

МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

на правах рукописи

УДК 621.594

Порутчиков Артем Фролович

**РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХОЛОДИЛЬНЫХ
МАШИН НА ДВУОКСИ УГЛЕРОДА, РАБОТАЮЩИХ НА УРОВНЕ
ТЕМПЕРАТУР ОТ -80 ДО -120 °С**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Маринюк Борис Тимофеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Горбачев Станислав Прокофьевич

Официальные оппоненты: кандидат технических наук, доцент
Иньков Анатолий Павлович

Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
университет пищевых производств"

Защита состоится «28» марта 2018г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.16 при Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, Лефортовская набережная, д.1., корпус факультета «Энергомашиностроение», ауд. 314-Э (конференц зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по адресу: 107005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5 на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «___» _____201___ г.

Ученый секретарь

диссертационного Совета Д212.141.16,

кандидат технических наук, доцент

Колосов М.А

Введение

Актуальность работы:

Находясь в правовом пространстве Российской Федерации, принявшей на себя обязательства Венской конвенции, Монреальского протокола, Лондонской поправки, Парижского соглашения необходимо обеспечить прекращение использования озоноразрушающих хладонов, в том числе и поступающих из зон, не ратифицировавших данные соглашения. К 2020 году необходимо отказаться от веществ с высокими показателями парникового эффекта, а к 2030 распространенных сегодня смесевых хладагентов в пользу новых полностью экологических веществ.

Для умеренного холодоснабжения, разрабатываются новые искусственные рабочие вещества, такие как гидрофторолефины, при этом диапазон температур от -80°C до -120°C (от 193,15 К до 153,15 К), остается неохваченным экологичными рабочими веществами. Вместе с этим, возврат к природным рабочим веществам - уже состоявшаяся мировая тенденция. Как высокоэкологичный и безопасный, особое внимание заслуживает диоксид углерода и установки с использованием его, как холодильного агента.

Данные факторы приводят к переосмыслению принципов построения холодильных машин с учетом требований и допущений для конкретных технологических процессов.

Цель работы:

Разработка и исследование эффективности холодильных машин на диоксиде углерода, работающих на уровне температур от -80°C до -120°C .

Задачи работы:

- Создание экспериментальной вакуумно-сублимационной холодильной машины;
- Экспериментальное исследование характеристик холодильной машины, работающей по разомкнутому циклу на основе твердофазного хладагента - гранулированного CO_2 , использующей процесс сублимации для получения холода;
- Сопоставление энергоэффективности схем холодильных установок для получения низких температур на уровне -120°C ;

– Математическое описание динамики процесса охлаждения массы CO_2 за счет сублимации при вакуумной откачке паров. Математическое описание динамики процесса охлаждения массы CO_2 и погруженных в него термообрабатываемых деталей.

Научная новизна работы:

1. Получены экспериментальные данные по исследованию вакуумно-сублимационной холодильной машины для получения низких температур, работающая на твердом CO_2 .

2. На основе решения дифференциального уравнения теплового баланса, получены численные результаты для прогнозирования динамики охлаждения массы гранулированного диоксида углерода в процессе вакуумной откачки, также для случая совместного охлаждения термообрабатываемых объектов и рабочего вещества.

3. Экспериментально определен коэффициент теплоотдачи поверхности с гранулированным диоксидом углерода.

4. Предложены схемы вакуумно-сублимационных холодильных установок для получения низких температур в диапазоне от -80 до -120 °С. Некоторые схемы обладают признаками оригинальности, что подтверждается наличием патента на изобретение №2617039, также подана заявка на предполагаемое изобретение №2017114944.

На защиту выносятся:

1. Экспериментальные данные по динамике охлаждения массы диоксида углерода при вакуумировании, а также экспериментальные данные, полученные при термообработке тел сферической формы малого диаметра в среде гранулированного диоксида углерода, подверженного вакуумной откачке.

2. Выражения для прогнозирования динамики охлаждения массы гранулированного диоксида углерода в процессе вакуумной откачки. А также для случая совместного охлаждения термообрабатываемых объектов и рабочего вещества.

3. Результаты численного решения выражения для расчета времени охлаждения массы гранулированного диоксида углерода и при совместном охлаждении термообрабатываемых объектов и рабочего вещества.

4. Данные сравнения энергетической эффективности циклов низкотемпературных холодильных установок на уровень температур -120°C

Личный вклад соискателя

Постановка задачи охлаждения массы гранулированного диоксида углерода в процессе вакуумной откачки, а также задачи охлаждения объектов, подвергающихся обработке холодом.

Получение решений на основе выражений теплового баланса для прогнозирования динамики охлаждения диоксида углерода и объектов, подвергающихся охлаждению.

Создание экспериментальной вакуумно-сублимационной холодильной установки, работающей по разомкнутому циклу, осуществление опытов и получение экспериментальных данных.

Сопоставление результатов расчетов с данными, полученными в ходе экспериментов.

Достоверность полученных автором результатов

Для получения экспериментальных данных, были использованы общепризнанные способы измерения с помощью исправных приборов, это подтверждается заключениями отделов технического контроля заводов изготовителей, которыми снабжены измерительные приборы.

Все полученные в результате эксперимента данные могут быть повторно воспроизведены.

Практическая ценность:

1. Создана и экспериментально исследована вакуумно-сублимационная холодильная машина для получения низких температур, работающая на твердом CO_2 в качестве холодильного агента.

2. Проведен анализ процесса сублимации массы твердого диоксида углерода при вакуумной откачке. Получены соотношения для расчета времени охлаждения массы диоксида углерода.

3. Проведен анализ охлаждения объектов, сферической формы малого диаметра, в вакуумно-сублимационной холодильной машине открытого цикла.

4. Разработаны варианты схемных решений вакуумно-сублимационной холодильной машины.

Апробация работы:

Основные положения и результаты работы были представлены на 5 конференциях:

5. Международная конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 2015).

6. Всероссийская молодежная конференция «Научные инициативы и инновации для развития регионов России» (Москва, 2015).

7. Международная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (Саратов, 2015).

8. Школа молодых ученых «Развитие индустрии холода на современном этапе» (Москва, 2016).

9. Школа молодых ученых «Развитие индустрии холода на современном этапе» (Москва, 2017).

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 6 работ общим объемом 1,5 печатных листа, из них 3 в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, получен 1 патент на изобретение, опубликованы тезисы 2 докладов в сборниках трудов научно-практических конференций.

Структура и объем работы:

Диссертация включает в себя: введение, четыре главы, выводы, список литературы. Квалификационная работа изложена на 93 страницах текста, содержит 68 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 57 наименований.

Специальность, которой соответствует диссертация

В соответствии со сформулированной целью научной работы, ее научной новизной, установленной практической значимостью, диссертация соответствует паспорту специальности 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения, пункту 2 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения с целью углубления оценки проявляющихся в них физических закономерностей, создания надежных алгоритмов управления и прогноза»; пункту 3 «Развитие методов натурного и вычислительного моделирования процессов и объектов холодильной

и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения с целью поиска оптимальных решений по экономичности, надежности и ресурсу низкотемпературных установок, машин и аппаратов».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе описываются технологии, нуждающиеся в низкотемпературном холодоснабжении и современные низкотемпературные установки. Машиностроение, криохимические технологии и нанотехнологии, криообработка и хранение биоматериалов (органов и тканей), вместе с тем, при разработке холодильных установок, специализирующихся на работе в данном температурном диапазоне, возникают сложности, связанные с ужесточением экологических требований к рабочим веществам.

Во второй главе проводится моделирование охлаждения гранулированного твердофазного диоксида углерода в процессе откачки паров в вакууме, на основе уравнения теплового баланса в дифференциальной форме (1).

$$\begin{aligned} m_{\text{нач}} \cdot C_{CO_2} \cdot dT_{CO_2} &= L_{CO_2} \cdot dm \\ dm &= S_d \cdot \rho_{CO_2}'' \cdot d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{dT''}{dx} = 0 \text{ - условие равномерности температурного поля}$$

$$\tau = 0; T_{CO_2} = -78,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

где m_0 – начальная масса CO_2 ; C_{CO_2} – теплоемкость CO_2 ; L_{CO_2} – удельная теплота сублимации CO_2 ; dT_{CO_2} – мгновенное изменение температуры массы гранулированного диоксида углерода; $\rho_{CO_2}'' = \frac{P(T_{CO_2})}{R_{CO_2} \cdot T_{CO_2}}$ – плотность насыщенных паров сублимирующего при пониженном давлении диоксида углерода, S_d – действительная производительность вакуумного насоса; $d\tau$ – мгновенное изменение времени.

Для изменяющихся производительности насоса, удельной теплоемкости и теплоты сублимации диоксида углерода, были получены аппроксимирующие зависимости (2), (3)

$$C_{CO_2}(T_{CO_2}) = (1935 \cdot T_{CO_2})^{-\frac{16.552}{T_{CO_2}}} \quad (2)$$

$$L_{CO_2}(T_{CO_2}) = 483840 - 1230 \cdot T_{CO_2} + 2,08 \cdot 10^{-2} \cdot T_{CO_2}^3 \quad (3)$$

Для теплоемкости продукта, воспользуемся зависимостью (4)

$$C_{пр}(T_{пр}) = -1 \cdot 10^{-5} \cdot T_{пр}^2 + 0,336 \cdot T_{пр} + 428,26 \quad (4)$$

Производительность вакуумного насоса при условиях функционирования в составе вакуумно-сублимационной холодильной машины была определена экспериментально. Полученным в ходе эксперимента данным соответствует интерполяционная зависимость (5).

$$S_d = 0,0438 - 3,83 \cdot 10^{-6} \cdot T_{CO_2}^2 + 1,42 \cdot 10^{-8} \cdot T_{CO_2}^3 [\text{м}^3/\text{с}] \quad (5)$$

Для расчета текущей массы рабочего вещества, предлагается выражение (6).

$$m_{CO_2} = m_{0CO_2} \cdot e^{-\frac{C_{pCO_2}}{L_{CO_2}}(T_{0CO_2} - T_{CO_2})} \quad (6)$$

Результаты расчетов по предложенному выражению (2), а также данные эксперимента нанесены на график, (Рисунок 1). Экспериментально определенные точки укладываются в погрешность использованных для измерения массы весов, которая составляет 0,01 кг.

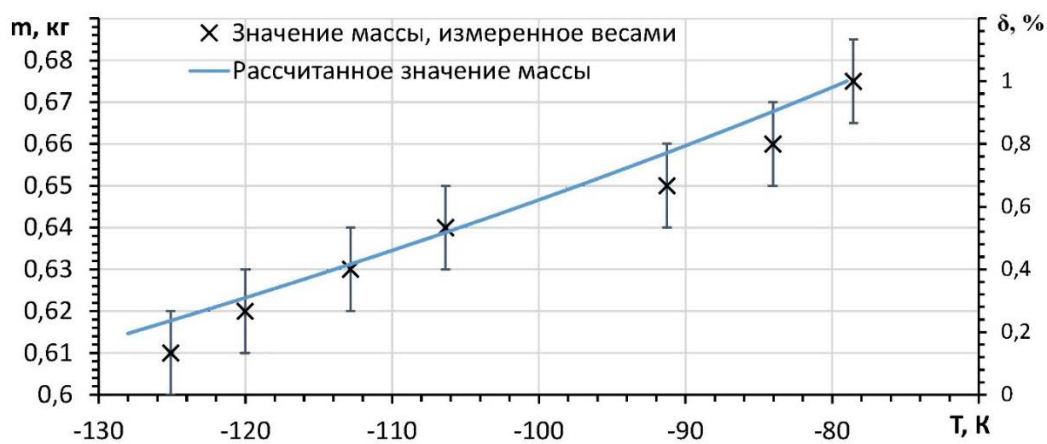


Рисунок 1. График зависимости изменения массы в процессе вакуумной откачки при $m_{0CO_2}=0,675$ кг

С учетом убыли массы, изменения теплофизических параметров в зависимости от температуры, и производительности вакуумного насоса, тепловой баланс принимает вид, выражение (7).

$$m_{0CO_2} \cdot e^{-\frac{C_{pCO_2}(T_{CO_2})}{L_{CO_2}(T_{CO_2})}(T_{0CO_2} - T_{CO_2})} \cdot C_{CO_2}(T_{CO_2}) \cdot dT_{CO_2} = \\ = S(T_{CO_2}) \cdot \frac{P(T_{CO_2})}{R_{CO_2} \cdot T_{CO_2}} \cdot L_{CO_2}(T_{CO_2}) \cdot d\tau \quad (7)$$

Численное решение выражения (7) относительно τ , дает время охлаждения твердого диоксида углерода до заданной температуры с учетом убыли массы от начального значения m_0 в процессе вакуумирования.

Графически, решение уравнения (7), представлено на Рисунке 2.

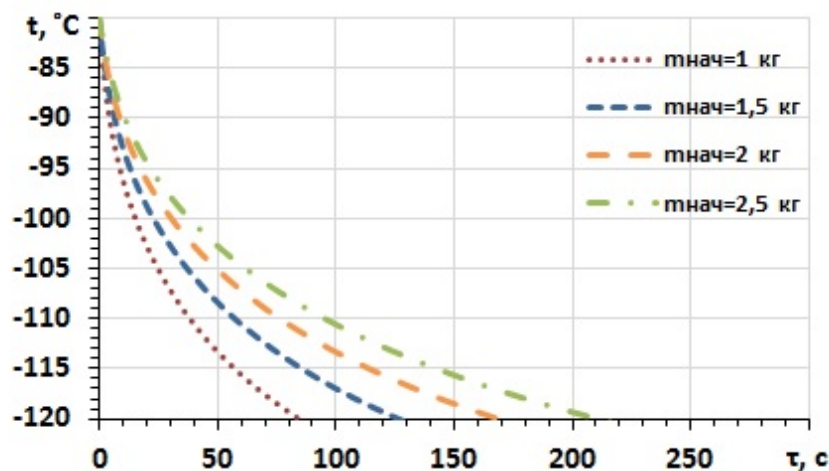


Рисунок 2. Графики изменения температуры твердой углекислоты во времени в процессе вакуумной откачки при различных начальных массах $m_{нач}$ полученные по уточненному выражению (7)

При проведении короткоцикловой низкотемпературной термообработки деталей машин таких как, малоразмерные лопатки турбин, кромки режущего инструмента, ответственные крепежные детали, возможно использование процесса сублимации в вакуумно-сублимационной холодильной машине, работающей по открытому циклу.

Для чисел Био $Bi < 0,1$, с достаточной точностью можно принять отсутствие температурного поля в охлаждаемом объекте, максимальный характерный размер при этом, для стальной детали, составит 0,02 м (8).

$$l = \frac{Bi \cdot \lambda_{ст}}{\alpha_{гр}} = 0,02 \text{ м} \quad (8)$$

где $\lambda_{ст} = 50 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; $\alpha_{гр} = 215 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ (далее, получен из эксперимента)

Для толщины пластины и диаметра шара до 20 мм, принимаем допущение о однородности температуры внутри тела $\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right) = 0$.

Запишем тепловой баланс системы диоксид углерода-продукт с начальными условиями

$$\begin{cases} m_{0CO_2} \cdot C_{CO_2} \cdot dT_{CO_2} + m_{пр} \cdot C_{пр} \cdot dT_{пр} = S_{F100} \cdot \frac{P''(T_{CO_2})}{T_{CO_2} \cdot R_{CO_2}} \cdot L_{CO_2} \cdot d\tau \\ \alpha \cdot F_{пр} \cdot (T_{пр} - T_{CO_2}) = m_{пр} \cdot C_{пр}(T_{пр}) \cdot \frac{dT_{пр}}{d\tau} \end{cases} \quad (9)$$

$$\tau = 0; T_{CO_2}^H = -78,5 \text{ } ^\circ\text{C}; T_{пр}^H = 20^\circ\text{C}$$

Дискретизируем дифференциалы в выражениях теплового баланса. С учетом начальных условий получим систему линейных уравнений (10).

$$\begin{cases} \tau_0 = 0 \text{ с} \\ T_{CO_2_0} = -78,5 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_{пр_0} = 20^\circ\text{C} \\ m_{CO_2_0} = m_{0CO_2} \text{ кг} \\ m_{пр} = m_{пр} \text{ кг} \\ F_{пр} = F_{пр} \text{ м}^2 \\ \alpha = \alpha \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \\ \alpha \cdot F_{пр} \cdot (T_{пр_i} - T_{CO_2_i}) = m_{пр} \cdot C_{пр} \cdot (T_{пр_{i+1}} - T_{пр_i}) \\ m_{0CO_2} \cdot C_{пр_{CO_2}}(T_{CO_2_i}) \cdot (T_{CO_2_{i+1}} - T_{CO_2_i}) + m_{пр} \cdot C_{пр} \cdot (T_{пр_{i+1}} - T_{пр_i}) \\ = S_d(T_{CO_2_i}) \cdot \rho''_{CO_2}(T_{CO_2_i}) \cdot L_{CO_2}(T_{CO_2_i}) \cdot (\tau_{i+1} - \tau_i) \\ m_{CO_2_{i+1}} = m_{CO_2_i} - S_d(T_{CO_2_i}) \cdot \rho''_{CO_2}(T_{CO_2_i}) \cdot (\tau_{i+1} - \tau_i) \end{cases} \quad (10)$$

Результаты расчета, в графическом виде, представлены на Рисунке 3.

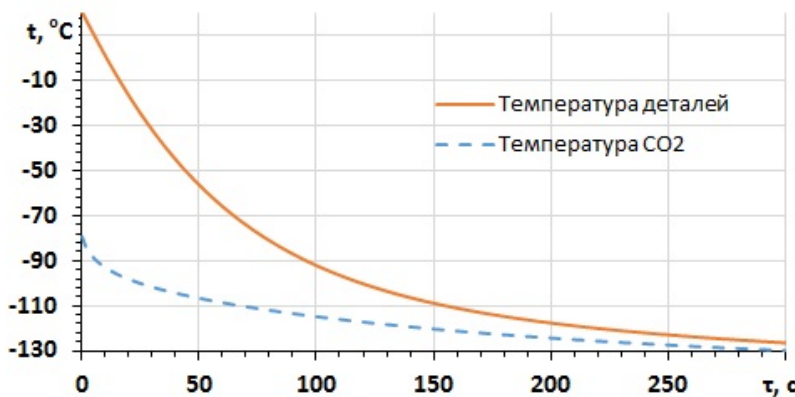


Рисунок 3. График изменения температуры диоксида углерода и металлических деталей при охлаждении в ходе вакуумной откачки при $m_0=1,3$ кг и $m_{пр}=0,25$ кг.

В третьей главе описывается экспериментальная вакуумно-сублимационная холодильная машина, созданная в ходе выполнения работы.

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на Рисунке 4.

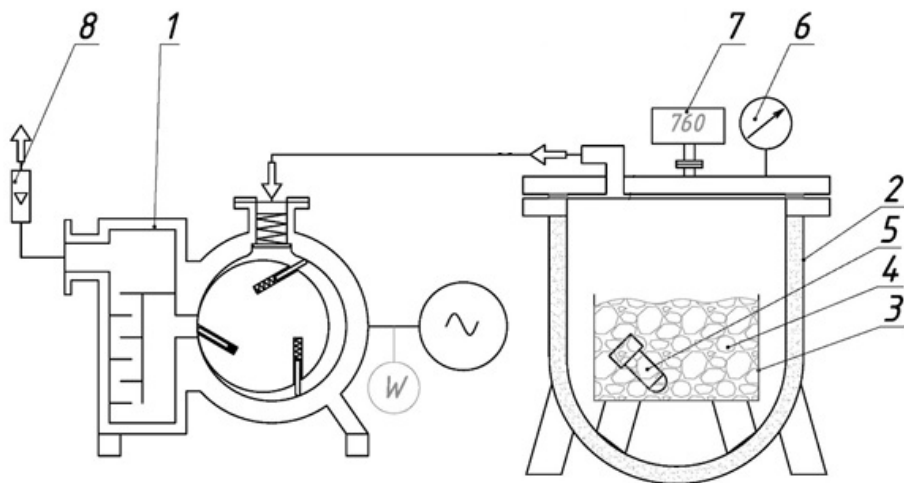


Рисунок 4. Вакуумно-сублимационная холодильная установка, работающая по разомкнутому циклу

1-одноступенчатый пластинчатый масляный вакуумный насос с системой маслоотделения; 2-гермобак с вакуумно-порошковой теплоизоляцией; 3-пластиковая кювета; 4-твердый диоксид углерода; 5-термометр сопротивления; 6-вакуумметр; 7- вакуумметрический преобразователь конвекционного типа; 8- ротаметр электронный; 9-вакуумопровод.



Рисунок 5. Общий вид экспериментальной установки

1 – Герморезервуар с вакуумно-порошковой теплоизоляцией; 2 – Вакуумметр конвекционный; 3 – Пластинчато-роторный вакуумный насос; 4 – Ротаметр газовый; 5 – Система электроснабжения и контроля параметров на базе измерителей Овен ТРМ138

В главе, приводится описание задействованного измерительного оборудования. Для измерения температуры массы твердого рабочего вещества использовались термометры сопротивления типа ТСП 100П, а также термопары типа Т (медь-константан).

Для контроля расхода откачиваемых из герморезервуара паров использовался электронный ротаметр, установленный на выхлопе из системы вакуумной откачки в атмосферу.

В качестве контрольно-измерительных и регистрирующих приборов для снятия характеристик с первичных преобразователей использовались измерители-регуляторы универсальные восьмиканальные модели ТРМ-138 производства фирмы «Овен» (ООО «Завод №423»).

Для охлаждения деталей машин, в установке разомкнутого цикла, в качестве рабочего вещества выбран гранулированный диоксид углерода с диаметром гранул 8 мм и длиной от 10 до 30 мм. Плотность гранул, использованного для экспериментов диоксида углерода, составила около 1400 кг/м^3 , плотность твердой фазы при атмосферном давлении составляет 1562 кг/м^3 , пористость гранул находится на уровне 10 %. Плотность гранулированной массы составила 860 кг/м^3 , при этом пористость составит около 45 %.

Измерение коэффициента теплоотдачи к поверхности производилось по схеме, представленной на Рисунке 6.

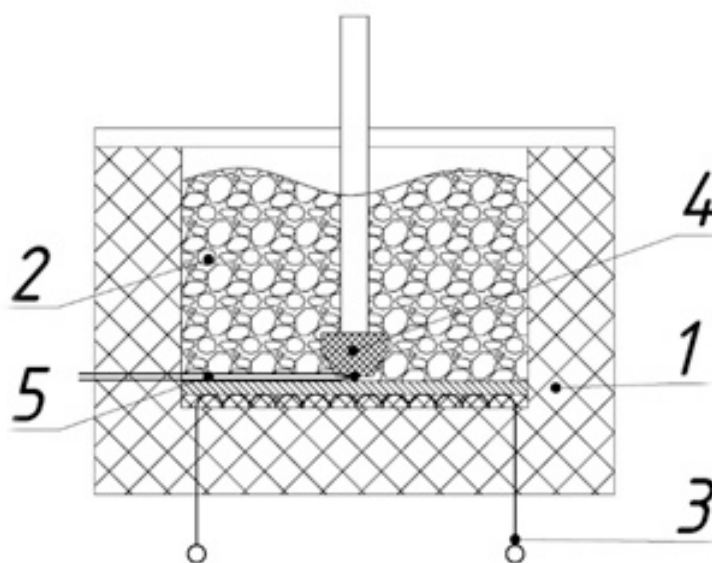


Рисунок 6. Схема прибора для определения коэффициента теплоотдачи от гранулированного CO_2

1 – теплоизоляционный контейнер; 2 – гранулированный диоксид углерода;

3 – управляемый нагревательный элемент; 4-фиксатор термопары с наконечником из теплоизоляционного материала 5 – термopapa медь-константан;

Коэффициент теплоотдачи найдем из закона Ньютона-Рихмана (11).

$$\alpha_{CO_2} = \frac{q_{\text{нагр}}}{F \cdot (t_{\text{пов}} - t_{CO_2})} \quad (11)$$

где $q_{\text{нагр}}$ – тепловой поток поступающий от нагревателя, Вт; $t_{\text{пов}}$ – температура поверхности нагревателя со стороны сублимирующего CO_2 , измеренная термопарой, °С; t_{CO_2} – температура насыщения диоксида углерода при атмосферном давлении, °С; F – поверхность теплообмена, м²



Рисунок 7. Экспериментальный стенд для определения коэффициента теплоотдачи от гранулированного диоксида углерода

слева – общий вид стенда, справа – теплоизолированная емкость с нагревателем наполненная диоксидом углерода

Определим тепловой поток, создаваемый электрическим нагревателем по выражению (12).

$$q_{\text{нагр}} = U_{\text{нагр}} \cdot I_{\text{нагр}}, [\text{Вт}] \quad (12)$$

где $U_{\text{нагр}}$ – величина постоянного напряжения подаваемого на нагреватель, В; I – постоянный ток протекающий через нагреватель, А

Для эксперимента, показанного на Рисунке 7, тепловой поток от нагревателя составил 59,85 Вт, коэффициент теплоотдачи вычислим по

$$\alpha_{CO_2} = \frac{59,85}{0,0095 \cdot (-53,3 + 78,5)} = 250 \text{ Вт/м}^2 \quad (13)$$

Серией экспериментов был установлен коэффициент теплоотдачи от гранулированного диоксида углерода равный $\alpha_{CO_2} = (215 \pm 19) \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, с вероятностью 0,95. Для дальнейших расчетов используем величину математического ожидания α_{CO_2} равную $215 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

В ходе экспериментов по охлаждению диоксида углерода, при вакуумной откачке было установлено, что важным влияющим на процесс фактором, является производительность вакуумного насоса, действительная производительность была установлена экспериментально, измеренный на уровне давления окружающей среды расход был приведен к расходу при давлении на уровне насыщения.

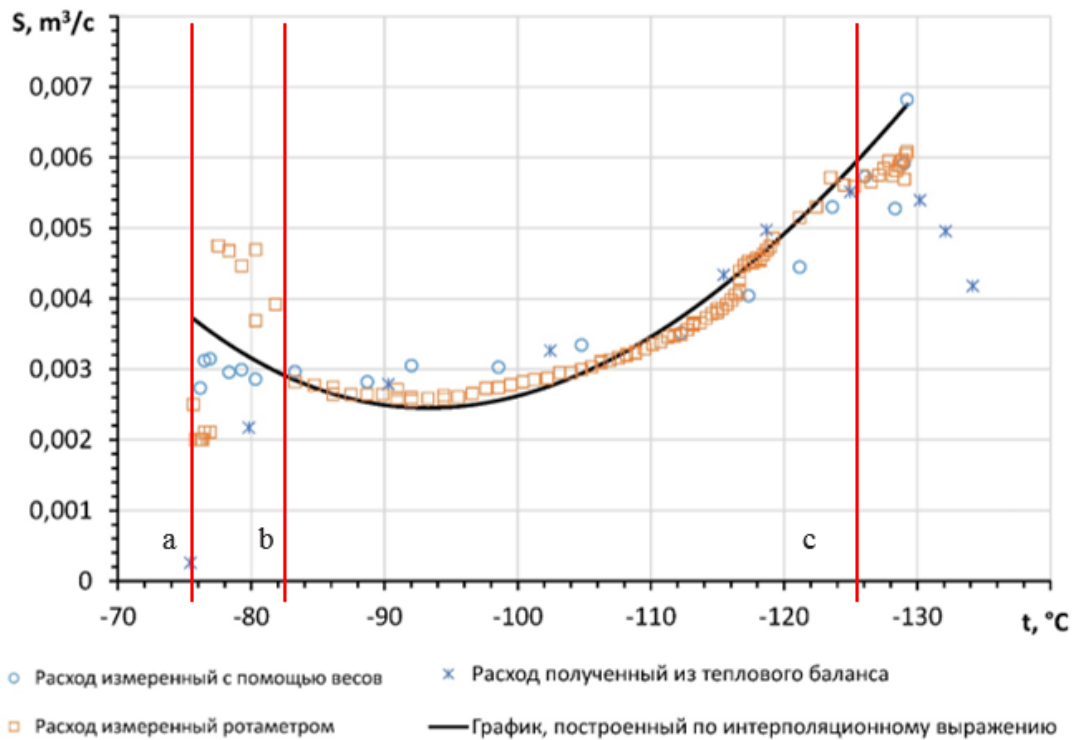


Рисунок 8. График действительной производительности вакуумного насоса в зависимости от температуры диоксида углерода
a-b – начальный участок, b-c – рабочий участок

Полученная из экспериментов интерполяционная зависимость, использованная для расчетов, выглядит следующим образом.

$$S_d = 0,0438 - 3,83 \cdot 10^{-6} \cdot T_{CO_2}^2 + 1,42 \cdot 10^{-8} \cdot T_{CO_2}^3 [\text{м}^3/\text{с}] \quad (14)$$

Графическое сопоставление расчетных значений и экспериментальных данных приведено на Рисунке 9.

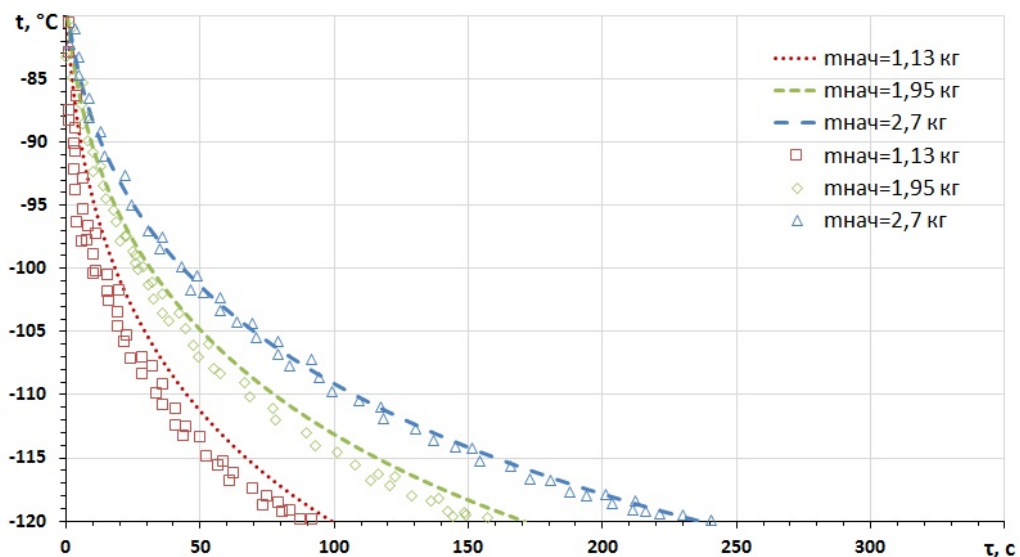


Рисунок 9. График зависимости температуры массы от времени вакуумирования при различных начальных массах $m_{\text{нач}}$

Как видно из графиков в диапазоне температур от $-78,5^\circ\text{C}$ ($194,5\text{ K}$) до -120°C (143 K) относительное расхождение значений температуры рассчитанной по предложенному выражению теплового баланса и полученных экспериментально

укладывается в погрешность измерительной системы и составляет не более 5%, что позволяет сделать вывод о применимости модели для расчета времени охлаждения массы диоксида углерода при вакуумной откачке паров.

Сопоставление численного расчета охлаждения деталей, погруженных в гранулированный диоксид углерода приведены на Рисунке 10.

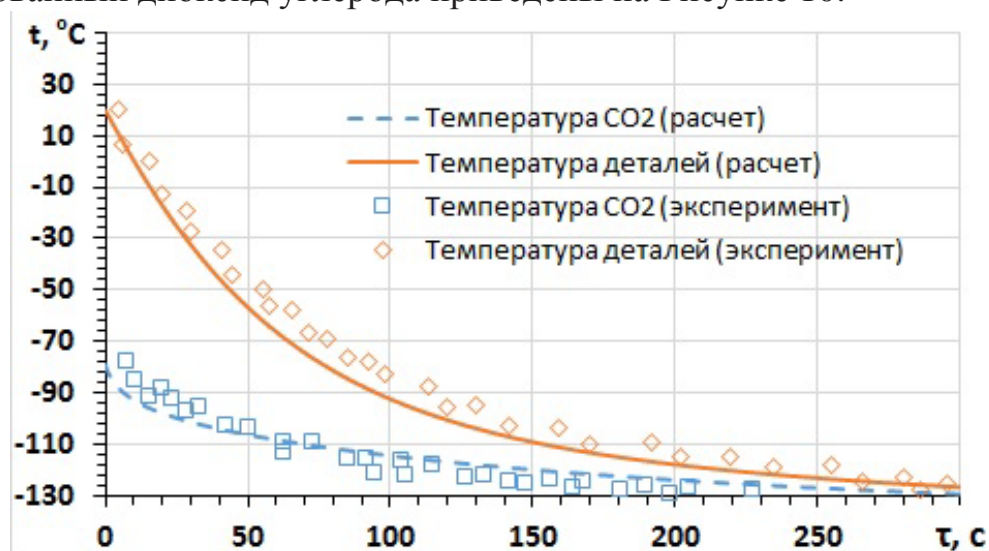


Рисунок 10. График зависимости температуры массы CO₂ и деталей от времени вакуумирования при начальной массе CO₂ 1,27 кг, массе деталей сферической формы 0,25 кг

Результаты расчетов и экспериментов по определению энергетических характеристик экспериментальной вакуумно-сублимационной холодильной установки представлены на Рисунке 11.

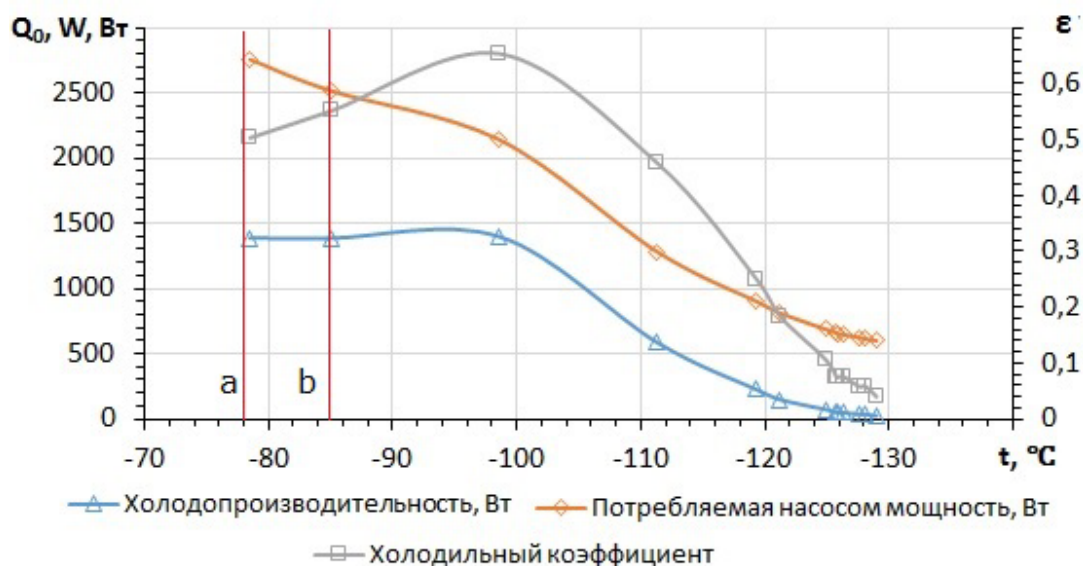


Рисунок 11. Холодопроизводительность, потребляемая мощность и холодильный коэффициент вакуумно-сублимационной холодильной машины на базе пластинчато-роторного масляного насоса Busch F100, работающей по разомкнутому циклу
a-b – начальный участок (откачка воздуха)

Холодопроизводительность исследованной установки, на уровне температур составила 177,5 Вт, при этом потребляемая мощность из сети 845 Вт, соответственно холодильный коэффициент составил 0,21.

В четвертой главе предлагаются и анализируются схемные решения низкотемпературных холодильных установок с сублимацией диоксида углерода.

Предложена схема вакуумно-сублимационной холодильной машины с двумя параллельными детандерами представлена на Рисунке 12.

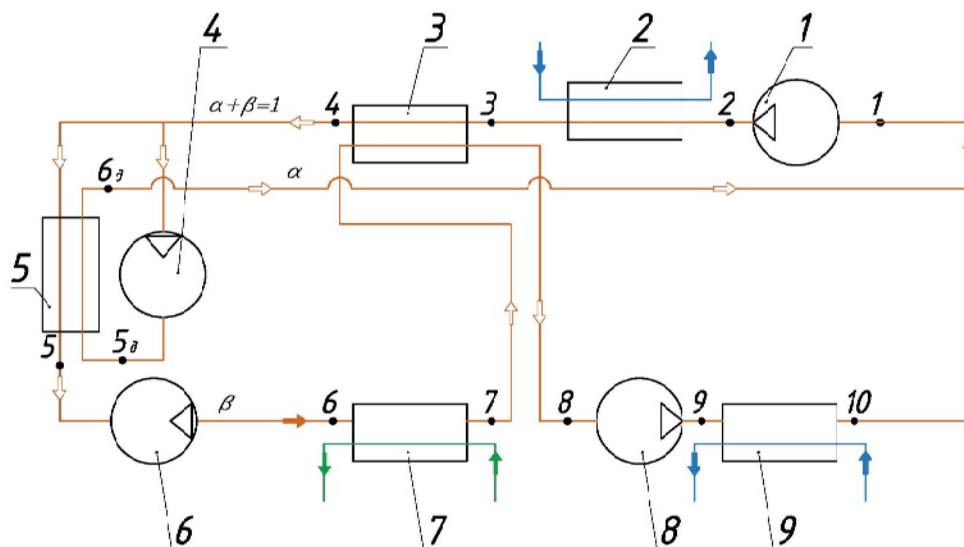


Рисунок 12. Принципиальная схема вакуумно-сублимационной установки с двумя детандерами

1-компрессор; 2,9-холодильники; 3-рекуперативный теплообменник; 4-детандер предохладителя; 5-теплообменник предохладителя; 6-детандер основного потока; 7-теплообменник-сублиматор реализующий тепловую нагрузку.

На данную холодильную машину получен патент № 2617039.

Холодильные коэффициенты для рассмотренных схем, приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Сравнительная таблица холодильных коэффициентов рассмотренных циклов, экологически безопасных низкотемпературных холодильных установок, работающих на уровне температур -120 °С

Четырехступенчатая схема с неполным промежуточным охлаждением на диоксиде углерода	0,32
Вакуумно-сублимационная холодильная машина с двумя параллельными детандерами	0,14
Трехкаскадная холодильная установка с сублимацией диоксида углерода	0,19
Трехкаскадная холодильная установка на углеводородах	0,21

Основные выводы и результаты

1. С помощью выражения теплового баланса примененного к процессу сублимации диоксида углерода при вакуумной откачке, получены аналитическое и численное решение для нахождения времени достижения заданной температуры в диапазоне от -80 до -120 °С. Получено численное решение для тел (при $Bi < 0,1$), подвергающихся низкотемпературной термообработке в гранулированном диоксиде углерода.

2. Экспериментально исследован процесс охлаждения массы CO_2 в вакуумно-сублимационной холодильной установке на основе твердофазного хладагента - гранулированного CO_2 , работающей по разомкнутому циклу. Исследован процесс охлаждения сферических тел диаметром 8 мм, подвергающихся термообработке в гранулированном диоксиде углерода, выполнено сопоставление расчетных данных и данных эксперимента по изменению температуры рабочего вещества и погруженных в него тел.

Получен коэффициент теплоотдачи при теплообмене с гранулированным диоксидом углерода.

3. Предложены оригинальные схемные решения холодильных установок для получения низких температур. Получен патент на изобретение №2617039, подана заявка на предполагаемое изобретение № 2017114944. Выполнено расчетное сопоставление их энергоэффективности (по холодильному коэффициенту) на уровне температур -120°С.

Публикации по теме диссертации:

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. Порутчиков А.Ф., Маринюк Б.Т., Никиткина Г.В. Анализ методов получения околосублимационных температур // Холодильная техника. №4. Москва, 2015. С. 34 - 37. (0,25 п.л. /0,2 п.л.)

2. Порутчиков А.Ф., Крысанов К. С., Шарапов Н.В. Выбор хладагента для низкотемпературных рефрижераторов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. №12. Москва, 2016. С. 38 - 40. (0,2 п.л. /0,19 п.л.).

3. Порутчиков А.Ф., Маринюк Б.Т. Динамика охлаждения рабочего вещества в вакуумно-сублимационной холодильной установке // Холодильная техника. №6.

Москва, 2017. С. 28 - 30. (0,2 п.л. /0,15 п.л.).

4. Порутчиков А.Ф., Маринюк Б.Т., Чухлебов Л.Е. Низкотемпературная холодильная машина // выдан патент №2617039. М.: 2015 (0,5 п.л. /0,4 п.л.).

5. Порутчиков А.Ф., Маринюк Б.Т. Ваккуумно-сублимационная холодильная установка для получения низкотемпературного хладоносителя // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: Сб. тез. Межд. Конф. СПб: Университет ИТМО, 17-20 ноября 2015. С. 51 - 53. (0,2 п.л. /0,15 п.л.)

6. Порутчиков А.Ф., Маринюк Б.Т. Описание процесса динамики вакуумного охлаждения твердого диоксида углерода // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тез. Межд. Конф. Саратов: Саратов гос. Техн. ун-т, 2015. С. 139 - 140. (0,5 п.л. /0,4 п.л.)