было опубликовано множество работ, посвященных различным вопросам теории и конструкции космических энергетических установок. Криогенные системы охлаждения являются их неотъемлемой частью. Прежде чем перейдем к рассмотрению криогенной испарительной установки, изучим основные виды технологических решений систем охлаждения, применяемых в современных бортовых комплексах.

Криогенные системы охлаждения можно классифицировать следующим образом:

- Дроссельные системы;
- Жидкостные криогенные системы;
- Газовые криогенные машины.

1.1 Дроссельные системы

Рассмотрим принцип действия и рабочие тела дроссельных микрокриогенных систем. Для получения низких температур в этих системах используется адиабатическое расширение рабочего тела без отдачи внешней работы, называемое процессом дросселирования. При дросселировании энтальпия рабочего тела в начальном и конечном состоянии одинаковая. Локальное изменение температуры характеризуется дифференцированным адиабатическим дроссель-эффектом [1]

$$\alpha_i = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_i, \quad (1)$$

где p – давление;

T – температура;

i – энтальпия.

В зависимости от параметров рабочих тел дифференциальный дроссель-эффект может быть положительным, отрицательным либо

равняться нулю. При бесконечно малом уменьшении давления температура уменьшается, увеличивается или остается неизменной.

Рассмотрим инверсионную кривую ван-дер-ваальсова газа, показанную на рисунке 1.1.1.

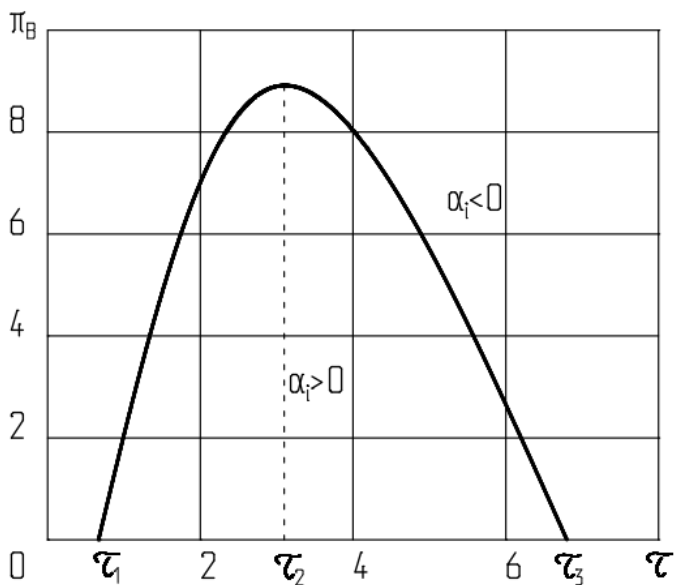


Рисунок 1.1.1 – Инверсионная кривая ван-дер-ваальсова газа

Значения $\tau_1 = 0,75$ и $\tau_3 = 6,75$ соответствуют точкам пересечения кривой газа с осью приведенных температур. Значение $\tau_2 = 3$ соответствует максимуму приведенного инверсионного давления. В области ниже инверсионной кривой дроссель-эффект положительный, а в области выше – отрицательный.

Для большинства хладагентов $\alpha_i > 0$, при условии, что температура окружающей среды находится в широком диапазоне изменения давления. При данных температурах независимо от давления

дроссель-эффект неона, водорода и гелия отрицательный. Изменение знака дифференциального дроссель-эффекта для неона начинается с температуры 230 К, для водорода 204 К, а для гелия – 46 К.

Обратимся ко второй характеристике процесса дросселирования – интегральный адиабатический дроссель-эффект:

$$\Delta T_i = \int_i^2 \alpha_i dp. \quad (2)$$

Он отражает характер изменения температуры хладагента при конечном понижении давления. Интегральный дроссель-эффект зависит от свойств хладагента, а также температуры и давления в начале и конце процесса.

На отдельных участках процесса дросселирования знаки интегрального и дифференциального дроссель-эффектов могут не совпадать. Это связано с тем, что существует возможность охлаждения рабочего тела, когда его исходное состояние соответствует области выше инверсионной кривой. Однако, изменение температуры в части процесса, находящейся в области ниже инверсионной кривой, является преобладающим условием охлаждения.

Рост абсолютной величины интегрального дроссель-эффекта можно достичь, если увеличить начальное давление до значения, которое соответствует давлению инверсии $p_{\text{инв}}$. Однако, при дальнейшем увеличении давления произойдет снижение величины дроссель-эффекта, так как при $p > p_{\text{инв}}$ процесс дросселирования начинается в области со значения $\alpha_i < 0$. Из этого можно сделать вывод, что выбор давления в начале процесса дросселирования больше давления инверсии будет нецелесообразным, так как при увеличении энергозатрат уменьшается полезный результат процесса.

Абсолютная величина интегрального дроссель-эффекта стремительно возрастает в том случае, когда начальная температура снижается. Например: для азота с температурой 300 К максимально

возможное снижение температуры составляет 38 К, а при температуре 200 К максимально возможное снижение температуры составит 80 К. Таким образом можно получить широко используемый уровень охлаждения 77-80 К.

Принципиальная схема дроссельной установки изображена на рисунке 1.1.2.

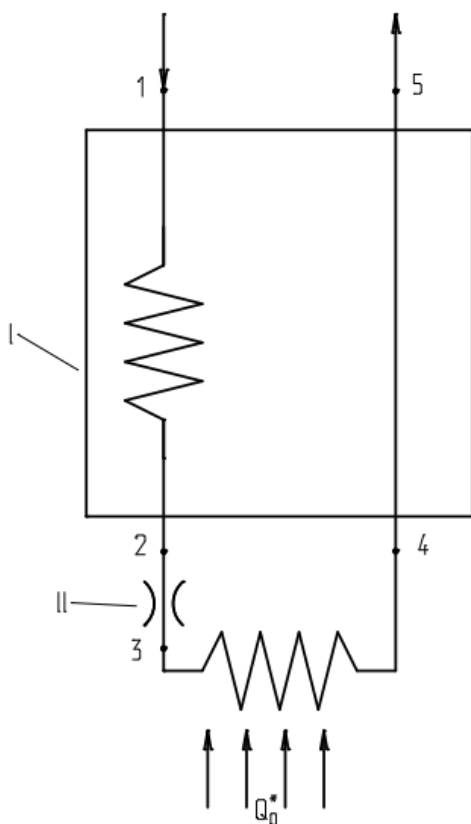


Рисунок 1.1.2 – Принципиальная схема дроссельной установки с регенерацией холода

Дроссельная криогенная система включает в себя: II – дроссельное устройство, I – теплообменник, источник газа высокого давления, элементы регулирования и управления. В качестве рабочих тел дроссельных систем используют как чистые вещества, так и смеси хладагентов. Выбор рабочего тела зависит от таких характеристик, как термическая стойкость, химическая инертность, взрывобезопасность, теплофизические свойства и токсичность. Сравнительно недавно в качестве рабочих тел начали использовать смеси хладагентов в определенных пропорциях. Это позволило при той же самой температуре охлаждения в несколько раз увеличить дроссель-эффект, тем самым значительно повысить энергетические и массогабаритные показатели дроссельных систем.

Многообразие условий применения дроссельных микрокриогенных систем привело к созданию большого числа схемных и конструктивных решений микроохладителей [1]. По принципиальной схеме большую часть разработанных конструкций дроссельных микроохладителей можно отнести к одной из следующих основных групп (рисунок 1.1.3):

- однокаскадные, в том числе с простым и двукратным (параллельным или последовательным) дросселированием;
- многокаскадные с предварительным охлаждением (подохлаждением) газа при постоянной или изменяющейся по длине температуре холодной стороны промежуточного теплообменника, в том числе микроохладители с применением термоэлектрических каскадов.

Микроохладители могут существенно различаться конструкцией основных узлов – теплообменника и дроссельного устройства. Чаще всего применяют одно- и многорядные поперечно-противоточные типа труба в трубе (схема Линде). Формы используемых теплообменников также различные: цилиндрическая, коническая, плоская [2].

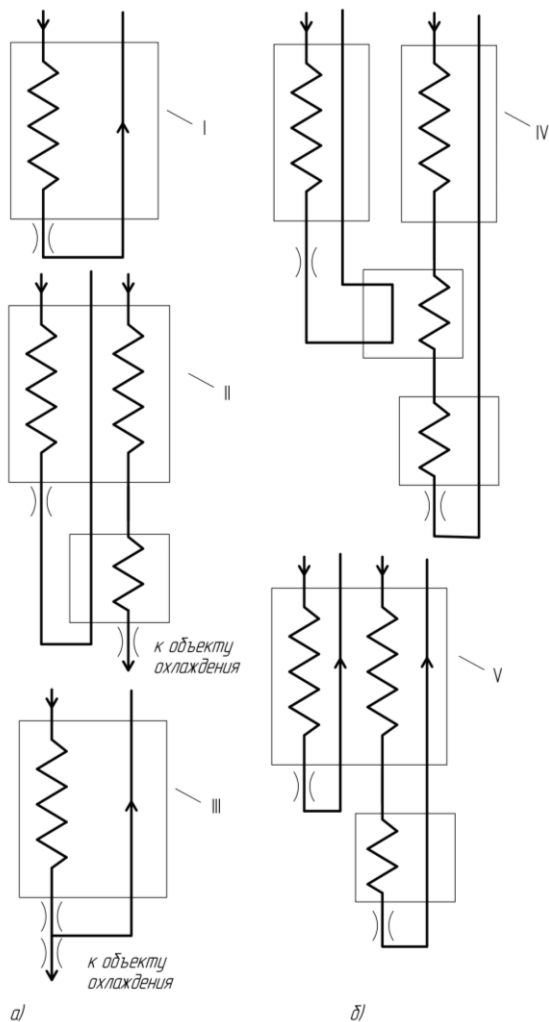


Рисунок 1.1.3 – Принципиальные схемы дроссельных микроохладителей: *a* – однокаскадные; *б* – двухкаскадные; I – с простым дросселированием; II – с двукратным параллельным дросселированием; III – с двукратным последовательным дросселированием; IV и V – с «локальным» и «распределенным» охлаждением хладагента второго каскада

По характеру рабочего процесса микроохладители могут быть:

- быстродействующими (с малым пусковым периодом);
- с автономным режимом работы, т. е. с возможностью поддержания рабочей температуры после отключения питания рабочим газом (за счет жидкого хладагента, накопленного в полости охлаждаемого объекта);
- с регулированием холодопроизводительности автоматическим изменением расхода хладагента в зависимости от тепловой нагрузки.

В реальных условиях выбор той или иной конструктивной схемы микроохладителя и его основных узлов обусловлен техническими требованиями к микрокриогенной установке и имеющимися технологическими возможностями.

1.2 Жидкостные криогенные системы

Промышленное использование жидких криогенных продуктов осуществляется в сложных технических комплексах, из состава которых можно выделить криогенные системы обеспечения потребителей продуктами с необходимыми параметрами. Такое выделение обусловлено тем, что проблемы создания и эксплуатации различного рода объектов и устройств тесно связаны с теми областями науки и техники, в которых применяются криогенные продукты. Так, использование жидких кислорода и водорода в качестве компонентов ракетных топлив привело к созданию бортовых баков, турбонасосных агрегатов, ракетных двигателей, работающих на криогенных топливах; к разработке технологии охлаждения и запуска двигателей. Использование жидкого гелия в энергетике и электротехнике связано с созданием новых конструкций генераторов, магнитов, трансформаторов. Естественно, что разработкой та-

ких конструкций занимаются в основном организации и фирмы соответствующих направлений техники. Во всяком случае, анализ научно-технических проблем создания промышленных комплексов, использующих криогенные продукты, потребовал бы рассмотрения обширного круга вопросов, находящихся на стыках криогенной и целого ряда других областей техники.

Проблемы, связанные с созданием системы обеспечения потребителей криопродуктами, имеют более универсальный характер и в меньшей степени связан со спецификой рабочих процессов в системах потребителей. Некоторые особенности схемного решения систем, конструкций оборудования и рабочих процессов при хранении, охлаждении и транспортировании продуктов зависят от конкретного продукта и его параметров, но эти особенности не выходят за рамки проблем, традиционных для криогенной техники. Жидкостные криогенные системы обеспечения потребителей продуктами выполняются на базе однотипного оборудования; примерно одинаковый круг вопросов приходится рассматривать при термодинамическом, тепловом и гидродинамическом анализах рабочих процессов в элементах систем. Из всего разнообразия функций, выполняемых такими системами, можно выделить две основные. Целый класс систем предназначен для накопления, хранения и выдачи продуктов с требуемыми параметрами. При этом параметры выдаваемых продуктов могут существенно отличаться от параметров в хранилище и соответствовать как жидкому, так и газообразному состоянию. Другой обширный класс жидкостных систем обеспечивает охлаждение и поддержание заданных полей температур в элементах конструкций различных устройств, т. е. их термостатирование на уровне криогенных температур (криостатирование). Четкая граница в схемных решениях и рабочих процессах между этими двумя классами криогенных систем отсутствует, поскольку в

ряде случаев наряду с выдачей жидких продуктов в резервуары потребителей в них необходимо некоторое время поддерживать заданный температурный уровень и, наоборот, криостатирование устройств иногда сопряжено с выдачей продукта [1]. Основными элементами жидкостных криогенных систем являются резервуары, трубопроводы с запорно-регулирующей арматурой, теплообменные аппараты, побудители расхода жидкости и в ряде случаев оборудование для понижения температуры продукта.

В состав систем криостатирования обычно включаются рефрижераторные установки, но при анализе работы систем установки рассматриваются только как источники холода.

На рисунке 1.2.1 представлены принципиальные схемные решения криогенных систем хранения и выдачи продуктов. Выдача продуктов может осуществляться вытеснением парами под избыточным давлением (рисунок 1.2.1, *а*) или с помощью насосов (рисунок 1.2.1, *б*); в последнем случае резервуары имеют меньшую металлоемкость, поскольку их рабочее давление должно лишь обеспечивать бескавитационную работу насосов. Системы, предназначенные для выдачи продуктов, охлажденных ниже температуры насыщения при атмосферном давлении, имеют в своем составе оборудование для понижения температуры жидкости. На рисунке 1.2.1, *б* приведена одна из возможных схем выдачи охлажденной жидкости. Жидкостные криогенные системы, предназначенные для выдачи газообразных продуктов, имеют в своем составе производственный испаритель (рисунок 1.2.1, *в*).

В ряде случаев системы должны обеспечивать заправку резервуаров потребителя и поддержание в них в течение определенного отрезка времени заданных уровня и температуры жидкости. Это приводит к необходимости введения контура циркуляции, с помощью которого решение указанной задачи осуществляется наиболее

простым способом. На рисунке 1.2.2 приведены различные варианты принципиальных схемных решений систем выдачи жидких продуктов с их последующим термостатированием путем циркуляции. Такие системы могут быть выполнены с замкнутым (рисунок 1.2.2, *а*), разомкнутым (рисунок 1.2.2, *б*) и полуразомкнутым контурами циркуляции (рисунок 1.2.2, *в*).

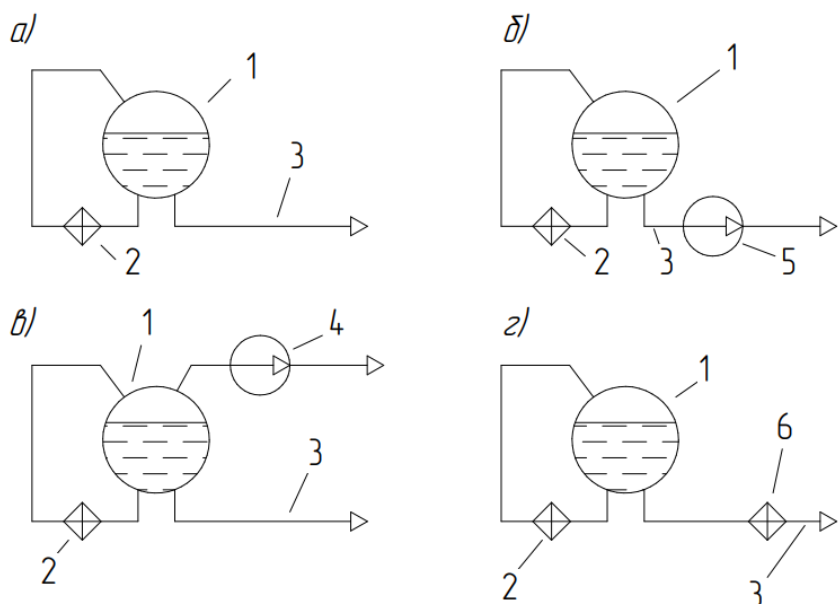


Рисунок 1.2.1 – Принципиальные схемы криогенных систем выдачи жидких (*а-в*) и газообразных (*г*) продуктов:

а, г – вытеснением при температуре хранения; *б* – насосом при температуре хранения жидких продуктов; *в* – вытеснением предварительно охлажденного в резервуаре: 1- резервуар с жидким продуктом; 2 – испаритель поддержания давления в сосуде в процессе выдачи; 3 – трубопровод выдачи продукта; 4 – агрегат откачки паров над зеркалом жидкости; 5 – насос; 6 – производный испаритель

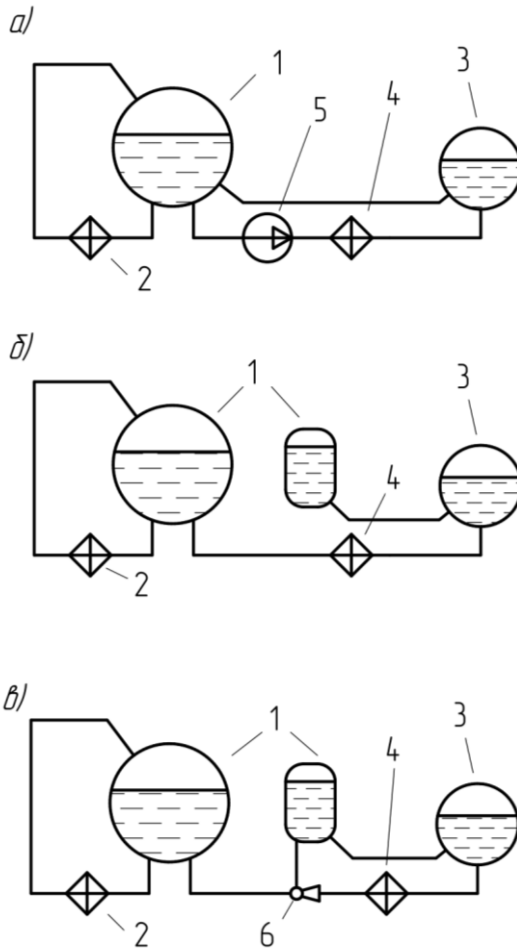


Рисунок 1.2.2 – Принципиальные схемы хранения и выдачи жидких продуктов с их термостатированием в резервуарах потребителей:
a – с замкнутым контуром циркуляции; *б* – с разомкнутым контуром циркуляции; *в* – с полуразомкнутым контуром; 1 – хранилище; 2 – испаритель; 3 – резервуар потребителя; 4 – теплообменник; 5 – механический насос; 6 – струйный насос

Схемы с замкнутым контуром циркуляции основаны на использовании жидкостных насосов и позволяют с точностью поддерживать требуемые параметры жидкости в заправленном резервуаре. Схемы с разомкнутым и полуразомкнутым контурами циркуляции используются при вытеснительном способе выдачи жидких продуктов. Эти схемы предполагают наличие к концу заправки заполненного и порожнего резервуаров для обеспечения передавливания жидкости. В схемах с полуразомкнутым контуром циркуляции дополнительно используется жидкостной эжектор, в который в качестве активного потока подается под давлением жидкость из заполненного резервуара. Как и в схеме с разомкнутым контуром циркуляции, время термостатирования ограничивается запасом жидкости в резервуаре, однако продолжительность термостатирования может значительно возрасти вследствие того, что в контур циркуляции вводится и из него выводится относительно небольшая доля общего массового расхода циркулирующей жидкости [1]. По приведенным на рисунках 1.2.1 и 1.2.2 схемным решениям создаются системы заправки бортовых резервуаров ракетно-космических систем, самолетов, судов, автомобильных и железнодорожных цистерн, системы для испытаний различных узлов и агрегатов, системы для создания резервных запасов продуктов, станции распределения газов между потребителями, хранилища природного газа для покрытия пиков потребления и другие подобные системы.

Системы выдачи жидких продуктов, изображенные на рисунке 1.2.2, являются одновременно разновидностями другого большого класса жидкостных систем – систем криостатирования.

К системам криостатирования относятся криогенные системы термобарокамер для создания условий «холодного космоса», системы для поддержания уровня азотных температур в теплозащитных экранах гелиевых криостатов, гелиевые системы для реализации явления сверхпроводимости в различных объектах и устройствах (магнитах, линиях электропередачи, трансформаторах,

двигателях и т. д). Поддержание требуемого поля температур в криостатируемом объекте осуществляется путем его погружения в жидкость или посредством циркуляции продукта по специальным каналам. Движущийся в каналах поток может оставаться жидким или частично испаряться. Обеспечение однофазного режима течения жидкого продукта, как правило, существенно повышает надежность криостатирования при переменных тепловых нагрузках.

В состав систем криостатирования кроме резервуаров, трубопроводов, теплообменных аппаратов, насосов обычно входят рефрижераторные установки, с помощью которых компенсируются теплопритоки к циркулирующей в контуре жидкости. В установившихся режимах работы систем применение рефрижераторных установок позволяет утилизировать холод отходящих паров. Другое преимущество включения рефрижераторных установок в состав подобных систем заключается в значительном сокращении потерь рабочего вещества от сброса в атмосферу, что позволяет повысить автономность систем и снизить эксплуатационные расходы. Азотные системы криостатирования ввиду относительной дешевизны газообразного и жидкого азота часто строятся по разомкнутому циклу (со сбросом паров в атмосферу) и с частичной утилизацией холода паров. Жидкий азот для первоначального заполнения и компенсации потерь продукта поступает с высокоэффективных крупных воздуходелительных установок [2]. Высокая стоимость газообразного гелия, а также затраты энергии на его ожижение предопределили включение в состав гелиевых систем криостатирования рефрижераторных установок с применением замкнутого контура циркуляции. Первоначальное заполнение систем производится газообразным гелием, и жидкость постепенно накапливают непосредственно в контуре с помощью ожижителя-рефрижератора. На рисунке 1.2.3 представлены структурные схемы криогенных систем криостатирования с замкнутым контуром циркуляции, построенные с использованием ожижителей-рефрижераторов.

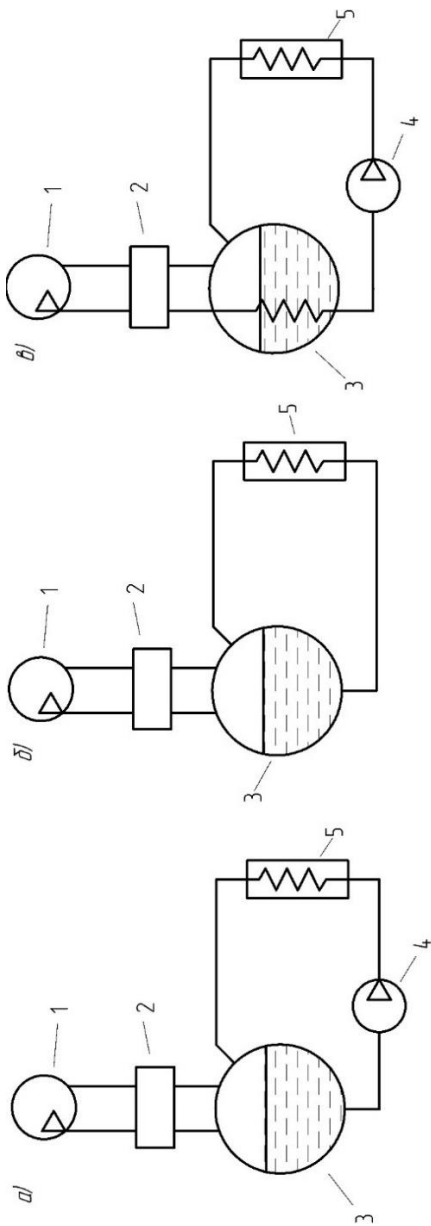


Рисунок 1.2.3 – Принципиальные схемы циркулярных систем криостатирования объектов:
 а – с использованием насоса; б – с контуром естественной циркуляции; в – с использованием компрессора; 1 – компрессор; 2 – рефрижераторная установка; 3 – накопительный резервуар;

4 – насос; 5 – криостатируемый объект

В зависимости от способа организации циркуляции криоагента через криостатируемые объекты принципиальные схемы системы подразделяются на одноконтурные и двухконтурные. В двухконтурных схемах циркуляция жидкости через криостатируемые объекты осуществляется с помощью насоса (рисунок 1.2.3, а) или путем естественной конвекции за счет разности плотностей криоагента в подъемных и опускных каналах (рисунок 1.2.3, б). В одноконтурной системе циркуляция осуществляется за счет работы компрессора рефрижераторной установки (рисунок 1.2.3, в).

1.3 ГKM по циклу Стирлинга

Отличительным признаком любой газовой криогенной машины (ГKM) является регенерация тепла в теплообменнике (регенераторе), расположенном внутри ее рабочего объема и имеющем временное разделение потоков. Из ГKM с внутренней регенерацией тепла наибольшее распространение получили охладители, работающие по обратному циклу Стирлинга.

За идеальный для такой ГKM принимают цикл, состоящий из двух изотермических и двух изохорических процессов. В соответствующих объемах машины изотермически происходит сжатие и расширение рабочего тела с отводом тепла к внешнему источнику при температуре окружающей среды T_0 или подводом тепла к рабочему телу от охлаждаемого объекта при минимальной температуре цикла T_p , равной температуре криостатирования. По изохорам в объеме регенератора при изменении температуры от T_0 до T_p происходит теплообмен между прямым и обратным потоками рабочего тела. Холодильный коэффициент такого цикла равен холодильному коэффициенту цикла Карно, что соответствует максимально возможному КПД цикла в интервале температур от T_0 до T_p [2].

Процессы в реальной ГKM существенно отличаются от процессов идеального цикла. Например, сжатие и расширение происходят не только в соответствующих полостях машины, но и во всех составляющих ее рабочего объема; температура в каждой точке рабочего объема изменяется в течение цикла по сложным законам, существенно отличающимся от принятых для описанного выше идеального цикла. В связи с этим эффективность реальных ГKM с циклом Стирлинга обусловлена не только совершенством ее идеального цикла, но и в значительной мере конструктивными решениями, обеспечивающими малые потери в ее действительном цикле.

Для ГKM с идеальным циклом Стирлинга предполагают: равенство температур рабочего газа в объемах сжатия и расширения температурам соответствующих внешних источников тепла T_0 и T_p ; равенство давлений рабочего тела над и под вытеснителем; линейное изменение температуры по высоте регенератора от T_0 до T_p ; равенство нулю мертвого объема. Очевидно, что это возможно только в ГKM с идеальными теплообменными аппаратами и прерывистым движением поршней [3].

В реальных ГKM теплообменные аппараты имеют значительный мертвый объем, а также обладают термическим и гидравлическим сопротивлением, поэтому теплообмен происходит при конечных разностях температур и перепадах давлений.

Обычно в качестве привода поршней в ГKM применяют кривошипно-ползунковый механизм, выполняемый по обычной аксиальной или ромбической схемам. Цикл, осуществляемый в ГKM, протекает без изменений фазового состояния рабочего тела, в качестве которого применяют гелий или водород.

На рисунке 1.3.1 представлено несколько схем газовых криогенных машин. С помощью поршня 1 осуществляется механический контакт рабочего тела с внешним источником энергии. В регенераторе 3 происходит передача тепла между прямым и обратным потоками рабочего тела. В теплообменных аппаратах 2 осуществляется тепловой контакт рабочего тела с внешними источниками тепла.

По числу ступеней расширения ГКМ классифицируются на:

- одноступенчатые;
- двухступенчатые;
- трехступенчатые.

По схеме взаимного расположения осей компрессорного и расширительного поршней машины подразделяются на следующие классы:

- с соосным расположением (однорядная схема) (рисунок 1.3.1, *а, б*);

- с параллельным расположением (рисунок 1.3.1, *в*);

- с расположением осей под углом (рисунок 1.3.1, *г*).

По схеме расположения регенератора:

- со встроенным в вытеснитель регенератором (рисунок 1.3.1, *а, б*);

- с вытесненным из вытеснителя регенератором (рисунок 1.3.1, *в, г*).

По схеме нагружения поршней подразделяются:

- с нагруженными поршнями (рисунок 1.3.1, *г*);

- с нагруженным компрессорным поршнем и разгруженным вытеснителем (рисунок 1.3.1, *а, б, в*).

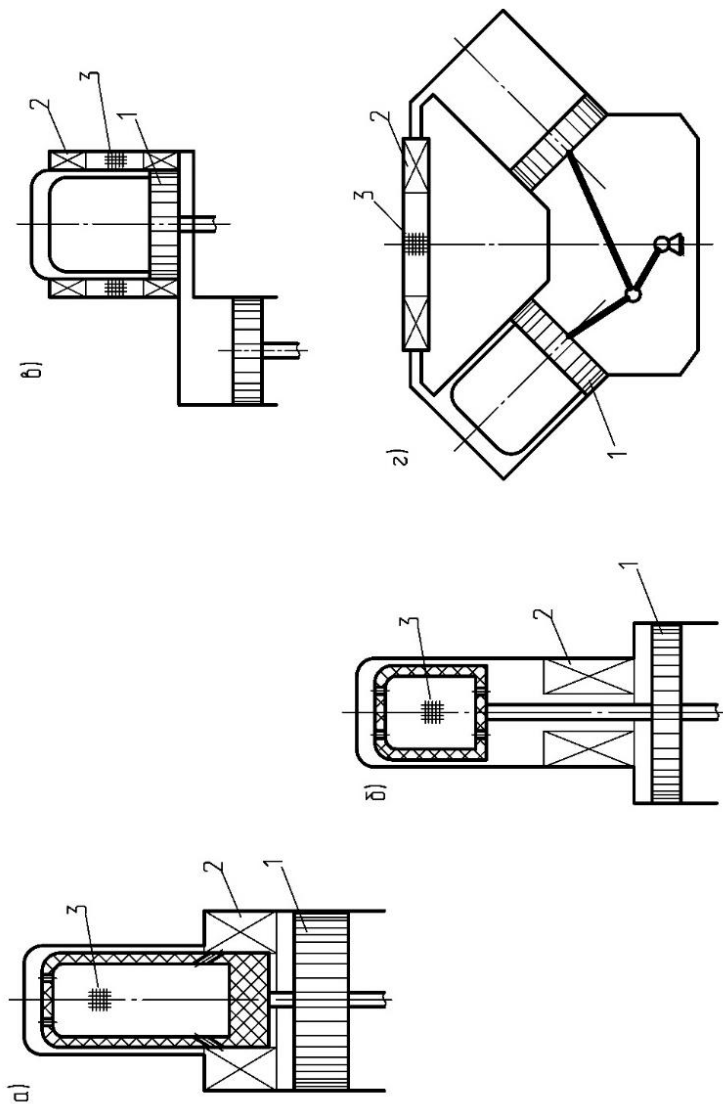


Рисунок 1.3.1 – Схемы ГКМ:

1 – поршень; 2 – теплообменный аппарат; 3 – регенератор

Как показывает опыт создания ГКМ, а также данные расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, даже так называемые независимые переменные в определенной мере взаимно зависимы. Это означает, что оптимальные значения характеристик ГКМ можно достичь только при определенных сочетаниях значений всех зависимых и независимых переменных. При этом от выбранных значений независимых переменных и соотношений между ними зависит не только термодинамическая эффективность микроохладителя, но и возможность создания охладителей для определенных условий работы.

В связи с этим задачей конструкторского расчета является отыскание таких значений независимых переменных, при которых достигается максимальное значение наиболее важной в данных условиях характеристики ГКМ – критерия оптимизации. При этом другие существенные характеристики могут играть роль ограничений.

Поэтому проектирование и доводка ГКМ – довольно трудоемкий процесс, требующий изготовления и отработки многих экспериментальных образцов. Как правило, новые образцы ГКМ стремятся создавать в размерных соотношениях, близких к уже найденным оптимальным решениям, так как любое отклонение от этих соотношений приводит к длительной дополнительной доводке машины.

2 РАСЧЕТ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ

Проблемы создания рассмотренных выше жидкостных криогенных систем охватывают широкий круг вопросов, связанных с выбором оптимальных с точки зрения надежности и экономичности схемных решений, проектированием и изготовлением эффективного и надежного оборудования, совершенствованием тепловой защиты оборудования, получением высокопрочных материалов пластичных в области криогенных температур. Важное место в обеспечении надежной и эффективной работы систем занимают также вопросы расчета параметров продуктов при их хранении и транспортировании по магистралям. Расчет и обеспечение требуемых параметров продуктов при проведении технологических операций связаны с количественным описанием процессов охлаждения и заполнения оборудования, процессов тепло- и массообмена при хранении, охлаждении и передаче по магистралям криогенных жидкостей. Определению параметров рабочих продуктов в жидкостных криогенных системах, уделено наибольшее внимание.

Общие принципы проектирования оборудования, разработки схемных решений и технологии эксплуатации жидкостных систем, хранения и выдачи продуктов и частично рефрижераторных систем связаны с традиционными методами расчетного определения параметров высокотемпературных жидкостей при их хранении и транспортировании, но отличаются рядом особенностей, обусловленных свойствами жидких криогенных продуктов. Жидкие криогенные продукты имеют значительно более низкую по сравнению с окружающим воздухом температуру, их критические температуры также лежат значительно ниже температур, соответствующих атмосферным условиям. Кроме того, диапазон температур и давлений,

соответствующих жидкому состоянию криогенных продуктов, относительно узок, а теплота фазового перехода жидкости в пар сравнительно невелика. Низкая температура продуктов обуславливает теплопровод из окружающей среды, вследствие чего при проведении технологических операций происходит непрерывное изменение их параметров. При хранении жидких криогенных продуктов с открытым газосбросом происходит их испарение; при хранении с закрытым газосбросом – повышение температуры и давления, при наддуве парового пространства и опорожнении резервуаров – сложные процессы тепломассопереноса вблизи раздела границы фаз; при течении по трубопроводам – изменение температуры и давления, фазовый переход жидкости в пар; при заполнении утепленного оборудования – кипение (пленочное, переходное и пузырьковое); при срабатывании арматуры – гидравлические удары и колебания давления. Таким образом, практически все процессы в объеме криогенной жидкости на этапах хранения и подачи по магистралям к потребителям являются нестационарными, т. е. параметры продуктов меняются во времени.

2.1 Расчет теплопритоков к рабочему телу через трубопровод

Транспортирование жидких продуктов по магистралям криогенных систем осуществляется либо путем их вытеснения из резервуаров газом наддува, либо с помощью насосов. В обоих случаях в процессе выдачи над зеркалом жидкости необходимо поддерживать определенное давление, которое, как правило, выше давления насыщенных паров. Повышение давления в паровом пространстве сосуда увеличивает располагаемый перепад давления и недогрев жидкости до температуры насыщения. При выдаче жидкого продукта путем его вытеснения повышение давления должно компенсировать гидравлические потери в магистралях. В качестве газа наддува используются обычно газифицированные рабочие тела.

Транспортирование хладагента с требуемыми параметрами возможно только после охлаждения конструкции, когда резко сокращаются теплопритоки, исключается образование паровой фазы и стабилизируется режим. Наличие самой совершенной изоляции не исключает прогрева жидкости по длине трубопровода. Когда на некотором расстоянии жидкость достигает состояния насыщения, начинается ее испарение, и при сохранении перепада давлений расход продукта резко уменьшается. Таким образом, расчет параметров однофазных потоков криогенных продуктов связан с определением не только потерь давления, но и температуры продукта и температуры его насыщения. Расчет параметров двухфазного потока, когда происходит образование паровой фазы, резко усложняется, поскольку при этом реализуются несколько режимов течения, которые изменяются по длине магистрали в результате увеличения паросодержания. Задача решается в одномерной постановке и для наиболее распространенного случая, когда по трубопроводу транспортируется однофазная жидкость [1].

Выведем формулу для расчета расхода хладагента через трубопровод к потребителю. Для начала запишем основной закон термодинамики для поточной системы, отнесенной к единице массы потока:

$$dq = di + d \frac{W^2}{2} + dh, \quad (3)$$

где dq – количество теплоты, подведенное к жидкости из окружающей среды;

di – изменение энтальпии потока;

$d \frac{W^2}{2}$ – изменение кинетической энергии потока;

dh – изменение потенциальной энергии потока.

Преобразуем некоторые части уравнения:

$$di = c_p \cdot dT - \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] dp, \quad (4)$$

$$T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_s \cdot c_p, \quad (5)$$

и подставив в уравнение выше, получим:

$$c_p \cdot dT = dq + \left[\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s \cdot c_p - v \right] dp - \frac{dW^2}{2} - dh. \quad (6)$$

Если пренебречь кинетической энергией потока ввиду ее малости и принять магистраль горизонтальной, то из последнего уравнения следует, что изменение температуры потока происходит из-за воздействия теплопритока из окружающей среды и дросселирования потока в трубопроводе:

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{G c_p} + \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_i dp, \quad (7)$$

где $\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_i = \frac{1}{c_p} - \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right]$ – дифференциальный эффект Джоуля-Гомпсона.

Для криогенных жидкостей $\frac{\partial T}{\partial p} \neq 0$ и вблизи температуры насыщения при атмосферном давлении имеет отрицательное значение, т.е. даже в отсутствии теплопритока температура криогенных жидкостей при течении по трубам несколько возрастает.

В практических расчетах требуется определять изменение температуры рабочих жидкостей на выходе из трубопровода, т. е. на входе к прибору-потребителю, по отношению к условиям хранения. Обусловимся тем, что перед началом транспортирования к потребителю параметры жидкости соответствуют ее насыщенному состоянию: $T_{xp} = T_s$ и $p_{xp} = p$. После наддува парового пространства резервуара до значения p_0 , а также в процессе его опорожнения температура жидкости из-за изоэнтропического сжатия и теплопритока из окружающей среды возрастает. Однако с ростом давления температура насыщения увеличивается на большую величину, тем самым жидкий азот становится недогретым.

Создание требуемого напора рабочего тела осуществляется благодаря наддуву парового пространства в сосуде парами используемого хладагента. Этот способ обладает такими преимуществами, как надежность, простота управления и быстрота подготовки к выдаче хладагента.

Для упрощения расчетов примем, что трубопровод расположен горизонтально, а также пренебрежем температурным эффектом при изэнтропическом изменении давления. В итоге получим следующее уравнение для температуры рабочего тела, поступившего к потребителю:

$$T_{\text{ВЫХ}} = T_{\text{ХР}} + \frac{Q}{G c_p} + \frac{v(p_{\text{ВХ}} - p_{\text{ВЫХ}})}{\eta c_p}. \quad (8)$$

где $T_{\text{ВЫХ}}$ – температура хладагента на выходе из трубопровода к потребителю;

$T_{\text{ХР}}$ – температура рабочего тела на выходе из хранилища;

Q – теплоприток к рабочему телу из окружающей среды;

G – расход рабочего тела через трубопровод;

c_p – удельная теплоемкость жидкого азота, равная $1970 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$;

v – удельный объем рабочего тела в сосуде;

$p_{\text{ВХ}}$ – давление на входе в трубопровод, также равно давлению в сосуде Дьюара при стабильной работе криогенной испарительной установки, которое больше атмосферного на 0,3 бар, т.е. $p_{\text{ВХ}} = 131325 \text{ Па}$;

$p_{\text{ВЫХ}}$ – давление на выходе из трубопровода к потребителю, равное атмосферному, т.е. $p_{\text{ВЫХ}} = 101325 \text{ Па}$;

η – коэффициент объемных и гидравлических потерь, равен единице, т.к. подача хладагента в трубопровод осуществляется с помощью выдавливания.

Для охлаждения объекта, установленного в криостат, необходимо поддерживать температуру хладагента, поступающего на испаритель, равной 77 К. А значит $T_{\text{вых}} = 77$ К. Температуру рабочего тела на выходе из хранилища примем равной 76 К, т.е. $T_{\text{хр}} = 76$ К.

Прежде чем определить теплоприток к жидкому азоту через трубопровод, найдем неизвестные компоненты уравнения (8). Для нахождения удельного объема жидкого азота воспользуемся формулой:

$$v = \frac{V}{m}, \quad (9)$$

где V – объем жидкого азота в сосуде; m – его масса.

Объем жидкого азота в сосуде рассчитаем по формуле:

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad (10)$$

где ρ – плотность жидкого азота, которая равна 808 кг/м³.

Подставив значения, получим:

$$v = \frac{V}{m} \cdot \frac{m}{\rho} = \frac{1}{\rho}, \quad (11)$$

Удельный объем жидкого азота равен:

$$v = \frac{1}{808} = 0,00124 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (12)$$

Известно, что длина трубопровода $l = 0,7$ м; внутренний диаметр трубопровода $d = 0,006$ м. Площадь поверхности трубопровода найдем с помощью программного обеспечения КОМПАС 3Д, предварительно построив участок внутреннего сильфона (рисунок 2.1.1). Длина данного участка равна 198,5 мм, а площадь поверхности сильфона 39797,3 мм².



Рисунок 2.1.1 – Участок внутреннего трубопровода с информацией о нем

Чтобы получить искомую площадь поверхности сильфона, воспользуемся соотношением:

$$\frac{l}{l_{\text{мод}}} = \frac{F}{F_{\text{мод}}}, \quad (13)$$

где $l = 700$ мм – длина реального трубопровода;

$l_{\text{мод}} = 198,5$ мм – длина смоделированного участка трубопровода;

F – площадь поверхности реального трубопровода, которую необходимо вычислить;

$F_{\text{мод}} = 39797,3$ мм² – площадь поверхности смоделированного участка трубопровода.

Подставив известные значения в формулу, и выразив площадь поверхности реального трубопровода, получим:

$$F = \frac{l \cdot F_{\text{мод}}}{l_{\text{мод}}} = \frac{700 \cdot 39797,3}{198,5} = 140343 \text{ мм}^2, \quad (14)$$

Переведем полученное значение в м² и получим площадь поверхности внутреннего сильфона вакуумного трубопровода:

$$F = \frac{140343}{10^6} = 0,14 \text{ м}^2. \quad (15)$$

Для того, чтобы вычислить теплоприток к рабочей жидкости от окружающей среды, воспользуемся формулой для расчета средней плотности теплового потока через цилиндрическую стенку:

$$q = \frac{\pi(T_1 - T_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}, \quad (16)$$

где $T_1 = 295$ К – температура окружающей среды;

T_2 – температура азота, движущегося по трубопроводу, в рамках эксперимента принимаем равной 77 К;

α_i – коэффициент теплоотдачи материала, рассчитывается по формуле: $\alpha = \frac{\lambda}{\delta}$;

λ – коэффициент теплопроводности материала; d_i – диаметр трубопровода.

Для удобства обусловимся, что трубопровод состоит из трех основных частей:

– внутренний трубопровод из нержавеющей стали: $d_{\text{внутр}} = 0,006$ м, $\delta_{\text{внутр}} = 0,0003$ м; $\lambda_{\text{нерж}} = 15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

– вакуумная изоляция: $\delta_{\text{изол}} = 0,013$ м; $\lambda_{\text{изол}} = 0,0005851 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

– внешний трубопровод из нержавеющей стали: $d_{\text{внеш}} = 0,019$ м; $\delta_{\text{внеш}} = 0,0005$ м.

Подставив значения в формулу, получим:

$$q = \frac{\pi(295 - 77)}{\frac{1}{300} + \frac{1}{30} \cdot \ln \frac{0,0063}{0,006} + \frac{1}{117 \cdot 10^{-5}} \cdot \ln \frac{0,0185}{0,0063} + \frac{1}{30} \cdot \ln \frac{0,019}{0,0185} + \frac{1}{570}}, \quad (17)$$

$$q = 0,744 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Теплоприток от окружающей среды к рабочей жидкости через трубопровод равен:

$$Q = q \cdot F = 0,744 \cdot 0,14 = 0,104 \text{ Вт}. \quad (18)$$

Располагая всеми необходимыми значениями, вычислим расход жидкого азота через сечение трубопровода. Для этого выразим его и подставим известные значения:

$$G = \frac{Q}{c_p(T_{\text{вых}} - T_{\text{хр}}) - v(p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}})}, \quad (19)$$

$$G = \frac{0,104}{1970 \cdot (77 - 76) - 0,00124 \cdot (131325 - 101325)} = 0,054 \frac{\text{г}}{\text{с}}.$$

Таким образом был вычислен теоретический расход рабочей жидкости через сечение вакуумного трубопровода, а также теоретически определен теплоприток к хладагенту через вакуумный трубопровод.

2.2 Тепловой расчет сосуда криостата

2.2.1 Определение потерь холода при хранении

Потери рабочей жидкости при хранении зависят от теплопроводности отдельных участков сосуда, толщины слоя изоляции, ее теплопроводности и температуры окружающей среды. Основное тепловое сопротивление создается слоем вакуумной изоляции сосуда, а значит основные теплопритоки к жидкому азоту будут происходить через крышку сосуда криостата. На рисунке 2.2.1 представлен экспериментальный образец сосуда криостата со следующими основными параметрами: масса сосуда – 391 грамм; объем сосуда – 700 мл; высота – 147 мм; диаметр наружный – 112 мм; диаметр внутренний – 100 мм; высота горловины – 18 мм; толщина стенок – 0,8 мм; изоляция – вакуумная.

Для более точного результата расчет будет производиться для отдельных частей сосуда: цилиндрическая, сферическая части, крышка и горловина. За основу расчета теплопритоков к сосуду, за исключением расчета цилиндрической части, была выбрана формула теплового потока через стенку при теплопередаче:

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta T, \quad (20)$$

где K – коэффициент теплопередачи рассматриваемого участка, рассчитывающийся по формуле:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_{\text{внутр}}} + \sum \frac{\delta_i}{i} + \frac{1}{\alpha_{\text{наруж}}} \right)}. \quad (21)$$

а) Теплоприток к жидкости через цилиндрическую часть сосуда найдем из формулы:

$$Q_{\text{цил}} = \frac{2\pi\lambda L(T_1 - T_2)}{\lg \frac{d_2}{d_1}}, \quad (22)$$



Рисунок 2.2.1 – Сосуд криостата

где $T_1 = 295 \text{ K}$ – температура окружающей среды;

T_2 – температура, которую необходимо достичь внутри сосуда, принимаем равной 80 K ;

$\lambda = 0,0005851 \text{ Вт/м} \cdot \text{K}$ – коэффициент теплопроводности для вакуумной изоляции;

$d_1 = 0,1 \text{ м}$; $d_2 = 0,112 \text{ м}$ – внутренний и наружный диаметры сосуда;

$L = 0,1 \text{ м}$ – длина цилиндрической части сосуда (с учетом конического участка).

Подставим данные в формулу и получим:

$$Q_{\text{цил}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0005851 \cdot 0,1 \cdot (295 - 80)}{\lg \frac{0,112}{0,1}} = 1,606 \text{ Вт.}$$

б) Дно сосуда состоит из трех стенок, между внутренней и средней откакумировано пространство, а между средней и наружной воздушная прослойка. Поэтому, теплоприток к рабочей жидкости через дно сосуда рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_{\text{дна}} = \frac{0,785 \cdot d^2 (T_1 - T_2)}{\left(3 \cdot \frac{1}{\alpha_{\text{нерж}}} + \frac{\delta_{\text{изол1}}}{\lambda_{\text{вак}}} + \frac{\delta_{\text{изол2}}}{\lambda_{\text{возд}}} \right)}, \quad (23)$$

где $d = 0,1$ м – радиус днища сосуда;

$$\alpha_{\text{нерж}} = \frac{\lambda_{\text{нерж}}}{\delta_{\text{нерж}}} = \frac{15}{0,0008} = 18750 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} - \text{коэффициент теплоотдачи нержавеющей стали;}$$

$\delta_{\text{изол1}} = 0,008$ м – толщина изоляции между внутренней и средней стенками;

$\delta_{\text{изол2}} = 0,012$ м – толщина изоляции между средней и наружной стенками;

$$\lambda_{\text{возд}} = 0,0244 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} - \text{теплопроводность воздуха.}$$

Подставив данные в формулу, получим:

$$Q_{\text{дна}} = \frac{0,785 \cdot 0,1^2 \cdot (295 - 80)}{\left(3 \cdot \frac{1}{18750} + \frac{0,008}{0,0005851} + \frac{0,012}{0,0244} \right)} = 0,119 \text{ Вт.}$$

в) Конструкция горловины сосуда выполнена так, чтобы минимизировать теплопритоки. К тому же крышка сосуда благодаря своей конструкции вкручивается до рабочего объема, минуя горловину и образуя с внутренним объемом сосуда теплоизолированную конструкцию. Поэтому расчетом горловины в нашем случае можно пренебречь.

г) Теплоприток через крышку сосуда:

$$Q_k = \frac{0,785 \cdot d^2 (T_1 - T_2)}{\left(\frac{\delta_{\text{пласт внутр}}}{\lambda_{\text{пласт}}} + \frac{\delta_{\text{пен}}}{\lambda_{\text{пен}}} + \frac{\delta_{\text{пласт внеш}}}{\lambda_{\text{пласт}}} \right)}, \quad (24)$$

где $\lambda_{\text{пласт}} = 8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ – коэффициент теплопроводности PLA-пластика, из которого изготовлена крышка;

$\lambda_{\text{пен}} = 0,033 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ – коэффициент теплопроводности пеноплекса, который образует изоляцию между верхней и нижней частями крышки;

$\delta_{\text{пласт внутр}} = 0,003 \text{ м}$ – толщина внутренней части крышки;

$\delta_{\text{пласт внеш}} = 0,006 \text{ м}$ – толщина внешней части крышки;

$\delta_{\text{пен}} = 0,033 \text{ м}$ – толщина пеноплекса;

$d = 0,078 \text{ м}$ – диаметр крышки.

Подставляя значения величин в формулу, получим:

$$Q_k = \frac{0,785 \cdot 0,078^2 (295 - 80)}{\left(\frac{0,003}{8} + \frac{0,033}{0,033} + \frac{0,006}{8} \right)} = 1,015 \text{ Вт.}$$

д) Общий теплоприток к сосуду криостата составит:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{цил}} + Q_{\text{дна}} + Q_k = 1,606 + 0,119 + 1,015 = 2,74 \text{ Вт.} \quad (25)$$

Исходя из расчета видно, что основные потери рабочего тела будут происходить через цилиндрическую стенку и крышку сосуда. По полученной величине теплопритока рассчитаем потери жидкого азота.

2.2.2 Определение потерь рабочей жидкости

Потери рабочей жидкости при стационарном режиме подсчитываются по формуле:

$$m = \frac{Q_{\text{общ}}}{r}, \quad (26)$$

где $r = 197,35 \text{ кДж/кг}$ – теплота парообразования жидкого азота.

$$m = \frac{2,74}{197,35} = 0,0139 \frac{\text{г}}{\text{сек}}.$$

Потери рабочей жидкости при наполнении сосуда зависят от веса и теплоемкости материала сосуда, изоляции и начальной температуры. Поэтому общее количество холода, необходимое для охлаждения сосуда и изоляции определяется по следующей формуле:

$$Q_{\text{охл}} = m_{\text{сосуда1}} \cdot C_p(T_1 - T_{\text{азота}}) + m_{\text{сосуда2}} \cdot C_p(T_1 - T_{\text{ср}}), \quad (27)$$

где $m_{\text{сосуда1}} = 0,15$ кг – вес внутреннего сосуда;

$m_{\text{сосуда2}} = 0,241$ кг – вес внешнего сосуда;

$C_p = 0,14$ Дж/кг · К – теплоемкость нержавеющей стали;

$T_{\text{азота}} = 77$ К – температура хранения жидкого азота;

$T_{\text{ср}} = 185$ К – среднее значение температуры.

Подставляя числовые значения в формулу, получим:

$$Q_{\text{охл}} = 0,15 \cdot 0,14 \cdot (295 - 77) + 0,241 \cdot 0,14 \cdot (295 - 185) = 8,29 \text{ Вт}.$$

Количество испаряющейся жидкости до момента охлаждения сосуда рассчитывается по формуле:

$$g = \frac{Q_{\text{охл}}}{r} = \frac{8,29}{197,35} = 0,042 \frac{\text{г}}{\text{сек}}. \quad (28)$$

Данный теоретический расчет дает первоначальное представление о том, какая величина теплопритоков поступает к исследуемому криостату, а также какое количество рабочего тела необходимо подводить в единицу времени при его охлаждении.

3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Проектирование систем охлаждения, основанных на применении жидкостей, кипящих при низких температурах, исходя из конкретных требований, ведется как правило по двум основным направлениям:

- 1) охлаждаемый объект представляет собой единое целое с сосудом Дьюара, в котором содержится охлаждающая жидкость;
- 2) охлаждаемый объект соединен с сосудом Дьюара или с баллоном изолированной или не изолированной трубкой, по которой подается жидкость. В данном случае экспериментальная установка скомпонована по второму принципу.

Рассмотрим схему экспериментальной испарительной системы охлаждения, изображенную на рисунке 3.1.

В ней можно выделить четыре основных составляющих, которые образуют систему: I – сосуд Дьюара объемом 16 литров, в котором находится жидкий азот; II – криогенная испарительная установка; III – устройство криостатирования, представляющее собой емкость с вакуумной изоляцией и крышку, в которую установлен испаритель с термодатчиками; IV – блок управления системой на базе контролера ОВЕН.

На рисунке 3.2 показана принципиальная схема подачи жидкого азота, содержащегося в сосуде Дьюара 1, к сосуду криостата 9. В данной системе сосуд Дьюара с жидким азотом находится на некотором расстоянии от сосуда криостата и соединяется с ним вакуумным трубопроводом 3, по которому подается рабочая жидкость. Вытеснение жидкости из сосуда Дьюара осуществляется созданием в нем избыточного давления путем частичного испарения жидкого азота с помощью электронагревателя 2, установленного внутри сосуда. Величина избыточного давления зависит от гидравлического сопротивления трубки, подводящей охлаждающую жидкость к испарителю 8, степени ее теплоизоляции и от теплопритоков к криостату.

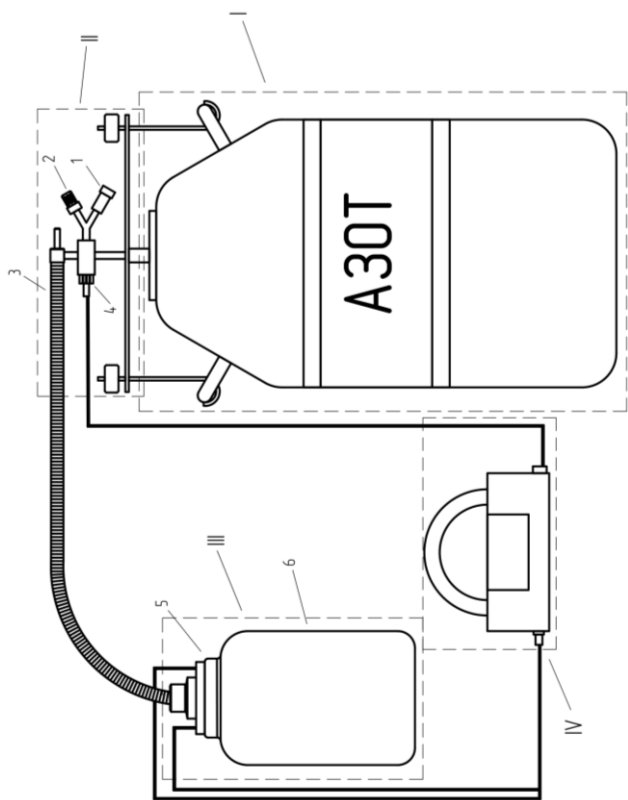


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки:

I – сосуд Дьюара; II – испарительная установка (1 – датчик давления, 2 – клапан регулировки и сброса давления, 3 – гибкий вакуумный трубопровод, 4 – разъем подключения к блоку управления); III – криостат (5 – крышка сосуда с термодатчиками и испарителем, 6 – сосуд криостата); IV – блок управления экспериментальной установкой

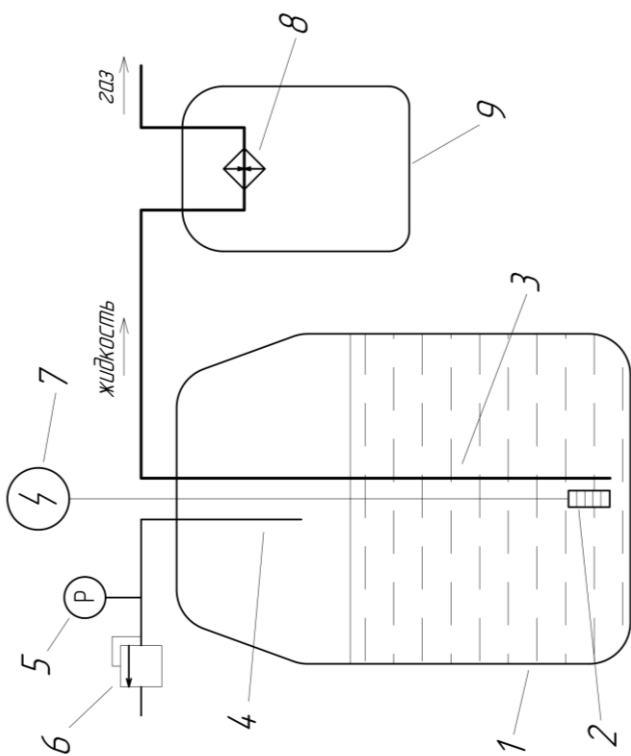
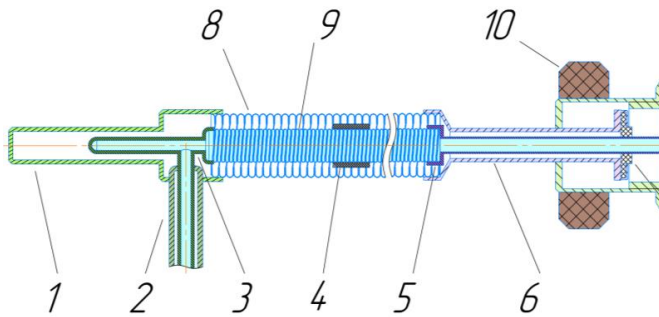


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема криогенной испарительной системы охлаждения: 1 – сосуд Дьюара; 2 – нагревательный элемент; 3 – вакуумный трубопровод подачи жидкого азота в криостат; 4 – трубопровод, расположенный в газообразной фракции азота; 5 – датчик давления; 6 – клапан регулирования и сброса давления; 7 – питание, подаваемое на нагревательный элемент;

8 – испарительное устройство; 9 – сосуд криостата с вакуумной изоляцией

3.1 Конструкция криогенной испарительной установки

Перейдем к рассмотрению конструктивного решения испарительной установки, общий вид которой представлен в приложении А на рисунке А.1. На рисунке 3.1.1 изображена часть испарительной установки, находящаяся над сосудом Дьюара после ее монтажа.

В горловину сосуда Дьюара предварительно устанавливается проставка 7, после чего нагреватель погружается в сосуд, и вся испарительная система фиксируется на нем с помощью кронштейна 9. Вакуумный трубопровод 1 погружен до дна сосуда, а трубопровод 6 заканчивается в его горловине.

Герметизация внутренней полости сосуда Дьюара осуществляется резиновой проставкой 8 благодаря тому, что испарительная установка плотно прижимается к ней кронштейном, на концах которого установлены крюки, цепляющиеся за рукоятки сосуда. Создание избыточного давления в сосуде Дьюара достигается путем частичного испарения хранящейся в нем жидкости с помощью электронагревателя, соединенного через специальный разъем 3 в блоке агрегатов 2. При этом охлаждающая жидкость вытесняется по вакуумному трубопроводу 1 в гибкий вакуумный трубопровод, а затем в криостат. В резьбовое отверстие 10 ввинчен Y-образный тройник, на котором установлены клапан регулировки и сброса давления, а также датчик давления. С помощью данного клапана может быть осуществлен быстрый сброс избыточного давления, создаваемого в сосуде, и прекращение подачи жидкости.

При данной конструкции трубопроводов использование нагревателя потребуется только на период времени, необходимый для охлаждения всей арматуры до температуры кипения жидкого азота. После этого питание электронагревателя может быть прекращено, а вытеснение жидкости из сосуда Дьюара будет происходить за счет частичного испарения самой жидкости

вследствие теплопритоков к сосуду. Величина теплопритоков определяет количество вытесненной жидкости.

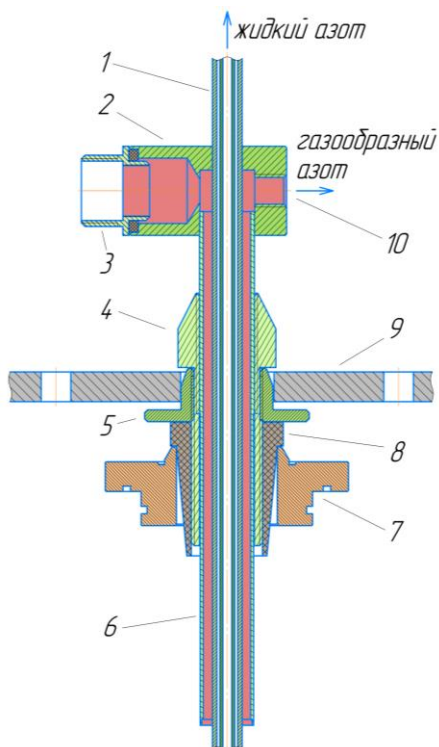


Рисунок 3.1.1 – Конструкция верхней части криогенной испарительной установки: 1 – вакуумный трубопровод, состоящий из внешней и внутренней трубы; 2 – блок агрегатов; 3 – разъем для соединения проводки датчиков с блоком управления; 4 – болт с отверстием под трубопровод; 5 – накидная гайка; 6 – трубопровод подвода газообразного азота к блоку агрегатов; 7 – проставка, устанавливаемая в горловину сосуда Дьюара; 8 – резиновая проставка; 9 – кронштейн крепления испарительной установки к сосуду Дьюара; 10 – резьбовое отверстие, в которое устанавливается клапан сброса и датчик давления

Рассмотрим подробнее конструкцию электронагревателя, помещенного в сосуд Дьюара, который представлен на рисунке 3.1.2. К вакуумному трубопроводу 3, через который вытесняется охлаждающая жидкость, припаян конический элемент крепления 2. В нем просверлены 2 отверстия для подвода проводов питания к спирали электронагревателя и к датчику температуры.

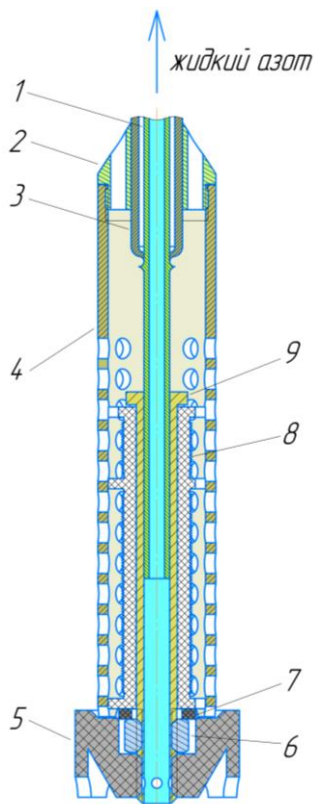


Рисунок 3.1.2 – Конструкция электронагревателя криогенной испарительной установки: 1 – внутренняя трубка вакуумного трубопровода; 2 – элемент крепления; 3 – внешняя трубка вакуумного трубопровода; 4 – цилиндрический корпус; 5 – пластиковый наконечник; 6 – гайка; 7 – проставочное кольцо; 8 – пластиковая втулка; 9 – латунный наконечник

К внутренней трубке 1 вакуумного трубопровода припаян латунный наконечник 9, на который устанавливается пластиковая втулка 8. Корпус втулки имеет резьбу для установки на нее спирали из нихромовой проволоки, служащей нагревательным элементом, а также пазы для установки проводки и датчика температуры. Втулка фиксируется на латунном наконечнике с помощью проставочного кольца 7 и гайки 6. Для предотвращения механических повреждений нагревательного элемента и термодатчика на элемент крепления 2 с помощью резьбового соединения устанавливается латунный цилиндрический корпус с отверстиями по всей поверхности, через которые осуществляется приток жидкого азота к спирали электронагревателя. Нижнее положение корпуса фиксирует пластиковый наконечник 5, соединенный с латунным наконечником 9 резьбовым соединением.

3.2 Сосуд Дьюара

Сосуд Дьюара в соответствии с рисунком 3.2.1 представляет собой двустенный резервуар, имеющий внутренний сосуд 3 с монтированной на него изоляцией 1 и наружный корпус, образованный кожухом 2.

Внутренний сосуд и кожух соединены между собой длинной стеклопластиковой горловиной 5, в которую устанавливается проставка (рисунок 3.1.1, 7) испарительной установки. Внутренний сосуд и наружный кожух сосуда изготовлены из алюминиевого сплава. Межстенное пространство сосуда отвакуумированно во время изготовления до остаточного давления, равного 10^{-4} мм рт. ст. Для поддержания вакуума в течение длительного времени эксплуатации в межстенное пространство помещен адсорбент 4 и поглотитель водорода 8. На кожухе находится клапан вакуумирования 6, закрытый колпачком во избежание механических повреждений. Горловина сосуда закрывается крышкой с пенопластовой

вставкой 7. Принцип работы сосуда основан на уменьшении теплопритоков к жидкому азоту из окружающей среды за счет применения теплоизоляции.

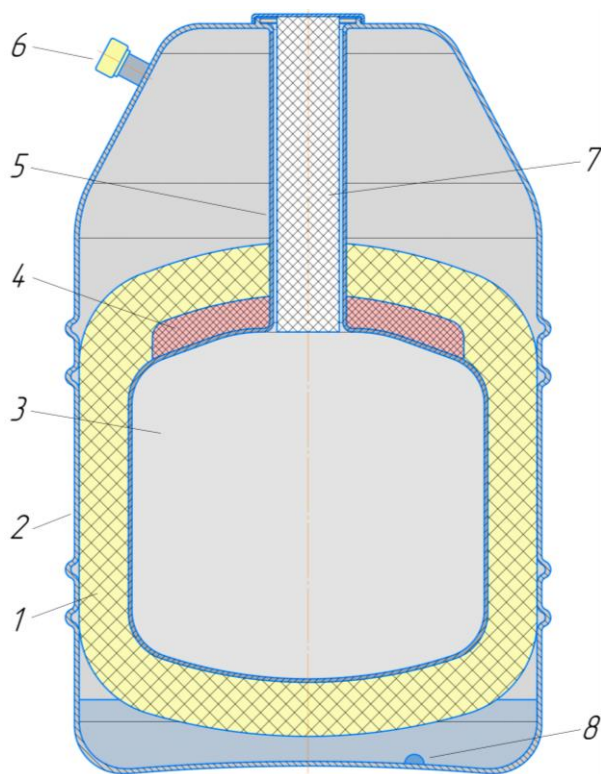


Рисунок 3.2.1 – Конструкция сосуда Дьюара:

- 1 – изоляция; 2 – кожух; 3 – внутренний сосуд; 4 – адсорбент;
- 5 – горловина; 6 – клапан вакуумирования; 7 – вставка;
- 8 – поглотитель водорода

3.3 Гибкий вакуумный трубопровод

Для более подробного рассмотрения конструкции вакуумного трубопровода обратимся к рисунку 3.3.1.

Трубопровод, выходящий из блока агрегатов испарительной установки, вварен в наконечник 1. Для минимизации теплопритоков к рабочей жидкости внешняя трубка 2 заканчивается на наконечнике, а внутренняя трубка 3 зафиксирована в положении, исключающем ее соприкосновение с наконечником. Далее внутренняя трубка имеет расширение, к которому приварена внутренняя гофра 9. На противоположном конце гофра приварена к концевой трубке 5, которая оканчивается носиком. По рассмотренному контуру рабочая жидкость поступает от испарительной установки до потребителя.

Внешняя часть трубопровода представляет собой внешнюю гофру 8, приваренную одним концом к наконечнику 1, а другим к концевикам 6. Между внешней и внутренней гофрами по всей длине трубопровода установлены фторопластовые проставки 4, которые исключают в процессе эксплуатации их соприкосновение друг с другом. В свою очередь в концевик 6 вмонтирована фторопластовая шайба 7, фиксирующая положение концевой трубки 5 относительно концевика и исключающее их соприкосновение.

Между двумя контурами, по одному из которых течет жидкий азот (рисунок 3.3.1: 3, 5, 9), внутренняя полость через специальные отверстия в наконечнике 1 отвакуумирована, тем самым минимизируются теплопритоки к рабочей жидкости.

Соединение вакуумного трубопровода с испарителем криостата осуществляется с помощью элемента крепления 11, имеющего резьбу. На нем также присутствует текстолитовый барашек 10, с помощью которого затягивается резьбовое соединение.

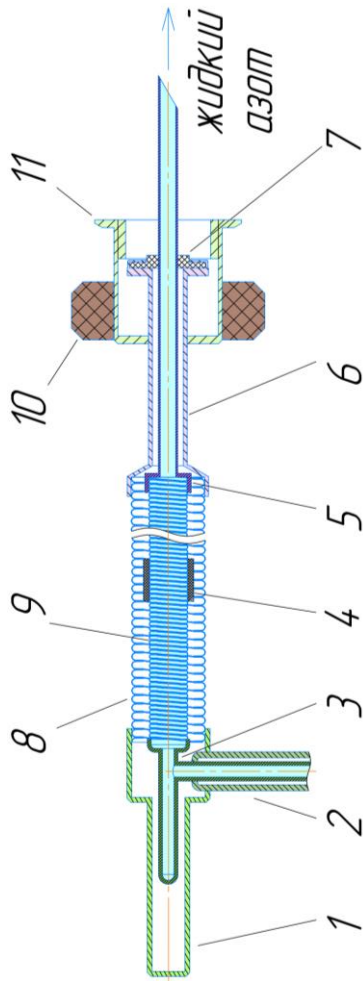


Рисунок 3.3.1 – Конструкция гибкого вакуумного трубопровода:

- 1 – наконечник; 2 – внешняя трубка вакуумного трубопровода испарительной установки;
- 3 – внутренняя трубка; 4 – фторопластовая проставка; 5 – концевая трубка с носиком; 6 – концевик;
- 7 – фиксирующая шайба; 8 – внешняя гофра; 9 – внутренняя гофра; 10 – текстолитовый барашек;
- 11 – элемент крепления

3.4 Конструкция криостата

На рисунке 3.4.1 представлена конструкция криостата, которая соединяется с испарительной установкой через гибкий вакуумный трубопровод, с помощью вертыша 1. Носик вакуумного трубопровода соединяется с внутренней медной трубкой 7, по которой жидкий азот поступает в медный наконечник 12. В наконечнике просверлено специальное отверстие, в которое помещается термопара для замера температуры на нем. Достигая наконечника, жидкий азот испаряется, пары через отверстия в медной трубке 7 поступают в пространство между трубками 7 и 6, а затем выходят через отверстия в титановой стойке 6 и вертыше 1 в атмосферу.

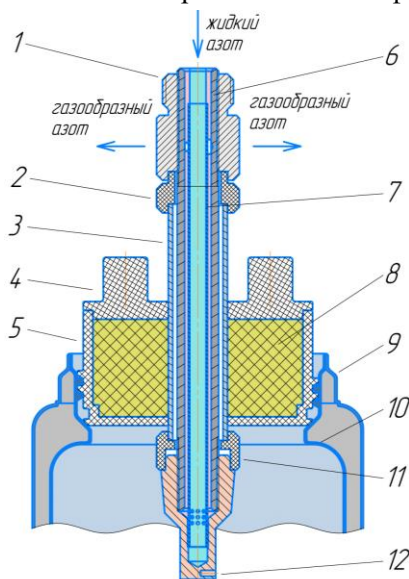


Рисунок 3.4.1 – Конструкция криостата:

1 – вертыш; 2 – первая проставка; 3 – внешняя трубка; 4 – верхняя часть крышки; 5 – нижняя часть крышки; 6 – стойка титановая; 7 – внутренняя медная трубка; 8 – теплоизолирующий слой; 9 – внешняя часть сосуда криостата; 10 – внутренняя часть сосуда криостата; 11 – вторая проставка; 12 – медный наконечник

Корпус испарителя представляет собой трубку 3, зафиксированную в пазах проставок 2 и 11. Сам испаритель установлен на крышке криостата, состоящей из верхней 4, нижней 5 частей, внутри которой находится теплоизолирующий слой из пеноплекса. На верхней части есть 2 барашка, с помощью которых крышка закручивается и выкручивается. В самой крышке проделаны 2 отверстия, через которые проведены термодпары к медному наконечнику и внутреннему пространству сосуда криостата, а также после резбовой части есть паз под резиновое кольцо, обеспечивающее герметичность. Сам сосуд криостата состоит из наружной 9 и внутренней 10 частей, между которыми есть вакуумная изоляция. Общий вид криостата представлен в приложении А на рисунке А.2.

3.5 Конструкция корпуса блока управления установкой

Для предотвращения внешних воздействий на элементы электрической схемы системы управления был смоделирован и создан корпус блока управления. На рисунке 3.5.1 представлен корпус в разрезе.

Корпус представляет собой стойку III, состоящую из двух половин. На каждой из них имеется ряд отверстий, с помощью которых осуществляется крепление передней I и задней II частей корпуса к стойке. Передняя часть корпуса I имеет специальное отверстие, в которое монтируется разъем питания и кнопка включения/выключения блока питания. Задняя часть также имеет отверстие, но для разъема, связывающего систему охлаждения с блоком управления. Снизу на обеих частях корпуса имеется множество отверстий, обеспечивающих доступ воздуха к блоку питания для его охлаждения. На верхней части корпуса имеется рукоятка IV, позволяющая безопасно перемещать блок управления. Рукоятка крепится к корпусу с помощью винтов, закручиваемых в отверстия 4. А с по-

мощью канала 5 внутреннее пространство корпуса связано с окружающей средой, что обеспечивает точное измерение атмосферных условий датчиком, установленным внутри.

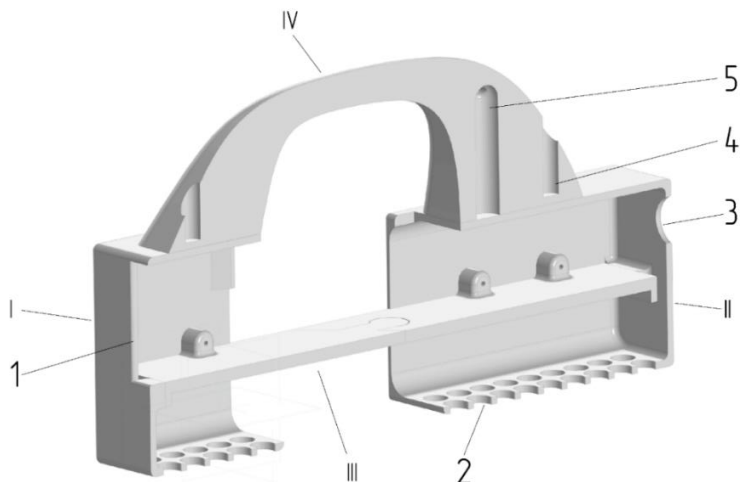


Рисунок 3.5.1 – Конструкция корпуса блока управления:

I – передняя часть корпуса; II – задняя часть корпуса;

III – внутренняя стойка; IV – рукоятка блока управления;

1 – отверстие для установки разъема питания и выключателя блока питания; 2 – отверстия в нижней части корпуса; 3 – отверстие для разъема коммуникации с агрегатами системы охлаждения; 4 – отверстия в рукоятке под винты; 5 – канал, связывающий внутреннюю часть блока управления с окружающей средой

Все модели и чертежи деталей криогенной испарительной системы охлаждения выполнены в программном комплексе для моделирования КОМПАС 3Д. В приложении Б на рисунке Б.1 представлено начальное окно программы и окно для работы с созданными моделями.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Лабораторная работа №1 «Определение теплопритоков через криостат»

Цель работы: определить численную величину теплопритоков, поступающих к рабочему телу через стенки сосуда криостата.

Оборудование: сосуд криостата, сосуд Дьюара, рабочая жидкость (жидкий азот).

Ход работы

1) Экспериментальное исследование начинается с определения теплопритоков через стенки криостата в реальных условиях. Перед проведением опыта запишем параметры, необходимые для дальнейшего исследования:

- масса пустого сосуда m_0 (г);
- температура окружающей среды $T_{\text{окр ср}}$ (К);
- атмосферное давление $p_{\text{атм}}$ (Па).

2) Залив порцию жидкого азота, необходимо дождаться пока сосуд осядет, затем измеряем на весах его массу. Это масса сосуда с азотом в начальный момент времени.

3) Затем нужно замерить массу сосуда с определенным интервалом времени, данные записываем в таблицу 4.1.1.

Таблица 4.1.1 – Результаты эксперимента

τ , сек	$m_{\text{сосуда}}$, г	$m_{\text{испар.}}$, г	Q_c , Вт

где $m_{\text{сосуда}}$ – масса сосуда с жидким азотом;
 $m_{\text{испар.}}$ – масса испарившегося азота;
 Q_c – теплопритоки к жидкому азоту через стенки сосуда.

Обработка экспериментальных данных:

1) После экспериментальной части необходимо вычислить по формуле (29) какое количество азота испаряется в секунду:

$$g = \frac{m}{\tau} \left[\frac{\text{г}}{\text{сек}} \right], \quad (29)$$

2) Затем определяются теплопритоки к жидкому азоту через стенки сосуда:

$$Q_c = g \cdot r \text{ [Вт]}, \quad (30)$$

3) В конечном итоге рассчитывается количество тепла, затраченное на испарение жидкого азота:

$$Q(\tau) = m \cdot r = Q_c \cdot \tau \text{ [Дж]}. \quad (31)$$

Содержание отчета

1. Исходные данные. Схема сосуда Дьюара.
2. Протокол записи экспериментальных данных.
3. Результаты расчетов.
4. График зависимости испарившегося азота от времени. Пример графика представлен на рисунке 4.1.1.
5. Вывод.

Пример содержания отчета:

1. Перед проведением опыта необходимо записать параметры, которые потребуются для дальнейших расчетов, а именно:

- масса пустого сосуда $m_0 = 391 \text{ г}$;
- температура окружающей среды $T_{\text{окр ср}} = 294 \text{ К}$;
- атмосферное давление $p_{\text{атм}} = 99125 \text{ Па}$.

2. Залив порцию жидкого азота, необходимо дождаться пока сосуд охладится, затем измеряем его на весах. Масса сосуда с азотом равняется 752 г, т.е. масса азота в сосуде $752-391=361$ грамм. Измерения массы сосуда проводится с интервалом в минуту (спустя первые пять минут масса сосуда составила 749 грамм, спустя вторые пять минут 746 грамм). Испарение жидкого азота происходит равномерно, каждые 5 минут испаряется по 3 грамма рабочей жидкости.

Таблица 4.1.2 – Результаты эксперимента

τ , сек	$m_{\text{сосуда}}$, Г	$m_{\text{испар.}}$, Г	Q_c , Вт
0	752	0	1,9735
60	751,4	0,6	
120	750,8	1,2	
180	750,2	1,8	
240	749,6	2,4	
300	749	3	
360	748,4	3,6	
420	747,8	4,2	
480	747,2	4,8	
540	746,6	5,4	
600	746	6	

3. Согласно формуле (29) необходимо вычислить, какое количество жидкого азота испарялось в секунду, для этого масса испарившегося азота делится на время всего опыта:

$$g = \frac{m}{\tau} = \frac{6}{600} = 0,01 \frac{\text{г}}{\text{сек}},$$

Далее определяется величина теплопритоков к жидкому азоту через стенки сосуда:

$$Q_c = g \cdot r = 0,01 \cdot 197,35 = 1,9735 \text{ Вт},$$

Количество тепла, затраченное на испарение 6 грамм жидкого азота равняется:

$$Q(\tau) = m \cdot r = Q_c \cdot \tau = 1,9735 \cdot 600 = 1184,1 \text{ Дж.}$$

4. График:

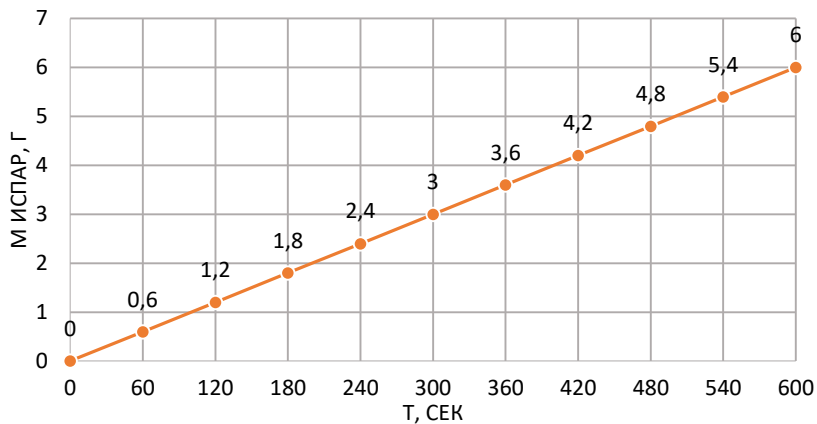


Рисунок 4.1.1 – Графическая зависимость массы испарившегося азота от времени

Лабораторная работа №2 «Определение удельной теплоемкости материала металлической заготовки»

Цель работы: определить удельной теплоемкости материала при охлаждении металлических заготовок до криогенных температур.

Оборудование: сосуд криостата; сосуд Дьюара; рабочая жидкость (жидкий азот); металлические наконечники.

Ход работы

1) Перед проведением опыта необходимо записать параметры, которые потребуются для дальнейшего исследования:

- масса пустого сосуда m_c (г);
- масса заготовок $m_{з,1}; m_{з,2}; \dots; m_{з,n}$ (г);
- температура окружающей среды $T_{окр\ ср}$ (К);
- атмосферное давление $p_{атм}$ (Па).

2) В начале необходимо залить жидкий азот в сосуд криостата, а затем дождаться, пока сосуд полностью охладится, и измерить его массу m_c' .

3) Далее необходимо поочередно погрузить заготовки в сосуд. Погрузив первую заготовку, необходимо определить массу сосуда с ней, а также время полного охлаждения образца. Заготовка считается охлажденной, когда жидкий азот в сосуде перестает кипеть. Затем необходимо определить конечную массу сосуда с заготовкой. Экспериментальные данные необходимо занести в таблицу 4.2.1.

4) Аналогичный опыт проводится и с другими наконечниками.

Таблица 4.2.1 – Результаты эксперимента

τ , сек	$m_{\text{сосуда}}, \text{Г}$	$m_{\text{испар.}}, \text{Г}$	$Q(\tau), \text{Дж}$	$c_{\text{мат.л}}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
<i>Заготовка 1</i>				
<i>Заготовка 2</i>				
...				
<i>Заготовка n</i>				

где $m_{\text{сосуда}}$ – масса сосуда с жидким азотом и заготовкой (-ами);
 $m_{\text{испар.}}$ – масса испарившегося азота;
 Q – холодопроизводительность жидкого азота при охлаждении заготовки.

Обработка экспериментальных данных:

1) Количество теплоты, затраченное на охлаждение заготовки вычисляется по следующей формуле:

$$Q(\tau) = c_{\text{мат.н}} \cdot m_{\text{з.н}} \cdot (T_1 - T_2) + Q_{\text{т.п.}} \cdot \tau \quad [\text{Дж}], \quad (32)$$

где $c_{\text{мат.н}}$ – удельная теплоемкость материала, из которого сделан наконечник;

$m_{\text{з.н}}$ – масса заготовки;

$(T_1 - T_2)$ – разность температур заготовки до и после ее охлаждения;

$Q_{\text{т.п.}}$ – теплопритоки к сосуду криостата в единицу времени (см. Л/р №1);

τ – время, за которое произошло полное охлаждение заготовки.

2) Необходимо определить удельную теплоемкость материала, из которого изготовлены заготовки. Для этого необходимо выразить величину $c_{\text{мат.н}}$ из уравнения (32):

$$c_{\text{мат.н}} = \frac{Q(\tau) - Q_{\text{т.п.}} \cdot \tau}{m_{\text{з.н}} \cdot (T_1 - T_2)} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right], \quad (33)$$

3) Однако для этого необходимо определить неизвестную – количество теплоты, затраченное на охлаждение заготовки. Оно численно равняется количеству теплоты, затраченному на переход жидкого азота из жидкого состояния в газообразное и вычисляется по формуле:

$$Q(\tau) = m_{\text{испар.}} \cdot r \quad [\text{Дж}], \quad (34)$$

где r – теплота парообразования жидкого азота, равная $197,5 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$.

4) Далее вычисляется удельная теплоемкость и определяется материал, из которого изготовлены наконечники, согласно таблице В.1 (Приложение В).

Содержание отчета

1. Исходные данные. Схема сосуда криостата.
2. Протокол записи экспериментальных данных.

3. Результаты расчетов.
4. График зависимости испарившегося азота от времени. Пример графика представлен на рисунке 4.2.1.

5. Вывод.

Пример содержания отчета:

1. Исходные данные:

- масса пустого сосуда $m_0 = 391$ г;
- масса заготовки $m_{з.1} = 45$ г;
- температура окружающей среды $T_{окр\ ср} = 294$ К;
- атмосферное давление $p_{атм} = 99125$ Па.

2. Залив порцию жидкого азота, необходимо дождаться пока сосуд охладится, затем измерить его на весах. Масса сосуда с азотом равняется 746 г

Затем нужно погрузить в сосуд заготовку и засесть время до ее полного охлаждения. Начальная масса сосуда с заготовкой равна $746+45=791$ грамм. Конечная масса сосуда с заготовкой стала равной 772 грамма. Время охлаждения: 1 минута. За это время жидкий азот испарился в количестве $791-772=19$ грамм. Аналогично и с остальными заготовками.

3. Известно, что температура жидкого азота внутри сосуда равняется 77 К, а температура заготовки равна температуре окружающей среды.

Необходимо определить количество теплоты, затраченное на охлаждение металлической заготовки:

$$Q(\tau) = 19 \cdot 197,5 = 3752,5 \text{ Дж},$$

Удельная теплоемкость третьего наконечника:

$$c_{\text{мат.з}} = \frac{Q(\tau) - Q_{\text{т.п.}} \cdot \tau}{m_{з.1} \cdot (T_1 - T_2)} = \frac{3752,5 - 1,9735 \cdot 60}{0,045 \cdot 217} = 372 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

По таблице В.1 (Приложение В) видно, что материал, из которого изготовлена заготовка – латунь.

Таблица 4.2.2 – Результаты эксперимента

τ , сек	$m_{\text{сосуда}}, \text{Г}$	$m_{\text{испар.}}, \text{Г}$	$Q(\tau), \text{Дж}$	$c_{\text{мат.п.}}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
<i>Заготовка 1</i>				
0	791	0	3752,5	372
10	787,83	3,166		
20	784,66	6,333		
30	781,49	9,5		
40	778,33	12,666		
50	775,16	15,833		
60	772	19		
...				

4. График:

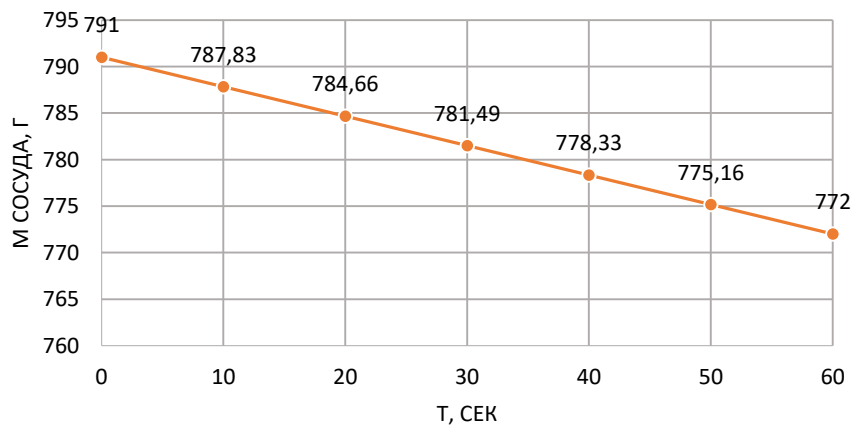


Рисунок 4.2.1 – Графическая зависимость, отражающая изменение массы сосуда с металлической заготовкой с течением времени

Лабораторная работа №3 «Определение холодопроизводительности криогенной испарительной системы охлаждения»

Цель работы: достижение и поддержание оптимального режима работы криогенной системы охлаждения, в результате чего необходимо получить температуру внутри сосуда криостата, равную 80 К. Также, на основе результатов эксперимента и входных данных необходимо произвести расчет расхода рабочей жидкости и холодопроизводительность, полученную в процессе работы.

Оборудование: криогенная испарительная система; сосуд криостата; сосуд Дьюара; рабочая жидкость (жидкий азот).

Ход работы:

1) Подготовка к проведению эксперимента

а) Прежде чем начать работу с экспериментальной системой, необходимо подготовить каждую из ее составляющих к работе. Вначале испарительная система устанавливается в сосуд Дьюара. Перед установкой необходимо убедиться в том, что клапан регулировки и сброса давления находится в открытом положении, а на горловину сосуда установлена проставка (рисунок 3.1.1, 7). Затем нагревательный элемент испарительной системы погружается в сосуд Дьюара и фиксируется с помощью крюков кронштейна за ручки сосуда. Так как до погружения температура испарительной установки равнялась атмосферной, хладагент внутри сосуда стремительно закипает. Происходит рост давления, которое частично стравливается через отверстие клапана сброса. Также, под действием давления внутри сосуда через вакуумный трубопровод испарительной установки вытесняется некоторая часть рабочей жидкости. Когда температура погруженной в сосуд части сравнивается с температурой хладагента, рост давления останавливается, а вытеснение жидкого азота прекращается. После этого необходимо установить клапан сброса давления в закрытое положение.

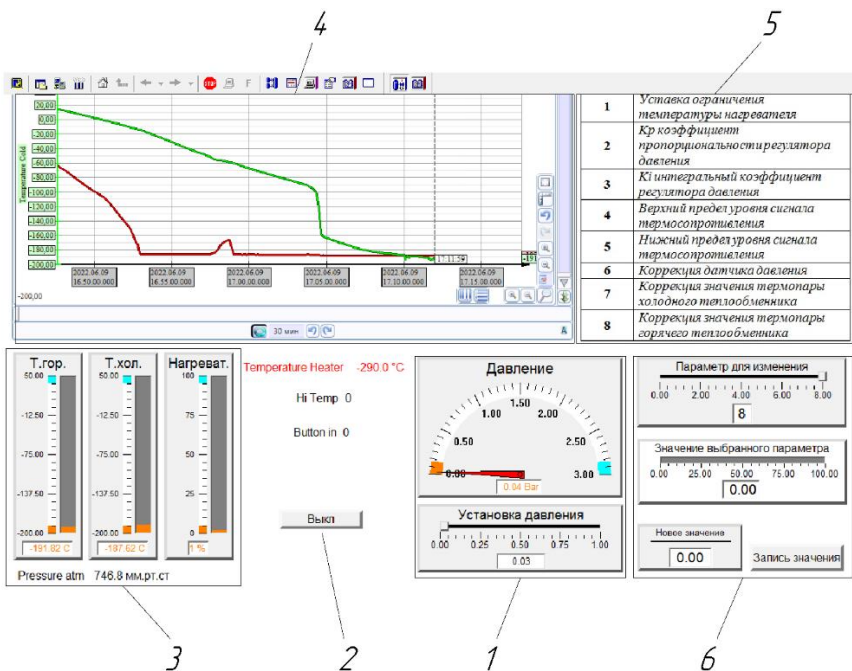


Рисунок 4.3.1 – Интерфейс программы управления экспериментальной установкой: 1 – шкала, показывающая давление внутри сосуда Дьюара, и окно установки его значения; 2 – кнопка запуска и остановки работы нагревательного элемента; 3 – блок информации; 4 – окно графиков изменения параметров по времени; 5 – таблица параметров системы и их порядковый номер; 6 – блок калибровки параметров системы

б) Следующим шагом гибкий вакуумный трубопровод подсоединяется к испарителю крышки криостата. Затем крышка устанавливается в сосуд криостата, но необходимо предварительно убедиться, что термопара после установки не будет касаться стенок и дна внутренней части сосуда.

в) Далее подключаются разъемы испарительной установки и криостата к блоку управления системой, а сам блок управления подключается к компьютеру для запуска и управления работой испарительной системы. На этом подготовительные работы завершаются.

2) Проведение экспериментального исследования

а) Запуск и управление рабочим процессом осуществляется с помощью программы, созданной на платформе MasterSCADA. На рисунке 4.3.1 представлен интерфейс программы с ее основными элементами.

Перед запуском необходимо убедиться в точности показаний датчиков и термодпар. В случае несоответствия показаний действительности производится калибровка датчиков. Для этого в блоке калибровки 6 выставляется порядковый номер редактируемого параметра из таблицы 5 и меняется его значение. После этого записывается новое значение с помощью кнопки «запись значения». Таким образом добивается точность показаний датчиков системы.

Затем записываются исходные данные:

- атмосферное давление p_{atm} ;
- масса пустого сосуда m_0 ;
- температура окружающей среды $T_{окр\ ср}$.

б) Далее необходимо осуществить запуск установки. Для этого выставляется начальное давление на блоке программы 1 равно 0,4 бар. На информационном блоке 3 по шкале «Нагреват.» отображена мощность работы нагревателя в процентном соотношении. Происходит прогрев спирали нагревательного элемента, часть жидкого азота в сосуде Дьюара испаряется, и создается давление внутри него, равное выставленному. Достижение необходимого давления осуществляется с помощью ПИД – регулирования, коэффициенты которого можно также настроить с помощью блока 6. Жидкий азот

под действием давления в сосуде Дьюара начинает вытесняться в гибкий вакуумный трубопровод. Некоторое время трубопровод захлаживается от поступающей жидкости, происходит снижение температуры его внутренней части до рабочей. Для избежания выплескивания рабочего тела из испарителя криостата необходимо снизить давление на панели 1 до значения в пределах 0,1-0,2 бар.

в) После того, как агрегаты испарительной системы остудятся до рабочей температуры, необходимо выключить нагревательный элемент с помощью кнопки 2. Система начнет работать в автономном режиме: теплопритоки, поступающие к сосуду Дьюара частично испаряют рабочую жидкость, тем самым в системе поддерживается рабочее давление без помощи нагревательного элемента. Жидкий азот под действием давления продолжает порционно вытесняться в вакуумный трубопровод, поступая на медный наконечник испарителя криостата. Там он испаряется, отбирая тепло от наконечника, а пары азота выходят через отверстия испарителя, расположенные над крышкой (рисунок 3.2.1). Наконечник начинает постепенно захлаживаться, при этом остужая объем внутри сосуда криостата.

На начальном этапе охлаждения происходит конвективный теплообмен благодаря воздуху внутри сосуда, однако со временем давление внутри снижается. Влага внутри выпадает на наконечник в иней, создается частичный вакуум, и тогда охлаждение внутри сосуда происходит благодаря лучистому теплообмену. В ходе эксперимента достигается оптимальный режим работы системы охлаждения. Каждая порция жидкого азота поступает в небольших количествах в испаритель криостата и практически полностью испаряется, что говорит о правильной работе системы. Жидкий азот расходуется довольно экономично, в свою очередь медный наконечник плавно охлаждается.

В процессе эксперимента в окне графиков 4 производится визуальное отображение изменения температуры по времени. Полученный график представлен в приложении Г на рисунке Г.1. На нем можно видеть, как происходил процесс захлаживания медного наконечника и остывание объема внутри сосуда криостата. В определенный момент температура на наконечнике практически перестала снижаться. Это говорит о том, что начался процесс конденсации воздуха. Температура перехода воздуха из газообразного состояния в жидкое находится в пределах 83...87 К. На графике видно, что в среднем температура наконечника держалась на уровне 85 К.

В ходе эксперимента крышка криостата, выполненная из PLA–пластика, заметно сжимается под действием низких температур. Поэтому воздух из атмосферы поступает в более разреженную среду внутри сосуда и конденсируется. К концу опыта внутри сосуда была получена температура 80 К, что свидетельствует об успешном выполнении эксперимента и о достижении поставленной цели.

г) После завершения эксперимента необходимо прервать работу испарительной установки. Для этого клапан сброса давления открывается, избыточное давление внутри сосуда Дьюара стравливается в атмосферу, и порционная подача рабочей жидкости прерывается. Теперь необходимо проверить внутреннюю полость криостата. Для этого необходимо открутить крышку. На рисунке 4.3.2 показана внутренняя часть крышки криостата, на наконечнике которой можно заметить застывшую атмосферную влагу.



Рисунок 4.3.2 – Медный наконечник крышки криостата после проведения эксперимента

В результате эксперимента в сосуде действительно сконденсировался воздух. Известно, что жидкий воздух представляет собой мутноватую жидкость, причина этому – примеси аргона, углекислого газа, воды и других веществ, присутствующих в нем. Так и в

данном случае, полученная жидкость в сосуде мутноватая. Это отчетливо видно на рисунке 4.3.3.



Рисунок 4.3.3 – Жидкий воздух, полученный в ходе эксперимента

Таблица 4.3.1 – Результаты эксперимента

τ , мин	m_{N_2} , г	$m_{\text{сосуда}}$, г	$m_{\text{возд.}}$, г	Q , Вт

где m_{N_2} – масса азота, затраченная на охлаждение воздуха;

$m_{\text{сосуда}}$ – масса сосуда;

$m_{\text{возд.}}$ – масса сжиженного воздуха;

Q – холодопроизводительность криогенной системы охлаждения.

Обработка экспериментальных данных

Завершив эксперимент, необходимо определить массу полученного сжиженного воздуха, массу жидкого азота, затраченную на охлаждение сосуда криостата и сжижение воздуха, а также холодопроизводительность испарительной системы охлаждения.

1) Для получения наиболее достоверных данных необходимо сразу же измерить массу сосуда со сжиженным воздухом, так как он довольно стремительно испаряется. Зная массу пустого сосуда, определяем массу сжиженного воздуха, которая была получена.

2) Известно, что количество теплоты, отобранное жидким азотом на изменение его агрегатного состояния, суммарно равняется: теплоте, отведенной от сосуда криостата; теплоте, отведенной от воздуха на понижение его температуры; теплоте, отведенной от воздуха при изменении его агрегатного состояния. Для этого необходимо записать следующее уравнение:

$$m_{N_2} \cdot r_{N_2} = c_{\text{нерж}} \cdot m_c \cdot (T_1 - T_2) + m_{\text{возд}} \cdot r_{\text{возд}} + c_{\text{возд}} \cdot m_{\text{возд}} \cdot (T_1 - T_2), \quad (35)$$

где m_{N_2} – масса жидкого азота, затраченная на охлаждение сосуда и ожижение воздуха;

m_c – масса сосуда криостата;

$m_{\text{возд}}$ – масса сжиженного воздуха.

3) Зная время, затраченное на проведение эксперимента, вычисляется расход жидкого азота по формуле (36):

$$g = \frac{m}{\tau} \left[\frac{\text{г}}{\text{сек}} \right], \quad (36)$$

Холодопроизводительность криогенной системы охлаждения:

$$Q = g \cdot r \text{ [Вт]}. \quad (37)$$

Содержание отчета

1. Исходные данные. Схема сосуда Дьюара.
2. Протокол записи экспериментальных данных.

3. Результаты расчетов.
4. Вывод.

Пример содержания отчета:

1. Перед проведением опыта были записаны параметры, необходимые для дальнейших расчетов, а именно:

- масса пустого сосуда $m_0 = 391$ г;
- температура окружающей среды $T_{\text{окр ср}} = 294$ К;
- атмосферное давление $p_{\text{атм}} = 99125$ Па.

Таблица 4.3.2 – Результаты эксперимента

τ , мин	m_{N_2} , Г	$m_{\text{сосуда}}$, Г	$m_{\text{возд}}$, Г	Q, Вт
0	0	391	0	34,1
35	342	446	55	

2. Масса сжиженного воздуха равняется:

$$m_{\text{возд}} = m_c' - m_c = 446 - 391 = 55 \text{ г.}$$

Необходимо найти массу жидкого азота, затраченную в ходе эксперимента. Для этого выразим её из уравнения (3.1) и, подставив все известные значения, получим:

$$m_{N_2} = \frac{0,47 \cdot 391 \cdot (315 - 80) + 55 \cdot 205,7 + 1,005 \cdot 55 \cdot (315 - 80)}{197,35} = 342,1 \text{ г.}$$

Время проведения эксперимента составило 35 минут. Зная время, вычисляется расход жидкого азота:

$$g = \frac{m}{\tau} = \frac{342,1}{1980} = 0,173 \frac{\text{г}}{\text{сек}},$$

Холодопроизводительность криогенной системы охлаждения равняется:

$$Q = g \cdot r = 0,173 \cdot 197,35 = 34,1 \text{ Вт.}$$

Лабораторная работа №4

«Определение концентрации компонентов бинарной смеси»

Цель работы: определить концентрацию компонентов бинарной системы кислород-азот в паре и жидкости в сосуде криостата

Оборудование: сосуд криостата; испарительное устройство; сосуд Дьюара; рабочая жидкость (жидкий азот).

Ход работы

1) Перед проведением опыта записываются параметры, необходимые для дальнейшего исследования:

- давление смеси в сосуде криостата $P=0,1$ МПа.

2) Заливается порция жидкого азота в сосуд Дьюара, азот поступает в испарительную систему. После замеряется температура внутри криостата с определенным интервалом времени до стабилизации температуры. Данные записываются в таблицу 4.4.1.

Таблица 4.4.1 – Результаты эксперимента

τ_i , сек	T_i , К

Обработка экспериментальных данных:

1. По давлению смеси в сосуде криостата $P=0,1$ МПа находятся температуры кипения для чистых кислорода $T_{O_2} = 90$ К и азота $T_{N_2} = 77$ К.

2. Затем интервал температур разбивается $T_{N_2} < T < T_{O_2}$ на участки с шагом в один градус. Для каждого значения температуры T определяются давления кипения чистых веществ $P_{O_2}(T)$ и $P_{N_2}(T)$ по справочным таблицам, представленным в Приложении Д. Результаты заносятся в таблицу 4.4.2.

3. Для каждого значения температуры T определяется коэффициент летучести по формуле:

$$\alpha = \frac{P_{N_2}(T)}{P_{O_2}(T)} \quad (38)$$

4. Так как в бинарной смеси кислород-азот низкокипящим компонентом является азот, то определяется концентрация азота в жидкой фазе x_{N_2} и в паре y_{N_2} по формулам:

$$x_{N_2} = \frac{P - P_{O_2}(T)}{P_{N_2}(T) - P_{O_2}(T)}; \quad (39)$$

$$y_{N_2} = \frac{P_{N_2}(T) \cdot [P - P_{O_2}(T)]}{P \cdot [P_{N_2}(T) - P_{O_2}(T)]}. \quad (40)$$

Результаты заносятся в таблицу 4.4.2.

Таблица 4.4.2 – Результаты расчета

$T, \text{ К}$	$P_{O_2}(T), \text{ МПа}$	$P_{N_2}(T), \text{ МПа}$	α	x_{N_2}	y_{N_2}

5. Согласно данным, полученным в таблице 4.4.2 строится изобары в y - x -координатах.

6. Согласно данным, полученным в таблице 4.4.2 строится изобары в координатах T - x, y .

7. По температуре T_i , установившейся в криостате, согласно диаграмме T - x , y находятся концентрации азота в жидкой фазе x_{N_2} и в паре y_{N_2} .

8. Концентрации кислорода в жидкой фазе и в паре соответственно будут определяться как:

$$x_{O_2} = 1 - x_{N_2}; \quad (41)$$

$$y_{O_2} = 1 - y_{N_2}. \quad (42)$$

Содержание отчета

1. Исходные данные. Схема криостата с испарительным устройством.

2. Протокол записи экспериментальных данных.

3. Результаты расчетов.

4. Диаграмма y - x бинарной системы кислород-азот при постоянном давлении P . Пример графика представлен на рисунке 4.4.1.

5. Диаграмма T - x , y для смеси кислород-азот при постоянном давлении P . Пример графика представлен на рисунке 4.4.2.

6. Вывод.

Пример содержания отчета:

1. Перед проведением опыта были записаны параметры, необходимые для дальнейшего исследования:

- давление смеси в сосуде криостата $P=0,1$ МПа.

2. Залив порцию жидкого азота в сосуд Дьюара, азот поступает в испарительную систему. Измерение температуры внутри криостата проводилось с интервалом в 5 минут до стабилизации температуры.

3. Результаты эксперимента представлены в таблице 4.4.3.

Таблица 4.4.3 – Результаты эксперимента

τ_i , сек	T_i , К
0	
5	
10	
15	
20	
25	

4. Результаты расчета представлены в таблице 4.4.4.

Таблица 4.4.4 – Результаты расчета

T , К	$P_{O_2}(T)$, МПа	$P_{N_2}(T)$, МПа	α	x_{N_2}	y_{N_2}
77,00	0,02	0,10	5,17	1,00	1,00
78,00	0,02	0,11	4,79	0,89	0,98
79,00	0,03	0,12	4,66	0,77	0,94
80,00	0,03	0,14	4,54	0,65	0,90
81,00	0,03	0,15	4,43	0,56	0,85
82,00	0,04	0,17	4,32	0,47	0,79
83,00	0,04	0,19	4,22	0,39	0,73
84,00	0,05	0,21	4,12	0,32	0,66
85,00	0,06	0,23	4,03	0,25	0,57
86,00	0,06	0,25	3,94	0,19	0,48
87,00	0,07	0,28	3,86	0,14	0,38
88,00	0,08	0,30	3,78	0,09	0,27
89,00	0,09	0,33	3,70	0,04	0,15
90,00	0,10	0,36	3,63	0,00	0,00

5. График:

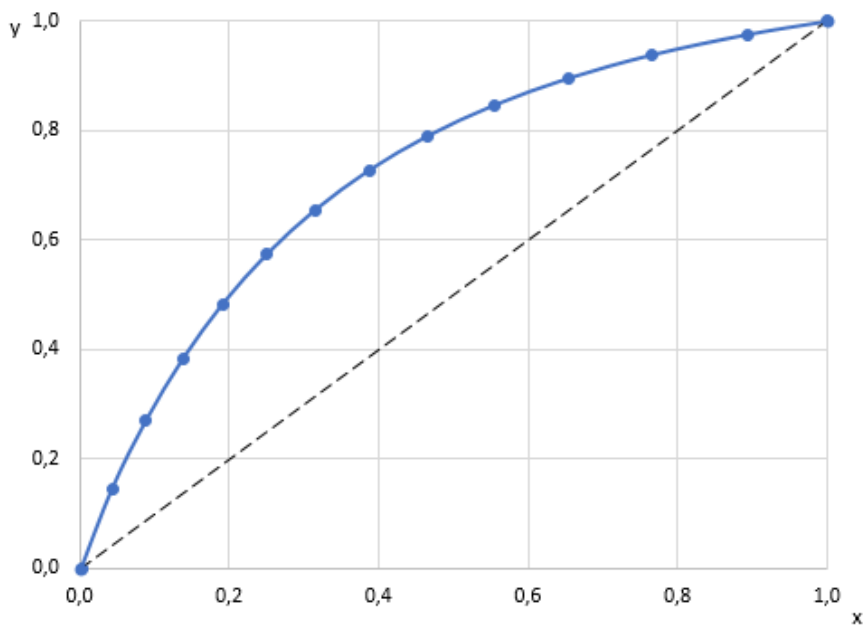


Рисунок 4.4.1 – Диаграмма y - x бинарной системы кислород-азот при постоянном давлении P

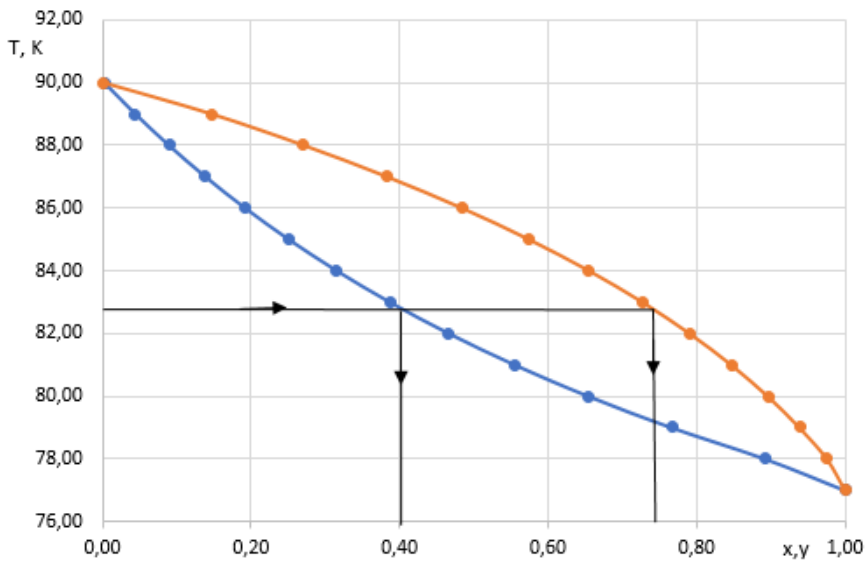


Рисунок 4.4.2 – Диаграмма T - x, y для смеси кислород-азот при постоянном давлении P

5 ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

5.1 Примеры решения задач

Задача 1. Определить количество получаемого в 1 ч жидкого воздуха и необходимую для этого затрату мощности при переработке 200 кг/ч воздуха, сжатого до 200 кгс/см². Установка работает по простому регенеративному циклу Линде. Температура воздуха до и после компрессора (при входе в теплообменник) 25 °С. Воздух дросселируется до 1 кгс/см². Потери холода в окружающую среду принять в размере 4,19·10³ Дж на 1 м³ воздуха (при нормальных условиях). Недорекуперация 5°С.

Решение. На рисунке 5.1.1 даны принципиальная схема установки и изображение процесса в координатах Т-S. Для расчёта пользуемся диаграммой Т-S для воздуха.

Удельную холодопроизводительность цикла определяем по формуле:

$$q = i_1 - i_3 = (510 - 474) \cdot 10^3 = 36 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} .$$

Потери холода на 1 кг перерабатываемого воздуха определяем по следующим формулам:

а) потери от недорекуперации

$$q_{\text{нед}} = c_p \Delta t = 1,01 \cdot 10^3 \cdot 5 = 5,05 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} ;$$

б) потери в окружающую среду

$$q_{\text{о.с.}} = 4,19 \cdot 10^3 / 1,29 = 3,25 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} .$$

Суммарные потери:

$$q_{\text{ном}} = (5,05 + 3,25) \cdot 10^3 = 8,3 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} .$$

Ожижаемую долю воздуха определяем по формуле:

$$y = \frac{(i_1 - i_3) - q_{\text{ном}}}{i_1 - i_0} = \frac{(36 - 8,3) \cdot 10^3}{(510 - 92,1) \cdot 10^3} = 0,067 .$$

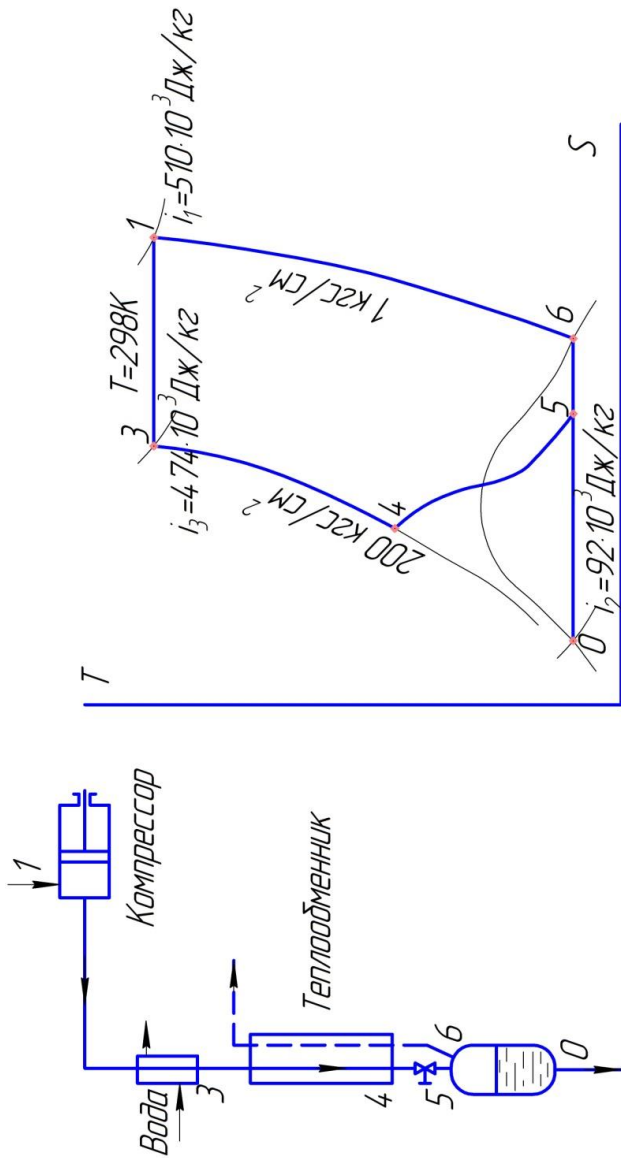


Рисунок 5.1.1 – Принципиальная схема установки и изображение процесса в координатах T-S для примера решения задачи 1

Расход ожижаемого воздуха:

$$G_{ж} = 200 \cdot 0,067 = 13,4 \text{ кг/ч}.$$

Затрачиваемую на валу компрессора мощность определяем по формуле:

$$N = 1,69 G_c RT \ln \frac{p_2}{p_1} = 1,69 \frac{200}{3600} \frac{287}{1000} 298 \ln \frac{200}{1} = \\ = \frac{1,69}{18} 0,287 \cdot 298 \cdot 2,3 \lg 200 = 42,5 \text{ кВт}$$

Удельный расход энергии на 1 кг жидкого воздуха;

$$N_{уд} = 42,5 / 13,4 = 3,16 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}.$$

Задача 2. Определить расход перерабатываемого воздуха для получения 50 кг/ч жидкого воздуха и затрачиваемую при этом мощность, если ожижение ведётся по циклу с предварительным (аммиачным) охлаждением воздуха до -35°C . Давление сжатия 200 кгс/см², дросселирование до 1 кгс/см². Начальная температура воздуха 25°C . Суммарные потери холода в окружающую среду и от недорекуперации принять в размере 8,8 кДж/кг.

Решение. Для определения удельных энтальпий воспользуемся диаграммой T-S для воздуха.

Удельную холодопроизводительность цикла определяем по формуле:

$$q' = i'_1 - i'_3 = (449 - 386) \cdot 10^3 = 63 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг},$$

где i'_1 – удельная энтальпия воздуха при $p = 1 \text{ кгс/см}^2$ и $t = -35^\circ\text{C}$;

i'_3 – удельная энтальпия воздуха при $p = 200 \text{ кгс/см}^2$ и $t = -35^\circ\text{C}$.

Ожижаемую долю воздуха определяем по формуле:

$$y = \frac{(i'_1 - i'_3) - q_{ном}}{i'_1 - i'_0} = \frac{(63 - 8,8) \cdot 10^3}{(449 - 92) \cdot 10^3} = 0,153.$$

Для получения 50 кг/ч жидкого воздуха необходимо перерабатывать воздуха:

$$G = 50 / 0,153 = 327 \text{ кг/ч} .$$

Количество теплоты, передаваемой в аммиачном теплообменнике, определяем по формуле:

$$q_a = q' - q + y(i_1 - i_1') = 63 \cdot 10^3 - 36 \cdot 10^3 + 0,153 (510 - 449) \cdot 10^3 = 36 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} ,$$

где $q = 36 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ и $i_1 = 510 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$.

Определяем мощность на валу воздушного компрессора:

$$N = 1,69 G_c R T \ln \frac{p_2}{p_1} = 1,69 \frac{327}{3600} 287 \cdot 298 \cdot 2,3 \ln 200 = 69,5 \text{ кВт} .$$

Мощность, потребляемая аммиачным компрессором:

$$N_a = \frac{36 \cdot 327}{8540 \cdot 0,66} = 2,11 \text{ кВт} .$$

Здесь 8540 кДж/(кВт·ч) – теоретическая удельная холодопроизводительность аммиачной холодильной установки при температуре испарения аммиака -40°C ; 0,66 - принятый общий КПД аммиачного компрессора.

Общая расходуемая мощность:

$$N_p = 69,5 + 2,11 = 71,61 \text{ кВт} .$$

Удельный расход энергии на 1 кг жидкого воздуха:

$$N_{уд} = 71,61 / 50 = 1,43 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{кг} .$$

Задача 3. Определить ожижаемую долю и удельный расход энергии при получении жидкого воздуха по схеме с циркуляцией воздуха под давлением. Высокое давление воздуха 200 кгс/см^2 , среднее давление 50 кгс/см^2 . Температура воздуха при входе в теп-

лообменник 20°C. Доля воздуха, дросселируемого до низкого давления, $M=0,3$. Суммарные потери холода от недорекуперации и в окружающую среду составляют 10,5 кДж на 1 м³ воздуха (при нормальных условиях) высокого давления, поступающего в установку.

Решение. На рисунке 5.1.2 даны принципиальная схема установки с циркуляцией воздуха под давлением и изображение процесса в координатах Т-S. Для определения удельных энтальпий воспользуемся диаграммой Т-S для воздуха. Удельную холодопроизводительность цикла определяем по формуле:

$$q = (i_2 - i_3) + M(i_1 - i_2) = (494 - 467) \cdot 10^3 + 0,3(505 - 494) \cdot 10^3 = 30 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

Ожижаемую долю y определяем по уравнению:

$$y = \frac{(i_2 - i_3) + M(i_1 - i_2) - q_{nom}}{i_1 - i_0} = \frac{30 \cdot 10^3 - (10,5 \cdot 10^3 / 1,29)}{(505 - 92) \cdot 10^3} = 0,053 .$$

Мощность на валу компрессора определяем по формулам:

$$N' = 1,69 \frac{1}{3600} 287 \cdot 293 \cdot 2,3 \lg \frac{200}{50} = 54,5 \text{ кВт} ;$$

$$N'' = 1,69 \frac{0,3}{3600} 287 \cdot 293 \cdot 2,3 \lg \frac{50}{1} = 46,1 \text{ кВт} ;$$

$$N = (54,5 + 46,1) / 1000 = 0,1 \text{ кВт} .$$

Удельный расход энергии на 1 кг жидкого воздуха:

$$N_{уд} = 0,1 / 0,053 = 1,89 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{кг} .$$

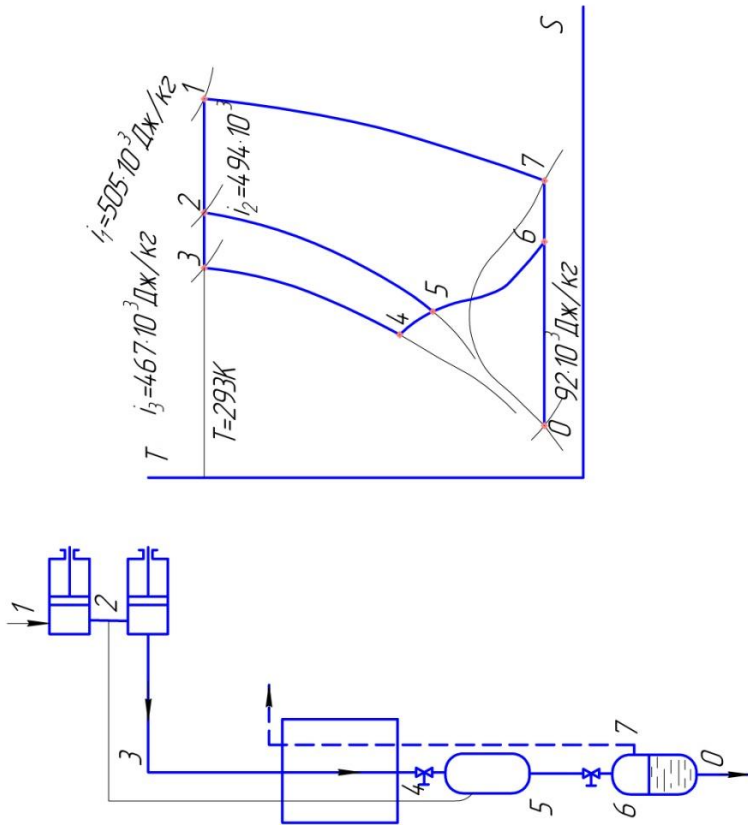


Рисунок 5.1.2.- Принципиальная схема установки с циркуляцией воздуха под давлением и изображение процесса в координатах T-S для примера решения задачи 3

5.2 Задачи для раздела

1. Определить сжижаемую долю воздуха и расход энергии на 1 кг жидкого воздуха в простом регенеративном цикле при начальной температуре воздуха 30°C и давлении сжатия $p_{\text{абс}}=200$ кгс/см². Общие потери холода 10,5 кДж на 1 кг перерабатываемого воздуха.

2. Определить расход энергии на 1 кг жидкого воздуха при дросселировании воздуха с 200 до 1 кгс/см² в цикле с предварительным аммиачным охлаждением до -50°C . Удельная холодопроизводительность аммиачной холодильной установки 4820 кДж на 1 кВт·ч. Потери холода от недорекуперации и в окружающую среду не учитывать. Начальная температура воздуха 15°C .

3. Определить ожижаемую долю воздуха и расход энергии на 1 кг жидкого воздуха в установке, работающей с циркуляцией воздуха под давлением. Давление сжатия $p_{\text{абс}}=200$ кгс/см²; промежуточное давление $p_{\text{абс}}=50$ кгс/см²; низкое давление 1 кгс/см²; $M=0,2$; начальная температура воздуха 25°C . Потери холода не учитывать.

4. Определить потребляемую мощность и количество жидкого воздуха, получаемого в цикле среднего давления с отдачей внешней работы, при переработке 300 м³/ч воздуха (при 0°C и 760 мм рт. ст.). Воздух сжимается до 40 кгс/см²; температура воздуха перед детандером -80°C ; температура воздуха после компрессора (перед входом в теплообменник) 30°C ; доля воздуха, направляемого в детандер 0,8. Определить также расход энергии на 1 кг жидкого воздуха. Общие потери холода принять в размере 11,5 кДж на 1 кг перерабатываемого воздуха.

5. Определить расход энергии на 1 кг жидкого воздуха в цикле высокого давления с отдачей внешней работы при сжатии воздуха до 200 кгс/см² и давлении после детандера 8 кгс/см²; $M=0,5$. Общие потери холода 14,7 кДж на 1 кг перерабатываемого воздуха. Начальная температура воздуха 30°C .

6. При испытании турбодетандера установлено, что воздух в нем расширяется от 4 до 1,2 кгс/см², причём от турбодетандера отводилась мощность в 4 кВт и через него проходило 650 кг/ч. Определить термодинамический КПД турбодетандера. Сжатый воздух поступал в турбодетандер при 114 К.

7. Определить расход энергии на 1 кг жидкого воздуха в цикле низкого давления с турбодетандером, если известно, что компрессором сжимается 6000 м³/ч воздуха (при нормальных условиях) до $p_{абс}=7$ кгс/см². Турбодетандер отдаёт мощность 55 кВт. Потери от недорекуперации и в окружающую среду составляют 6,3 кДж на 1 м³ сжимаемого воздуха (при нормальных условиях). Для компрессора изотермический КПД принять равным 0,7. Воздух поступает в установку при 35°C. В турбодетандер направляется 80% перерабатываемого воздуха. Коэффициент испарения $a=1,25$.

8. Сколько кубических метров воздуха необходимо переработать для получения 200 м³ кислорода 99% чистоты, если отборный азот содержит 10% кислорода?

9. По практическим данным, потери холода составляют 335 кДж с 1 м² наружной поверхности кожуха теплоизолирующего цилиндрического бака, заполненного жидким метаном. Внутренние размеры бака: $D=H=1,1$ м. Бак окружён со всех сторон изоляцией толщиной 300 мм. Определить время испарения всей жидкости, если вначале бак был залит полностью. Плотность жидкого метана 415 кг/м³.

10. Определить затрату энергии при получении 1 кг жидкого метана по простому регенеративному циклу. Метан сжимается до давления 150 кгс/см². Температура метана после компрессора 300 К.

11. Определить расход энергии при получении 1 кг жидкого метана в цикле с предварительным аммиачным охлаждением до -45°C при давлении сжатия метана 150 кгс/см². Удельная холодопроизводительность аммиачной холодильной установки 4820 кДж/(кВт·ч).

12. В установке для получения газообразного кислорода, работающей по циклу среднего давления с отдачей внешней работы, давление поступающего воздуха 20 кгс/см^2 . Недорекупация составляет 8°C , потери холода в окружающую среду $8,38 \text{ кДж}$ на 1 м^3 перерабатываемого воздуха. В детандере воздух расширяется от 20 кгс/см^2 (при 140 К) до 6 кгс/см^2 , к.п.д. детандера $0,65$. Определить долю воздуха, направляемого в детандер, пренебрегая эффектом дросселирования воздуха от 6 до 1 кгс/см^2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном пособии приведен обзор современных технологических решений, используемых при создании криогенных систем охлаждения. Для каждого из них описан рабочий процесс и принципы, на которых основана их работа, приведены конструктивные схемы, а также выявлены и обоснованы их преимущества и недостатки.

Для достижения необходимого уровня криогенного охлаждения и выполнения поставленной задачи был выбран жидкостный тип системы охлаждения. Данный вид криогенных систем является наиболее простым в исполнении, а это значит, что экспериментальная установка позволит достичь наиболее достоверных результатов по сравнению с прототипами, работающими по иным принципам.

Далее был выполнен теоретический расчет теплопритоков через наиболее уязвимые участки системы, которыми являются сосуд криостата и вакуумный трубопровод. Теоретические значения теплопритоков к ним составляют 2,74 Вт и 0,104 Вт соответственно. По полученным теоретическим данным произведена первоначальная оценка качества работы системы охлаждения.

В работе подробно рассмотрена и описана конструкция составляющих экспериментальной системы охлаждения: сосуда Дьюара, испарительной установки, криостата и блока управления системой. Представлены подробные чертежи, демонстрирующие внутреннее устройство агрегатов и каждый из их компонентов. Наряду с этим подробно разобран принцип работы системы, и благодаря каким агрегатам происходит работа испытываемой установки.

Следующим этапом работы стало экспериментальное исследование. Была пошагово рассмотрена подготовка к запуску установки и программа для ее запуска, управления и мониторинга параметров, изменяющихся во времени. Далее произведен запуск эксперимен-

тального образца и описан режим работы. Результатом эксперимента стали зависимости значений температур внутри криостата, полученные по показаниям термопар. Полученные в ходе эксперимента графические зависимости подтверждают реализацию процессов охлаждения в криостате до уровня 80 К. По результатам, полученным в ходе эксперимента, произведена оценка производительности системы в реальных условиях. Определена холодопроизводительность установки равная 34 Вт и расход жидкого азота для захлаживания объекта, который равняется 0,17 г/сек.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Криогенная испарительная установка



Рисунок А.1 – Внешний вид криогенной испарительной установки

Криостат



Рисунок А.2 – Внешний вид криостата

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Система проектирования КОМПАС 3Д

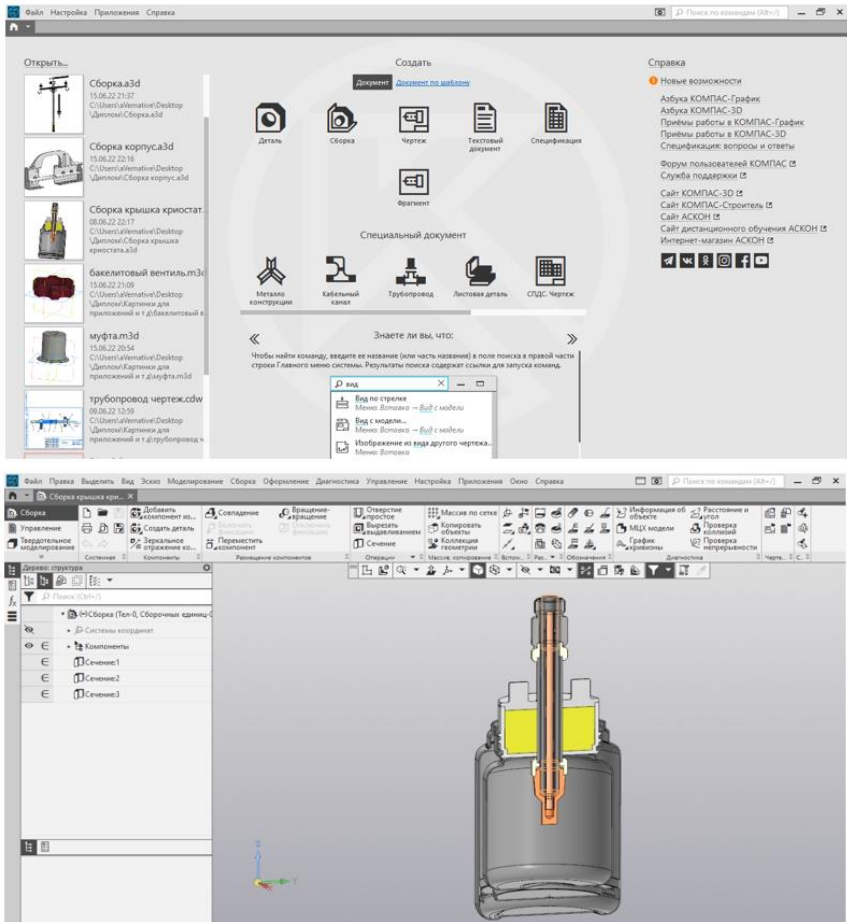


Рисунок Б.1 – Окно программы КОМПАС 3Д

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 – Удельная теплоемкость некоторых металлов при криогенном уровне температур

Название	Обозначение	Температура, К	Значение удельной теплоемкости $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \right]$
Свинец	Pb	80	117
Олово	Sn		187
Латунь	CuZn		370
Медь	Cu		259
Железо	Fe		216
Сталь	30X		358
Титан	Ti		540
Никель	Ni		423
Алюминий	Al		483

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Зависимости температур, полученные в результате эксперимента.

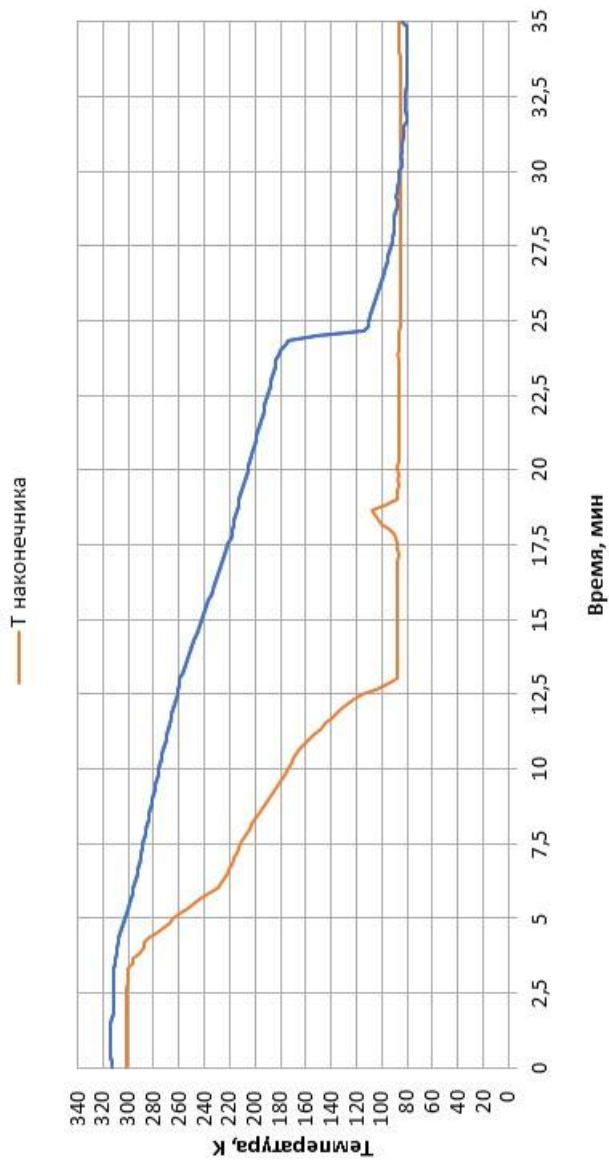


Рисунок Г.1 – Температурные зависимости

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица Д.1 – Свойства кислорода на линии насыщения

Температура (К)	Давление (МПа)	Жидкость			Газ		
		Удельный объем (м ³ /кг)	Сv (Дж/(г·К))	Ср (Дж/(г·К))	Удельный объем (м ³ /кг)	Сv (Дж/(г·К))	Ср (Дж/(г·К))
75.000	0.014547	0.00082380	0.99208	1.6788	1.3293	0.70356	0.97928
76.000	0.016969	0.00082697	0.98746	1.6791	1.1537	0.70226	0.97860
77.000	0.019708	0.00083017	0.98292	1.6795	1.0055	0.70072	0.97771
78.000	0.022792	0.00083341	0.97845	1.6801	0.87971	0.69896	0.97666
79.000	0.026253	0.00083669	0.97405	1.6808	0.77260	0.69704	0.97551
80.000	0.030123	0.00084001	0.96972	1.6816	0.68099	0.69500	0.97431
81.000	0.034436	0.00084337	0.96545	1.6825	0.60232	0.69287	0.97311
82.000	0.039226	0.00084676	0.96124	1.6836	0.53450	0.69069	0.97196
83.000	0.044530	0.00085020	0.95708	1.6849	0.47582	0.68851	0.97092
84.000	0.050385	0.00085369	0.95299	1.6863	0.42487	0.68636	0.97004
85.000	0.056831	0.00085721	0.94895	1.6880	0.38047	0.68427	0.96937
86.000	0.063906	0.00086079	0.94496	1.6897	0.34167	0.68227	0.96894

87.000	0.071653	0.00086441	0.94103	1.6917	0.30764	0.68041	0.96880
88.000	0.080114	0.00086808	0.93716	1.6939	0.27770	0.67868	0.96898
89.000	0.089331	0.00087180	0.93334	1.6963	0.25130	0.67714	0.96952
90.000	0.099350	0.00087558	0.92957	1.6989	0.22794	0.67578	0.97046
91.000	0.11022	0.00087941	0.92586	1.7016	0.20722	0.67463	0.97181
92.000	0.12197	0.00088329	0.92221	1.7047	0.18879	0.67370	0.97362
93.000	0.13467	0.00088724	0.91860	1.7079	0.17235	0.67301	0.97589
94.000	0.14836	0.00089124	0.91506	1.7114	0.15766	0.67256	0.97865
95.000	0.16308	0.00089531	0.91156	1.7151	0.14450	0.67236	0.98191

Таблица Д.2 - Свойства азота на линии насыщения

Температура (К)	Давление (МПа)	Жидкость				Газ		
		Удельный объем (м ³ /кг)	Сv (Дж/(г·К))	Ср (Дж/(г·К))	Удельный объем (м ³ /кг)	Сv (Дж/(г·К))	Ср (Дж/(г·К))	
75.000	0.076043	0.0012245	1.0981	2.0311	0.28245	0.76649	1.1080	
76.000	0.086102	0.0012312	1.0920	2.0353	0.25192	0.76845	1.1145	
77.000	0.097152	0.0012381	1.0861	2.0398	0.22539	0.77052	1.1214	
78.000	0.10926	0.0012451	1.0803	2.0447	0.20226	0.77268	1.1287	

79.000	0.12247	0.0012522	1.0747	2.0499	0.18200	0.77495	1.1366
80.000	0.13687	0.0012595	1.0691	2.0555	0.16422	0.77733	1.1449
81.000	0.15251	0.0012670	1.0636	2.0616	0.14855	0.77981	1.1539
82.000	0.16947	0.0012746	1.0583	2.0681	0.13470	0.78242	1.1633
83.000	0.18780	0.0012824	1.0530	2.0751	0.12243	0.78513	1.1735
84.000	0.20757	0.0012903	1.0479	2.0826	0.11152	0.78797	1.1842
85.000	0.22886	0.0012985	1.0429	2.0906	0.10179	0.79094	1.1957
86.000	0.25174	0.0013068	1.0380	2.0993	0.093096	0.79404	1.2079
87.000	0.27626	0.0013153	1.0332	2.1086	0.085305	0.79727	1.2210
88.000	0.30251	0.0013241	1.0286	2.1185	0.078307	0.80065	1.2349
89.000	0.33055	0.0013330	1.0240	2.1292	0.072005	0.80417	1.2497
90.000	0.36046	0.0013422	1.0196	2.1407	0.066317	0.80785	1.2655
91.000	0.39230	0.0013517	1.0154	2.1531	0.061172	0.81168	1.2824
92.000	0.42616	0.0013614	1.0112	2.1664	0.056509	0.81568	1.3005
93.000	0.46210	0.0013714	1.0072	2.1807	0.052272	0.81986	1.3198
94.000	0.50020	0.0013817	1.0033	2.1960	0.048416	0.82422	1.3406
95.000	0.54052	0.0013922	0.99956	2.2126	0.044900	0.82877	1.3628

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Грезин А. К., Зиновьев В. С. Микрокриогенная техника. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
- 2 Криогенные системы: учебник для студентов вузов по специальности «Техника и физика низких температур»: Основы проектирования аппаратов, установок и систем / А. М. Архаров, И. А. Архаров, В. П. Беляков [и др.]; под общ. ред. А. М. Архарова и А. И. Смородина – М.: Машиностроение, 1999. – 720 с.
- 3 Фастовский В. Г., Петровский Ю. В., Ровинский А. Е. Криогенная техника / Под ред. В. Г. Фастовского. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 496 с.
- 4 Филин Н. В., Буланов А. Б. Жидкостные криогенные системы. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 247 с.
- 5 Устройства для охлаждения приемников излучения / Е. И. Антонов, В. Е. Ильин, Е. А. Коленко, Ю. В. Петровский, А. И. Смирнов. – М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.
- 6 Справочник по физико-техническим основам криогеники / М. П. Малков, И. Б. Данилов, А. Г. Зельдович, А. Б. Фрадков; под ред. М. П. Малкова – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1985. – 432 с.
- 7 Баррон Р. Ф. Криогенные системы / Пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 408 с.
- 8 Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты: учебник / А. М. Архаров, И. А. Архаров, А. Н. Антонов [и др.]; под общ. ред. А. М. Архарова и И. К. Буткевича – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 582 с.
- 9 Основы теории, конструкции и эксплуатации космических ЯЭУ / А. А. Куландин, С. В. Тимашев, В. Д. Атамасов [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1987. – 328 с.

10 Куландин А. А., Тимашев С. В., Иванов В. П. Энергетические системы космических аппаратов / – М.: Машиностроение, 1972. – 428 с.

11 Аэрокосмические бортовые криогенные системы охлаждения [Электронный ресурс]: электрон. учебное пособие / А. И. Довгялло, С. О. Некрасова, Д. В. Сармин, А. А. Шиманов, А. Б. Цапкова, Д. А. Угланов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2013. – 137 с.

12 Автономные криорефрижераторы малой мощности / М. Ю. Боярский, А. Б. Грачев, Н. В. Калинин [и др.]; под ред. В. М. Бродянского. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.

13 Грачев А. Б., Калинин Н. В. Получение и использование низких температур. – М.: Энергоиздат, 1981. – 128 с.

14 Беляков В. П. Криогенная техника и технология. – М.: Энергоиздат, 1982. – 272 с.

15 Архаров А. М., Марфенина И. В., Микулин Е. И. Криогенные системы: учебник для студентов вузов по специальности «Техника и физика низких температур»: Основы теории и расчета. – 3-е изд., перераб. и доп – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.

16 Криогенные газовые машины / А. Д. Суслов, Г. А. Гороховский, В. Б. Полтараус, А. М. Горшков. – М.: Машиностроение, 1982. – 213 с.

Учебное издание

*Сармин Дмитрий Викторович,
Боровик Владислав Михайлович,
Шиманова Александра Борисовна,
Тремкина Ольга Витальевна,
Лопатин Алексей Леонидович,
Угланов Дмитрий Александрович,
Шиманов Артем Андреевич*

**КРИОГЕННАЯ ИСПАРИТЕЛЬНАЯ
СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ**

Учебное пособие

Редакционно-издательская обработка
издательства Самарского университета

Подписано в печать 23.11.2023. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 6,25.

Тираж 120 экз. (1-й з-д 1–27). Заказ № . Арт. – 23(Р2УП)/2023.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

