

На правах рукописи

Лукьянов Павел Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКОНТУРНОЙ
КАСКАДНОЙ УСТАНОВКИ С ВИХРЕВОЙ ТРУБОЙ ДЛЯ
ОХЛАЖДЕНИЯ БИОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ -70°C**

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



Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2004

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Архаров И.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Чижиков Ю.В.

кандидат технических наук
Савельев Е.Г.

Ведущее предприятие: Холдинг «Холодмаш»


Защита диссертации состоится «23» июня 2004 г.
в 12 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.141.16 при
Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана
по адресу: 107005, Москва, Лефортовская набережная, д.1., корпус
факультета «Энергомашиностроение»

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан «21» мая 2004 г.

Желающие присутствовать на защите должны заблаговременно
известить Совет письмами заинтересованных организаций на имя
председателя Совета.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д.212.141.16
кандидат технических наук

 Глухов С.Д.

2006-4
4832

2137794

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ Длительное сохранение жизнеспособности биоматериалов (органов, тканей, крови, спермы и т.д.) в настоящее время возможно только при низких температурах. В больших хранилищах биоматериалов применяется жидкоазотное оборудование. При таком решении обеспечивается стабильный уровень температур хранения биоматериалов, а материальные затраты на обслуживание таких установок связаны только с необходимостью регулярного пополнения запасов жидкого азота. В случае небольших хранилищ использование азотного оборудования становится менее выгодным. В основном это связано с тем, что при потребности в замораживании и хранении небольших количеств биоматериала, используемые азотные установки имеют небольшие размеры (сосуды Дьюара 2-80 литров) и для пополнения уровня азота требуется дополнительная установка большого хранилища азота (5-10м³) или регулярное приобретение небольших объемов жидкого азота у его производителей. В районах, удаленных от воздухоразделительных заводов, проблема обеспечения жидким азотом становится наиболее острой. Для решения задачи хранения биоматериалов в местах, удаленных от производителей азота, а также в небольших лабораториях, медицинских учреждениях, применяются автономные электрорефрижераторы. В основном, это установки, работающие по смесевому циклу Клименко или двух-трех каскадные фреоновые установки. Однако, установки, работающие по циклу Клименко, имеют в своем составе полугерметичный компрессор, что приводит к появлению утечек рабочей смеси и потребности в периодической ее перезарядке сервисной организацией. В состав каскадных установок входит два-три компрессора, что снижает надежность этих систем. При этом оба типа фреоновых установок имеют высокую удельную стоимость на единицу хранения биоматериала и низкую термодинамическую эффективность.

Актуальность создания новой компактной, автономной, менее дорогой установки охлаждения для небольших хранилищ биоматериалов определяется перечисленными недостатками существующих фреоновых и азотных систем. Основными требованиями, предъявляемыми к разрабатываемой установке хранения биоматериалов, являются простота в обслуживании, надежность, компактность, невысокая стоимость и большой ресурс работы. Газодинамические аппараты, работающие по разомкнутому воздушному циклу наиболее полно отвечают этим требованиям, при этом обеспечивая требуемые скорости охлаждения и равномерное поле температур охлаждаемого биоматериала.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ Разработка и исследование двухконтурной каскадной системы с вихревой трубой для охлаждения и хранения биологических материалов при температуре -100°C

ТЕМАТИЧЕСКАЯ
БИБЛИОГРАФИЯ
1986 г.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

- Аналитическая оценка возможности разработки рефрижератора для систем криоконсервирования с вихревой трубой Ранка-Хилша.
- Анализ возможных схем рефрижераторов с вихревой трубой для систем криоконсервирования
- Исследование теоретических и экспериментальных термодинамических характеристик малоразмерной вихревой трубы в диапазоне температур входящего потока $+30 \dots -40^\circ\text{C}$.
- Исследование зависимости эффективности теоретического (расчётного) и действительного (экспериментального) циклов холодильной системы от режима работы вихревой трубы.
- Разработка и изготовление прототипа двухконтурной каскадной установки, включающей серийно выпускаемые герметичный фреоновый и безмасляный воздушный компрессоры, а также серийно выпускаемую вихревую трубу.
- Экспериментальные исследования работы прототипа двухконтурной каскадной холодильной установки.
- Экспериментальная оценка возможности использования экспериментальной установки для систем хранения биоматериалов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

- Предложена новая область применения вихревых труб
- Разработана новая схема холодильной установки с вихревой трубой низкого давления (до 1МПа)
- Аналитически и экспериментально получены новые термодинамические характеристики малоразмерной вихревой трубы в диапазоне температур на входе $+30^\circ\text{C} \dots -40^\circ\text{C}$
- Установлена независимость температурной эффективности вихревой трубы от уровня температур сжатого воздуха
- Получены экспериментальные зависимости холодопроизводительности, холодильного коэффициента установки от режимов работы вихревой трубы (температурный уровень, доля холодного потока)

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

- Создана экспериментальная двухконтурная каскадная система охлаждения с вихревой трубы и получены ее термодинамические характеристики
- Экспериментально определен диапазон работы вихревой трубы, обеспечивающий требуемую холодопроизводительность на заданном температурном уровне
- Предложена методика разработки систем хранения биоматериалов на базе промышленно выпускаемого оборудования

РАЗРАБОТАНЫ РЕКОМЕНДАЦИИ

- По определению режимов работы вихревой трубы, обеспечивающих требуемую холодопроизводительность процессов охлаждения и хранения биоматериалов.
- По разработке промышленных установок охлаждения и хранения биоматериалов с температурой термостатирования -70°C .

РЕКОМЕНДАЦИИ К ВНЕДРЕНИЮ

- Экспериментальная, опытная холодильная установка рекомендована к внедрению в процесс криоконсервирования биологических материалов в Городском научно-методическом центре по диагностике и профилактике болезней человека и животных г. Москвы.
- Созданный экспериментальный стенд задействован в учебном процессе кафедры Э-4 МГТУ им. Н.Э.Баумана для изучения термодинамических характеристик вихревых труб.

ДОСТОВЕРНОСТЬ И ОБОСНОВАННОСТЬ полученных данных обеспечивалась применением аттестованных измерительных средств и апробированных методик измерения, хорошей повторяемостью полученных результатов измерений параметров холодильной установки.

НА ЗАЩИТУ ВЫПОСЯТСЯ

- результаты аналитических и экспериментальных исследований, подтверждающие возможность создания охладителей биологических материалов на основе серийно выпускаемых герметичного фреонового компрессора, безмасляного воздушного компрессора и вихревой трубы, работающей при давлении до 1 МПа.
- методика построения теоретических характеристик вихревой трубы в неисследованном диапазоне температур при её известных характеристиках в области положительных температур.
- рекомендации по разработке систем охлаждения биоматериалов на базе серийно выпускаемых вихревых труб и серийно выпускаемого компрессорного оборудования

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

- международной конференции «Cryogenics 2002», Прага, 2002.
- 21 Международный конгресс по холоду, Вашингтон, 2003
- международной конференции «Cryogenics 2004», Прага, 2004.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА заключается в проведении теоретических и экспериментальных исследований, в разработке и исследовании опытной модели новой установки охлаждения биоматериалов.

ПУБЛИКАЦИИ По теме диссертационной работы опубликовано 4 печатные работы.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов, списка литературы из 101 наименования и содержит 136 стр. основного текста, 32 рис., 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрены проблемы существующих холодильных установок для небольших систем хранения биоматериалов. Сформулированы цель и задачи исследования. Обоснована актуальность работы, показана её научная и практическая значимость. Кратко изложены основные результаты, полученные автором.

1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Проанализированы существующие методы криоконсервирования биологических материалов, выявлена специфика используемых систем криоконсервирования. Определены основные технические требования к холодильным установкам для систем криоконсервирования. Проведён сравнительный анализ технических показателей и эксплуатационных характеристик существующих зарубежных и отечественных холодильных установок криоконсервирования. Выявлена неэкономичность использования установок, работающих на жидком азоте, в случае потребности хранения малых количеств биоматериала. Определены преимущества и недостатки существующих фреоновых (каскадных и смесевых) установок. Отмечена необходимость периодического техобслуживания смесевых установок, связанная с утечками хладагента. Отмечена низкая термодинамическая эффективность существующих фреоновых установок и их высокая стоимость.

Предложено использование разомкнутого воздушного цикла для систем криоконсервирования. Указано, что обдув биоматериалов потоком холодного воздуха может обеспечить более равномерное изменение температуры по всему объёму биоматериала и более высокие скорости охлаждения. Сделан вывод о возможности создания системы хранения биоматериалов на основе двухконтурной каскадной установки с замкнутым фреоновым контуром и разомкнутым воздушным контуром с вихревой трубой.

Приведены особенности процесса расширения в вихревой трубе и выделены основные параметры, определяющие эффективность вихревых труб (температурный уровень начала процесса расширения, абсолютный размер вихревой трубы, степень расширения, влагосодержание сжатого воздуха). Рассмотрено применение вихревых аппаратов в системах охлаждения, термостатирования и в других областях. Сформулированы основные задачи.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТРУБ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ БИОМАТЕРИАЛОВ

Выбор схемы установки

Рассмотрены особенности и преимущества охлаждения биоматериалов в потоке воздуха. Приведено обоснование целесообразности применения двухконтурной каскадной холодильной установки с вихревой трубой. Первый контур установки – фреоновый с герметичным компрессором, второй контур – разомкнутый воздушный с безмасляным компрессором и вихревой трубой. Общая схема установки приведена на рис.1. Предложенная установка теоретически позволит получить на входе в вихревую трубу любую температуру из диапазона +20...–40°С. При этом температура холодного потока будет составлять –20...–70°С.

Теоретическое исследование работы вихревой трубы в области температур ниже температуры окружающей среды

Проанализировано влияние геометрических размеров, конфигурации и конструктивных особенностей соплового аппарата на газодинамическую стабильность работы вихревой трубы при низких температурах. Сделано предположение о стабильности работы вихревой трубы в диапазоне температур на входе +20... –40°С при неизменной геометрии соплового аппарата. Проведено теоретическое исследование влияния степени расширения и влагосодержания на эффективность процесса вихревого разделения. Сделаны выводы о необходимости создания максимально возможной степени расширения и о необходимости подавать на вход в трубу воздух с точкой росы не выше –70°С.

Для оценки влияния температуры сжатого воздуха на эффективность процесса расширения в трубе использовалось сделанное ранее некоторыми авторами заключение о независимости температурной эффективности вихревой трубы от начальной температуры расширения:

$$\eta_T = \Delta T_X / \Delta T_S - idem \Big|_{T_{oc}}^{T_X} \quad (1)$$

где η_T – температурная эффективность

$\Delta T_X = (T_1 - T_X)$ – перепад температур на холодном конце вихревой трубы

T_1 – температура сжатого воздуха на входе в вихревую трубу

T_X – температура холодного потока на выходе из вихревой трубы

T_{oc} – температура окружающей среды

ΔT_S – перепад температур при изэнтропном расширении воздуха из точки с температурой T_1 и давлением p_1 до давления холодного потока p_X . Величина изэнтропного перепада определяется по формуле Пуассона:

$$\Delta T_S = T_1 \cdot \left(1 - \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} \right) \quad (2)$$

где k – показатель адиабаты.

ε – степень расширения

Уравнение (1) справедливо в области состояний газа, описываемых уравнением Клайперона-Менделеева. График зависимости температурной эффективности вихревой трубы от доли холодного потока представлен на рис.2 Этот график был получен в результате пересчёта номинальной характеристики вихревой трубы $\Delta T_X(\mu)$. Номинальная характеристика данной вихревой трубы гарантируется фирмой-изготовителем при использовании сжатого воздуха с температурой +20..+30°C. Нашей дальнейшей задачей было прогнозирование характеристик вихревой трубы в неисследованной области температур сжатого воздуха +20..-40°C.

Методика прогнозирования параметров вихревых труб в области низких температур на основании интерполяции опытных данных

Разработанная методика расчёта позволяет выбирать режимы работы вихревой трубы Ранка-Хилша, при работе на которых холодильная установка сможет обеспечивать требуемый скоростной режим охлаждения и температурный уровень хранения.

Для нового значения температуры T_1 определяется соответствующее значение изэнтропного перепада $\Delta T_S(T_1)$ по формуле (2). Определяется перепад температуры холодного потока при новом значении температуры T_1 .

$$\Delta T_X(\mu, T_1) = \eta_T(\mu) \cdot \Delta T_S(T_1) \quad (3)$$

Определяется температура на холодном конце вихревой трубы:

$$T_X(\mu, T_1) = T_1 - \Delta T_X(\mu, T_1) \quad (4)$$

Таким образом мы можем заранее определить значение температуры T_1 , при котором температура холодного потока T_X достигнет требуемого в системах хранения биоматериалов значения $-70..-80^\circ\text{C}$. Сравнения теоретических кривых $T_X(\mu, T_1)$ с результатами последующих экспериментальных исследований представлены на рис.3 (для температур сжатого воздуха -30°C и -40°C).

Методика расчета холодопроизводительности каскадов

Задаётся требуемый уровень температуры охлаждения. Определяется необходимая холодопроизводительность:

$$Q_X = C_P \cdot m \cdot V_{\text{ОХЛ}} \quad (5)$$

где m – масса биоматериала, кг

C_P – теплоёмкость биоматериала, кДж/кг*К

$V_{\text{ОХЛ}}$ – требуемая скорость охлаждения биоматериалов, К/с

Для каждого значения температуры T_1 строится график $T_X(\mu, T_1)$ и график зависимости полезной холодопроизводительности установки:

$$Q_{\text{УСТ}i} = \mu_i \cdot G_1 \cdot C_{\text{РВ}} \cdot (T_{\text{СР}} - T_X) \quad (6)$$

где $T_{\text{СР}} = \frac{T_{\text{ОС}} + T_X}{2}$ – средняя температура холодного потока на выходе из термокамеры

G_1 – расход сжатого воздуха, кг/с

$C_{\text{РВ}}$ – изобарная теплоёмкость воздуха, кДж/кг*К

Выполнение условия $Q_{\text{УСТ}i} > Q_X$ в некоторой области значений μ означает возможность обеспечения требуемой холодопроизводительности на данном температурном уровне при данной доле холодного потока μ .

Определяется необходимая холодопроизводительность Q_0 , распределяющаяся между двумя температурами кипения фреона:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 - G_1 \cdot C_{\text{РВ}} \cdot (T_{\text{ОС}} - T_{\text{ПР}}) + G_1 \cdot C_{\text{РВ}} \cdot (T_{\text{ПР}} - T_X) \quad (7)$$

где $T_{\text{ПР}}$ – температура кипения фреона при промежуточном давлении в теплообменнике ТО1 (см. рис.1).

Выбор фреонного компрессора из существующего типоразмерного ряда ведётся по известной номинальной характеристике компрессора $Q(T_0)$

(зависимость холодопроизводительности данного компрессора от температурного уровня кипения фреона) Из типоразмерного ряда фреоновых компрессоров выбирается такая машина, для которой справедливо неравенство $Q(T_{\text{пр}}) > Q_1$, так как это означает избыток холодопроизводительности на уровне $T_{\text{пр}}$, а, следовательно, указывает на возможность отбора части фреона для подачи в испаритель ТО2 с температурой кипения T_x . Определяется величина относительной доли «избыточного» фреона на уровне температур $T_{\text{пр}}$ по формуле

$$y = \left(1 - \frac{Q_1}{Q(T_{\text{пр}})} \right) \quad (8)$$

Сравнивается величина $y \cdot Q(T_x)$ с величиной потребной холодопроизводительности на нижнем уровне кипения Q_2 . Подбор компрессора продолжается до тех пор, пока величина $y \cdot Q(T_x)$ не станет больше величины Q_2 . Это означает, что и на нижнем температурном уровне кипения фреона может быть обеспечена требуемая холодопроизводительность для охлаждения воздуха от $T_{\text{пр}}$ до T_x . Воздушный компрессор подбирается по максимальному расходу воздуха, требуемому для обеспечения холодопроизводительности Q_x , и по требуемой степени сжатия.

Определяются потребляемые мощности фреонового $N_{\text{фк}}$ и воздушного $N_{\text{вк}}$ компрессоров. Вычисляется теоретический холодильный коэффициент установки для данного режима работы по формуле:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{уст}}}{N_{\text{фк}} + N_{\text{вк}}} \quad (9)$$

Расчётная холодопроизводительность, определённая по формуле (6) и соответствующая температуре на входе в камеру -70°C при доле «холодного» потока 0.4 составила 65Вт. Значение теоретического холодильного коэффициента, определённого по формуле (9), составило 3.3%. Столь малое значение холодильного коэффициента характерно для установок с вихревыми трубами.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ДВУХКАСКАДНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ НА НИЖНЕМ КАСКАДЕ

Описана опытная установка в двух её модификациях: с переключающимися вымораживателями влаги и с адсорберным блоком осушки. Приведены принципиальные схемы обеих установок. Адсорбционный способ осушки позволяет нам обеспечивать

работоспособность экспериментальной установки, гарантируя осушку воздуха до точки росы -70°C и позволяет получить характеристики вихревой трубы и всей установки при работе на сухом воздухе. Возможность двуступенчатого вымораживания влаги в системе предусмотрено для дальнейшего обоснованного выбора оптимального способа осушки воздуха для прототипа установки охлаждения.

Описаны методы и устройства контроля параметров системы. Описаны все входящие в установку машины, аппараты, запорная арматура, система регулирования. Приведена методика оценки погрешности экспериментальных исследований. Приведена методика проведения эксперимента.

Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 4. Результаты экспериментов показали, что, сохранив характер теоретических зависимостей $T_x(\mu)$, экспериментальные характеристики сместились в сторону больших значений температуры. Однако, разница между теоретически предсказанными и экспериментально полученными характеристиками не превышает $3-5^{\circ}\text{C}$, что составляет $10-15\%$ от теоретической величины, говоря о хорошей сходимости экспериментальных результатов с теоретически предсказанными. Время выхода незагруженной установки на режим составило 40 минут.

Поместив в холодильную камеру образец биоматериала массой 1 кг, обладающий теплоёмкостью $2.7\text{кДж/кг}\cdot\text{K}$, мы определили время и скорость охлаждения. Результаты этих испытаний приведены на рис.5. Время охлаждения составило 65 минут, скорость охлаждения 1.34 K/мин . Холодопроизводительность установки в режиме максимальной температурной эффективности вихревой трубы (то есть минимальной температуры холодного потока) составила 60Вт. Минимальная температура на выходе из холодильной камеры $T_{17}=-67^{\circ}\text{C}$ (при температуре холодного потока $T_{15}=-70^{\circ}\text{C}$). Расход воздуха составил 200л/мин , давление сжатого воздуха -0.7МПа . Потребляемая мощность установки составила 1800Вт . Значение экспериментального холодильного коэффициента составило 3.0% .

По результатам экспериментальных исследований был сделан вывод о возможности создания установки хранения биоматериалов на базе двухкаскадной двухконтурной холодильной установки и был сформулирован ряд практических рекомендаций по созданию подобных систем заморозки и хранения биоматериалов:

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ ПРИ СОЗДАНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК ХРАНЕНИЯ БИОМАТЕРИАЛОВ

- Для повышения эффективности двухконтурной каскадной установки рекомендуется использовать последовательное включение трёх холодильных камер. Это позволит использовать подогретый, но ещё

достаточно холодный поток, идущий из предыдущей камеры, для охлаждения последующей камеры. При такой компоновке холодильных камер происходит уменьшение суммарного времени захлаживания биоматериалов во всех трёх камерах, так как процесс захлаживания следующей камеры начинается уже при охлаждении предыдущей. Процессы охлаждения взаимно «перекрываются» и суммарное время охлаждения уменьшается. Расчеты показали, что последовательное включение камер позволит повысить холодопроизводительность почти в два раза. Сравнение величины холодопроизводительности для экспериментальной установки и установки с тремя холодильными камерами представлено на рис.6.

- Другим способом повышения эффективности установки является включение в систему дополнительного рекуперативного теплообменника, позволяющего использовать холод отработанного потока для охлаждения сжатого воздуха. В экспериментальной установке такой теплообменник не использовался для упрощения конструкции и для исключения возможности вымерзания влаги, выносимой из холодильной камеры. При встраивании рекуперативного теплообменника в установку необходимо предусмотреть дополнительную систему клапанов. Эта система должна направлять отработанный воздух в рекуперативный теплообменник при закрытой дверце холодильной камеры, а в случае открывания дверцы – направлять воздух в окружающую среду для предотвращения вымерзания влаги, содержащейся в атмосферном воздухе, проникающем в камеру.
- Для увеличения скорости охлаждения биоматериала можно рекомендовать регулировать положение дросселя на горячем конце вихревой трубы для повышения доли холодного потока и для работы трубы в режиме максимальной холодопроизводительности. При этом захлаживание будет происходить значительно быстрее. Для регулировки доли холодного потока следует предусмотреть дополнительную систему автоматической регулировки вихревой трубы. При достижении стабильного уровня температур в камере система регулировки установит дроссель в положение, соответствующее режиму максимальной температурной эффективности (то есть режиму минимальной температуры холодного потока).
- Для осушки рекомендуется использовать теплообменники-регенераторы, засыпанные адсорбентом. Так как поток охлаждаемого воздуха имеет повышенное давление (6-7 бар), то регенерация цеолита в холодном теплообменнике может быть произведена простым открытием воздушного клапана в атмосферу. Падение давления в объёме цеолита приведёт к выделению поглощённой влаги. Для максимального упрощения данной задачи и для сохранения принципа создания установки из доступных, серийно выпускаемых машин и аппаратов, рекомендуется использовать промышленно выпускаемые

переключающиеся адсорберы, работающие по технологии PSA (pressure swing adsorber).

- При создании рабочей установки охлаждения следует уделить большое внимание устройствам шумоподавления, так как воздушный компрессор и вихревая труба являются источниками сильного шума. Мощность звука воздушного компрессора, применявшегося в нашей установке составляла 80 дБ, что является недопустимым показателем для медицинских учреждений. Однако уже сегодня существуют компрессора без смазки с уровнем шума 30..35 дБ, применяемые, например, в стоматологии.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДБОРУ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНКРЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УСТАНОВКИ ХРАНЕНИЯ

В настоящее время существуют серийно выпускаемые вихревые трубы (компаний Exair, ITW Vortec) с пропускной способностью 50..4200л/мин (3..252м³/ч). Эти расходы соответствуют значениям полезных холодопроизводительностей от 25Вт до 3000 Вт. Для сжатия таких объёмов воздуха можно использовать серийные воздушные компрессоры (2-3-х цилиндровые) или имеющуюся в наличии пневмосеть. Во фреоновом контуре можно также использовать серийные фреоновые машины. Условно разбив диапазон холодопроизводительностей на участки малой (до 150Вт), средней (150 500Вт) и большой (свыше 500Вт) холодопроизводительностей, мы составили сводную таблицу 1, позволяющую определить тип оборудования, необходимый для обеспечения конкретного значения Q_х.

Таблица 1.

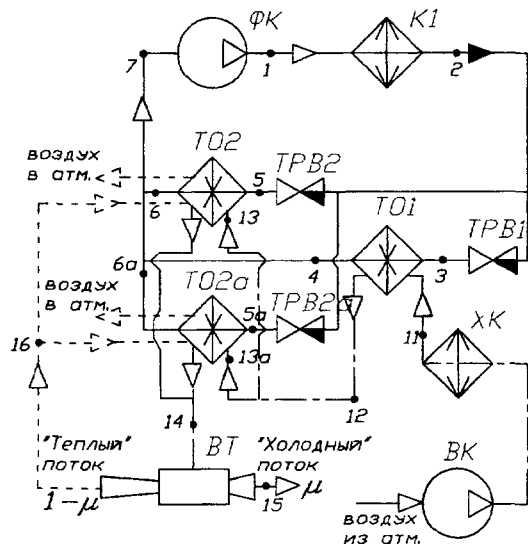
Подбор типа оборудования в зависимости от требуемой холодопроизводительности

Параметр	Q _х , Вт		
	до 150	150..500	свыше 500
Расход воздуха через вихревую трубу	до 300л/мин	300.. 1000л/мин	свыше 1000л/мин
Тип воздушного компрессора	одноцилиндровый	2-3-х цилиндровый или пневмосеть	крупный компрессор или пневмосеть
Потребляемая мощность фреонового компрессора	до 2 кВт	2..7 кВт	свыше 7 кВт

ВЫВОДЫ

- Предложена новая область технического применения вихревых труб
- Установлена возможность использования вихревой трубы вне диапазона температур, на которые она была рассчитана. В нашем случае вихревая труба, рассчитанная на работу в диапазоне температур сжатого воздуха +20..+30°C, успешно использовалась в диапазоне -30..-40°C
- Аналитически и экспериментально исследованы термодинамические характеристики малоразмерной вихревой трубы (Ø 7.2мм, ITW Vortec Corp. (USA)) в диапазоне температур сжатого воздуха +30...-40°C
- Экспериментально подтверждена независимость температурной эффективности вихревой трубы от начального уровня температуры сжатого воздуха
- Создан прототип охладителя с температурой термостатирования -70°C
- Аналитически и экспериментально исследована работа двухконтурной каскадной холодильной установки для систем краткосрочного хранения биоматериалов. Установлены режимы максимальной холодопроизводительности. Полезная холодопроизводительность установки при -70°C составила 60Вт. Полезная холодопроизводительность модернизированной установки (с тремя последовательными холодильными камерами) составила 120 Вт. Расход воздуха составил 200л/мин (12м³/час), давление воздуха составило 0.7 МПа. Потребляемая мощность установки составила 1800 Вт
- Время захлаживания биоматериала массой m=1 кг с теплоёмкостью 2.7кДж/кг*К от температуры +30°C до -67°C составило 65 мин, что соответствует скорости охлаждения 1.34 К/мин. Такое значение скорости является приемлемым для систем криоконсервирования.
- Проведено сравнение созданного прототипа установки охлаждения и хранения с существующими установками для криоконсервирования. Недостатком прототипа является низкая энергетическая эффективность, к преимуществам относятся надёжность, простота в эксплуатации и низкая стоимость предложенной установки. К тому же охлаждение биоматериала осуществляется потоком холодного воздуха, что интенсифицирует теплообмен и позволяет охлаждать биоматериалы больших размеров, чем это возможно в существующих системах, где теплообмен между биоматериалом и хладагентом происходит только за счёт теплопроводности стенок испарителя
- По результатам проведенных исследований сформулированы практические рекомендации по разработке охладителей биоматериалов с температурами термостатирования -70°C. Данные рекомендации позволяют подобрать тип вихревой трубы и компрессорного оборудования, необходимый для обеспечения требуемой холодопроизводительности.

СХЕМА УСТАНОВКИ



ФК-Фрезновыи Компрессор

К1-Конденсатор

ВТ-Вихревая Труба

ВК-Воздушный Компрессор

ХК-Холодильник Концевой

ТО1, ТО2, ТО2а-Теплообменники

ТРВ1, ТРВ2, ТРВ2а-Терморегулирующие Вентили

Поток сжатого воздуха

Поток "теплого" воздуха

Поток фреона

СХЕМЫ ПРОЦЕССОВ

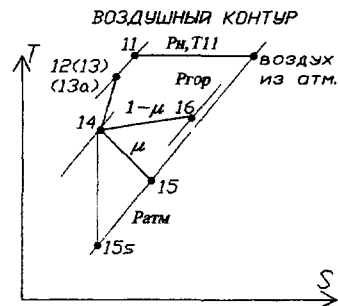
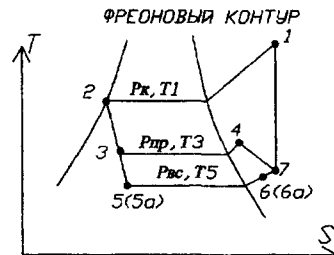


Рис. 1. Общая схема двухконтурной каскадной холодильной установки с вихревой трубой

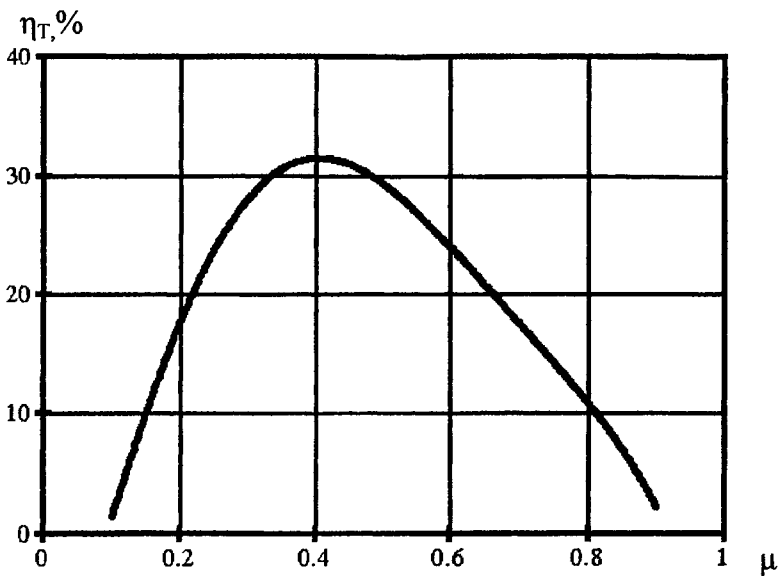


Рис. 2. Теоретическая зависимость температурной эффективности вихревой трубы от доли холодного потока



Рис. 3. Расчётные и экспериментальные значения температуры холодного потока

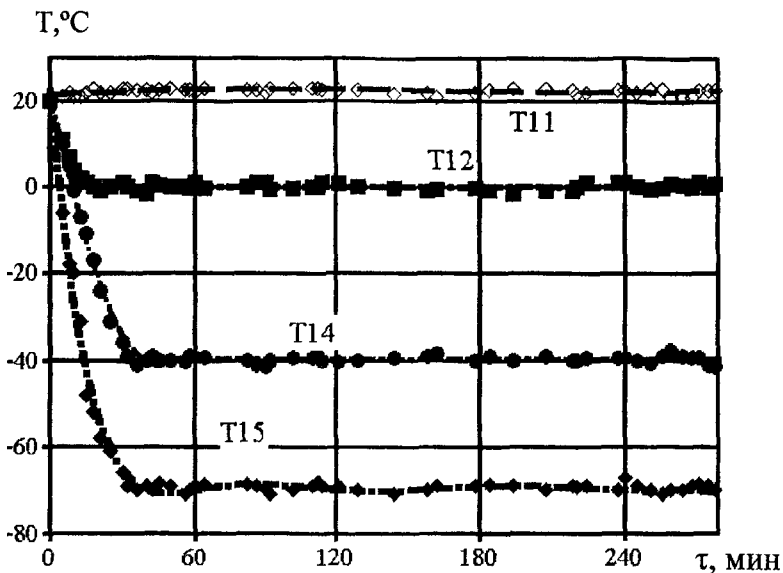


Рис. 4. Температура воздуха в основных точках системы

T11 – вход в ТО1

T12 – выход из ТО1(вход в ТО2)

T14 – выход из ТО2 (вход в ВТ)

T15 – выход из ВТ

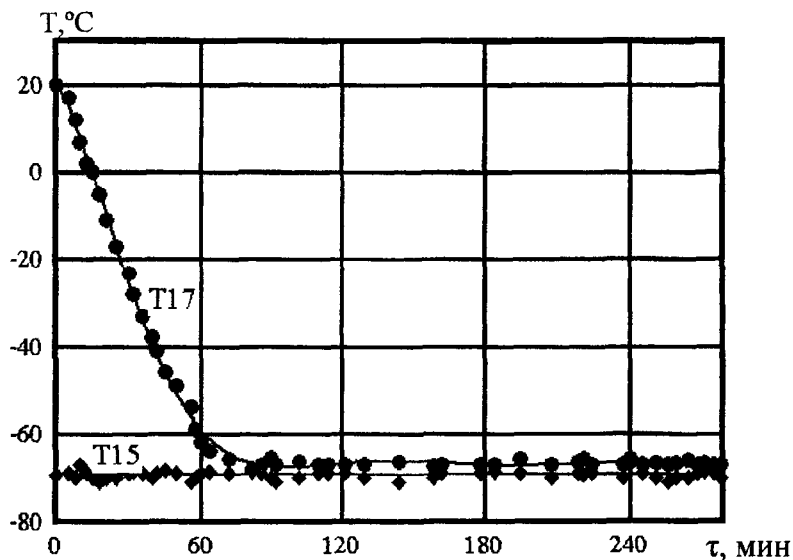


Рис. 5. Температура воздуха на входе (Т15) и выходе (Т17) холодильной камеры (масса биоматериала 1кг; теплоёмкость биоматериала 2.7кДж/кг*К)

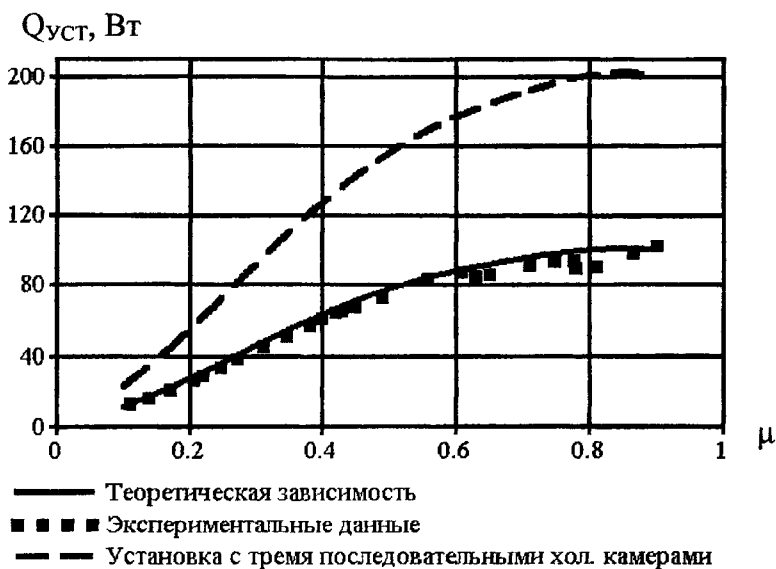


Рис. 6. Зависимость холодопроизводительности от доли холодного потока для экспериментальной установки и усовершенствованной установки с тремя холодильными камерами

Публикации по теме диссертации

1. Архаров И.А., Навасардян Е.С., Лукьянов П.А. Установки для систем хранения биоматериалов // Химическое и нефтегазовое машиностроение – 2001. – № 8. – С. 18–21.

2. Two-Circuit Cascade Refrigerator Unit for Short Time Cryopreservation of biological materials at -70°C / I.A. Arkharov, L.C. Kun, P.A. Luckyanov, E.S. Navasardyan // The Seventh IIR International Conference Cryogenics, - Prague (Czech Republic), 2002. – P. 161–164.

3. Freezer with Single Stage Hermetic Compressor / I.A. Arkharov, A.M. Arkharov, E.S. Navasardyan at al. // IIR International Congress of Refrigeration, - Washington (USA), 2003. – P.105–108.

4. Cascade refrigerators with vortex tube stage / I.A. Arkharov, P.A. Luckyanov, E.S. Navasardyan at al. // IIR International Congress of Refrigeration, - Washington (USA), 2003. – P. 124–129.

Подписано к печати 19.05.04 г.
Зак. 86т. Объем 1.0 п.л. Тир. 100
Типография МГТУ им Н.Э.Баумана
107005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

05 01-05.06.

РНБ Русский фонд

2006-4

4832