

М469189

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

АРУТЮНЯН Микаел Петросович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАННОГО
ОХЛАЖДЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

(05.04.03) - Машины и аппараты холодильной и
криогенной техники и систем
кондиционирования)

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

Москва - 1988

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор МИКУЛИН Е.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор - В.П.Харитонов
кандидат технических наук - В.Г.Резницкий

Ведущее предприятие - НПО "Гелиймаш"

Защита диссертации состоится "18" апреля 1988 г.
в 14 час. на заседании специализированного совета К053.15.07
в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского высшего технического училища им. Н.Э.Баумана.

февраль 1988 г.

ированного совета
доцент

В.Н.КОЗЛОВ

M469189

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время криогенная техника находит новое применение в различных областях народного хозяйства страны. Это, прежде всего, сельское хозяйство, медицина, биология, машиностроение, пищевая отрасль. Применение криогенных систем в указанных областях связано, в основном, с внедрением метода программированного охлаждения, который позволяет существенно повысить качество конечного продукта, увеличить его производство.

Продовольственной Программой ЦК КПСС предусмотрено дальнейшее увеличение производства продукции мясомолочной отрасли за счет использования прогрессивных высокоинтенсивных технологий. Такой технологией необходимо считать в данном случае внедрение метода программированного охлаждения в сельское хозяйство при криоконсервации семени и эмбрионов ценных и редких пород сельскохозяйственных животных. Конечным результатом при этом является увеличение поголовья высокопродуктивных животных, направленный селекционный отбор, повышение производительности труда.

Внедрение этой технологии в медицину и биологию позволит создать банк различных биологических материалов - ядродержащих клеток крови, костного мозга, эпителиальной ткани, отдельных органов, пастообразных лекарственных препаратов и т.п.

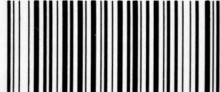
В машиностроении применение метода программированного охлаждения обеспечивает получение изделий и материалов с наперед заданными физико-механическими свойствами, такими как прочность, ковкость, хрупкость, термохладостойкость и т.п.

Эффективность внедрения и успешного использования технологии программированного охлаждения зависит от ее технического обеспечения - криогенных охладителей. При разработке криогенных охладителей существенным является возможность реализации требуемых режимов охлаждения (программ), индивидуальных для различных материалов. Так, при охлаждении биологических материалов технологией предусмотрено многоступенчатое охлаждение. Особенностью программированного охлаждения при этом является наличие фазового перехода воды, входящей в структуру биоматериала на этапе замораживания. Это накладывает ряд трудностей на разработку систем технического обеспечения.

Специфика применения охладителей в вышеперечисленных отрас-

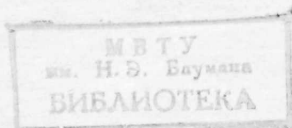
I

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1469189

Арутюнян М.П. Разработка и



лях народного хозяйства требует разработки таких систем программированного охлаждения, которые отвечают следующим условиям:

- реализация широкого спектра программ охлаждения, их технологичность;
- экономичность по расходу жидкого азота;
- простота и надежность конструкции;
- удобство и безопасность эксплуатации.

Существующие устройства зачастую не удовлетворяют указанным условиям, особенно в сельском хозяйстве, что требует разработки новых систем, реализующих метод программированного охлаждения различных материалов.

Цель работы. Основной практической целью работы является разработка и реализация системы программированного охлаждения нового типа, обеспечивающей широкий спектр режимов охлаждения (программ), экономичность, при простоте и надежности конструкции, доступности и безопасности эксплуатации, с учетом специфики применения в сельском хозяйстве и других областях.

Научная новизна. Предложена система, функционирующая по геометрически замкнутому контуру. Такой контур позволяет наиболее полно использовать теплоту испарения криоагента и "холод" отработанных паров. Технические решения конструкции системы в целом и криогенной камеры, в частности, защищены авторским свидетельством № I3I725I от I5.06.87 и положительное решение ВНИИПЭ по заявке № 3883258/3I-I3 (05I9I0).

Разработана физико-математическая модель системы с рассмотрением частных вариантов функционирования, обеспечивающих технологическую гибкость применения. Получено экспериментальное подтверждение достоверности физико-математической модели. Разработана инженерная методика расчета системы программированного охлаждения применительно к биологическим материалам и другим объектам, функционирующей по геометрически замкнутому контуру.

Практическая ценность. Показано, что предложенная система позволяет реализовать широкий спектр основных режимов охлаждения объекта в пределах (I+200) К/мин при использовании в качестве криоагента - жидкого азота. Показана возможность уменьшения расхода жидкого азота в 2,5+3 раза при геометрически замкнутом контуре по сравнению с традиционными схемами (с непосредственным испарением жидкости для получения потока парообразного азота). Разработанная методика расчета позволяет произвести тепловой

расчет контура, определить динамические характеристики системы с учетом изменения физических свойств криоагента.

Полученные экспериментальные данные по замораживанию натурального биоматериала – семени быков-производителей подтвердили практическую приемлемость предложенной системы охлаждения и методики ее расчета.

Внедрение. Результаты диссертационной работы внедрены на Центральной станции искусственного осеменения сельскохозяйственных животных Госагропрома СССР.

Проведено испытание экспериментального образца криогенного охладителя, созданного согласно схеме, описанной в работе. При охлаждении семени быков-производителей определены благоприятные (оптимальные) режимы замораживания, получены удовлетворительные результаты по качественным показателям биоматериала: выживаемость в среднем 50%, фертильность в интервале 800+1000. Реализованы рекомендации по компоновке цилиндрических ампул с биоматериалом, показавшие практическую приемлемость и технологичность.

Материалы работы использованы во ВНИО по племенному животноводству Госагропрома СССР при разработке технических требований к проектированию серийного программного охладителя.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на научно-практической конференции "Интенсификация производства и применение искусственного холода", (Ленинград, 1986).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 4 печатных работы.

Объем диссертации. Диссертация содержит 130 машинописных страниц основного текста, 30 рисунков на 30 страницах, 6 таблиц, список использованных информационных источников (45 наименований) и приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность применения метода программированного охлаждения объектов в различных областях народного хозяйства, отражены специфические условия использования метода в сельском хозяйстве, медицине, биологии, затрудняющие внедрение традиционных охлаждающих устройств. Отмечены требования, предъявляемые к системам технического обеспечения метода

программированного охлаждения.

В первом разделе – обзор исследований по программированному охлаждению – рассмотрены специфические особенности процесса охлаждения биологических материалов, как многокомпонентных сложных объектов. Это, прежде всего:

- наличие фазового перехода воды, входящей в структуру материала, протекающего в относительно широком интервале температур;
- зависимость внутривещных изменений, выносливости, сохранения физиологической функции от режима охлаждения (программы);
- пиковый характер зависимости теплоемкости от температуры в области фазового перехода;
- многоступенчатая технология охлаждения.

Перечисленные трудности налагают ряд трудностей на разработку замораживающих устройств.

Проведен обзор некоторых систем, использующих различные способы охлаждения и регулирования температурного режима объекта. Показана необходимость разработки новой системы охлаждения, обладающей простым принципом регулирования температурного поля объекта, возможностью реализации основных режимов замораживания, экономичностью по расходу криоагента, технологичностью, удобством, надежностью и безопасностью эксплуатации.

В разделе определены следующие основные задачи:

- разработка принципиальной схемы новой системы программированного охлаждения, удовлетворяющей вышеизложенным принципам;
- разработка физико-математической модели системы охлаждения, анализ ее функционирования. Разработка методики ее расчета;
- разработка модельного образца охладителя и экспериментального стенда. Получение экспериментальных характеристик;
- сопоставление теоретических и экспериментальных результатов, определение влияния различных факторов на функционирование системы. Выработка рекомендаций по проектированию и эксплуатации таких устройств.

Во втором разделе – установка программированного охлаждения и ее теоретическое исследование – рассмотрена принципиальная схема предлагаемой установки, составляющие ее элементы, принцип работы. Проанализированы возможные частные варианты функционирования, разработана обобщенная схема охладителя. С целью разработки его методики расчета дано физико-математическое описание.

Показано, что система охлаждения, функционирующая по геометрически замкнутому контуру (рис. 1), позволяет наиболее полно использовать теплоту испарения криоагента и утилизировать холод отработанных паров.

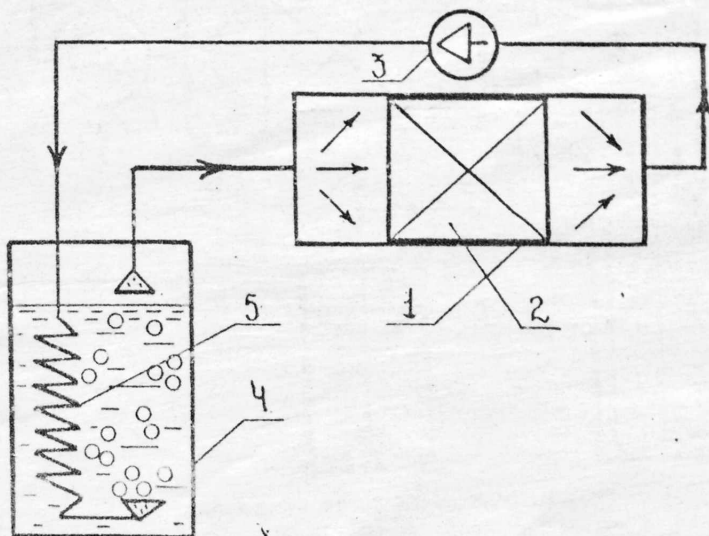


Рис. 1. Принципиальная схема установки

Она содержит следующие составные элементы: криогенную камеру 1 с объектом 2, нагнетатель 3 для организации потока, емкость 4 с жидким криоагентом, встроенный теплообменник 5 с барботером на выходе. Последовательное соединение этих элементов трубопроводом дает геометрически замкнутый контур.

Пары криоагента, поступающие из емкости 4 в криогенную камеру 1, охлаждают объект 2, далее направляемые нагнетателем 3 возвращаются через теплообменник 5 в емкость 4, где барботируют в слое жидкого криоагента, замыкая контур охлаждающего потока. Цикл повторяется до достижения объектом требуемой конечной температуры. Заданные режимы охлаждения объекта (программы) реализуются изменением производительности нагнетателя путем регулирования его электрической мощности (напряжения питания).

Проведен анализ работы данной системы, позволивший выявить частные варианты функционирования, которые можно проследить на обобщающей схеме (рис. 2).

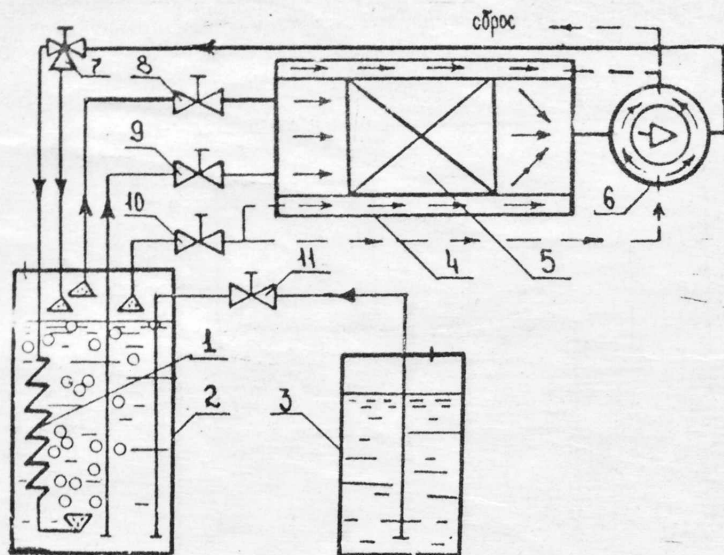


Рис. 2. Обобщающая схема охладителя

Она дополнительно содержит: резервный сосуд 3 с криоагентом для подпитки основной емкости 2 жидкостью, байпасный 7, жидкостной 9 и продувочный 10 трубопроводы с запорно-регулирующей арматурой.

С целью обеспечения стабильных условий теплообмена в емкости 2 необходимо поддерживать постоянный уровень жидкости, что достигается подпиткой по линии II из резерва. Для обеспечения безопасных условий эксплуатации необходимо поддерживать в системе постоянное низкое давление путем сброса отработанных паров по линии 10 (или в любом другом месте контура). Избыток давления в системе может быть использован для передавливания жидкости из емкости 2 по линии 9 на непосредственное орошение объекта 5. Отмечена возможность использования комбинированных вариантов функционирования. Применение такой схемы обеспечивает технологическую гибкость, стабильность теплообмена, безопасность

эксплуатации установки.

С целью разработки методики расчета охладителя, выявления закона изменения расхода охлаждающего потока, оценки экономичности различных вариантов функционирования и определения динамических характеристик системы, рассмотрена ее физическая модель.

Показано, что система функционирует в неуставившемся динамическом режиме при переменных расходах, температурах, давлениях, и в такой постановке является термодинамически открытой.

На основе физической модели дано математическое описание динамики системы, которое справедливо при следующих принятых допущениях:

- равновесие системы пар-жидкость в емкости в любой момент времени;
- незначительная скорость изменения давления по длине контура; которой можно пренебречь;
- сосредоточенность массы объекта.

Эти условия позволяют рассматривать систему как некую емкость, во всех точках которой имеет место равновесие и равномерное распределение давления и дать ее математическое описание в относительно упрощенном виде:

$$\left\{ \begin{aligned} (G_2 - G_1 + G_g) d\tau &= d(\dot{r}'V' + \dot{r}''V''); \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} (i_2 G_2 - i'' G_1 + i' G_g + Q_r) d\tau &= d(\dot{r}'V' i' + \dot{r}''V'' i'') - V dp; \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} dV''/d\tau &= -dV'/d\tau; \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Уравнение (1) - есть уравнение материального баланса для емкости, уравнение (2) - энергетического баланса, а уравнение (3) выражает связь между жидкой и парообразной фазами в емкости.

Приведенная система уравнений (1)+(3) совместно с уравнениями теплового баланса

$$cm dT/d\tau = \alpha F_n (T'' - T) - q_r; \quad (4)$$

$$c_p G_1 (T_1 - T'') = -cm dT/d\tau; \quad (5)$$

для объекта 4 и потока 5 описывает динамику системы программированного охлаждения, функционирующую по геометрически замкнутому контуру для общего случая.

Приведена преобразованная система уравнений, являющаяся решением уравнений (1)+(3) относительно производных давления и объема жидкости во времени.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp}{d\tau} &= \frac{Q_T + [(i_2 - i') + r\delta''/(\delta' - \delta'')]G_2 - r\delta'G_1/(\delta' - \delta'') + r\delta''G_3/(\delta' - \delta'')}{V' \left(\frac{r\delta''}{\delta' - \delta''} \frac{d\delta'}{dp} + \delta' \frac{di'}{dp} \right) + (V - V') \left(\frac{r\delta'}{\delta' - \delta''} \frac{d\delta''}{dp} + \delta'' \frac{di''}{dp} \right) - V} \quad (6) \\ \frac{dV'}{d\tau} &= \frac{G_2 - G_1 + G_3}{\delta' - \delta''} - \frac{V' \left(\frac{d\delta'}{dp} - \frac{d\delta''}{dp} \right) + V \frac{d\delta''}{dp}}{\delta' - \delta''} \cdot \frac{dp}{d\tau} \quad (7) \end{aligned} \right.$$

Совместное решение обыкновенных дифференциальных уравнений (4)+(7) получено применительно к охлаждению биологических объектов численным методом Эйлера с использованием конечно-разностных схем явного типа. При этом в уравнении (4) введена эффективная теплоемкость, учитывающая теплоту фазового перехода воды, входящей в структуру биоматериалов. Она рассчитана по формуле

$$C_3 = C_{с.в.}(1 - \bar{W}) + c_{л.} \bar{W} \cdot W + c_{в.}(1 - \bar{W}) \cdot W + (\bar{W}_2 - \bar{W}_1) \cdot W \cdot \bar{\lambda}; \quad (8)$$
 которая учитывает теплоемкость сухого остатка, льда, воды и теплоту кристаллизации в зависимости от доли вымороженной воды. Получено описание частных вариантов функционирования, вытекающее из общей системы уравнений (6) и (7) при учете соответствующих условий.

При варианте с частичным выпуском паров и подпиткой жидкости в емкости имеет место постоянство давления и объема жидкости: $p = \text{const}$; $V = \text{const}$; при $\Delta G = G_1 - G_2 \neq 0$; $G_3 \neq 0$, поэтому

$$G_3 = \Delta G = [Q_T + (i_2 - i' - r)G_1]/(i_2 - i'); \quad (9)$$

с начальным условием

$$\tau = 0; p = p_0 = \text{const}, V' = V_0' = \text{const};$$

Для варианта только с выпуском паров справедливы условия:

$$\Delta G \neq 0; G_3 = 0; p = \text{const} \text{ и значит}$$

$$dV'/d\tau = -\{Q_T + [(i_2 - i') - r]G_1\}/[(i_2 - i')(\delta' - \delta'') + r\delta'']; \quad (10)$$

с начальным условием

$$\tau = 0; p = p_0 = \text{const};$$

Для варианта без выпуска паров и без подпитки (замкнутый вариант) справедливы условия:

$G_f = 0; \Delta G = 0; p \neq \text{const}, V' = \text{const}$ и значит $G_1'' = G_2$,

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{Q_T + [(i_2 - i') - r] \cdot G_1''}{V' \left(\frac{r \delta''}{\delta' - \delta''} \frac{d\delta'}{dP} + \delta' \frac{di'}{dP} \right) + (V - V') \left(\frac{r \delta''}{\delta' - \delta''} \frac{d\delta''}{dP} + \delta'' \frac{di''}{dP} \right) - V}; \quad (11)$$

$$dv'/d\tau = - \{ V' [(d\delta'/dP) - (d\delta''/dP)] + V (d\delta''/dP) \} \times (12)$$

$$\times (dP/d\tau) / (\delta' - \delta'');$$

с начальным условием

$$\tau = 0; p = p_0, V' = V_0';$$

Для того же замкнутого варианта, но с подпиткой емкости жидкостью справедливы условия: $p \neq \text{const}, V' = \text{const}$ при $G_1'' = G_2$,

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{Q_T + [(i_2 - i') - r] \cdot G_1'' + [r \delta'' / (\delta' - \delta'')] G_f}{V' \left(\frac{r \delta''}{\delta' - \delta''} \frac{d\delta'}{dP} + \delta' \frac{di'}{dP} \right) + (V - V') \left(\frac{r \delta''}{\delta' - \delta''} \frac{d\delta''}{dP} + \delta'' \frac{di''}{dP} \right) - V}; \quad (13)$$

с начальным условием: $\tau = 0; p = p_0; V' = V_0' = \text{const};$

Показано, что решение полученных уравнений возможно при задании значения потока G_1'' и параметров обратного потока на входе в емкость (в частности, энтальпии), которые определяются из решения уравнений (4) и (5), позволяющих произвести тепловой расчет контура.

Разработана методика, позволяющая произвести расчеты по всем рассмотренным вариантам функционирования. Она предусматривает:

- определение закона изменения охлаждающего потока G_1'' , обеспечивающего заданный режим охлаждения объекта;
- тепловой расчет контура, определение параметров потока по длине контура;
- определение изменения давления и уровня жидкости в емкости с криоагентом;
- определение расхода (потребления) жидкого криоагента.

Показано, что при тепловом расчете контура необходим учет: теплоты, вносимой в поток нагнетателем (для агрегатированного нагнетателя); теплопритоков из окружающей среды (отдельно для емкости, криогенной камеры, коммуникаций). Теплота, вносимая нагнетателем, пропорциональна К.П.Д. нагнетателя. Теплопритоки рассчитаны по уравнению теплопередачи $Q_{0.c.} = k \cdot F \cdot \Delta T$.

При этом использованы известные зависимости типа критеріальных уравнений $Nu = f(Re, Pr)$ теории конвективного теплообмена.

В третьем разделе – экспериментальная установка и методика проведения экспериментов – приведены цели и задачи экспериментальных исследований, описание стенда и методика проведения экспериментов. Основная цель экспериментального исследования – подтверждение физико-математической модели системы, функционирующей по геометрически замкнутому контуру, результатов разработанной методики расчета динамических характеристик системы.

Исследования проводились на экспериментальном стенде (рис. 4), созданном в соответствии с обобщающей схемой охладителя, позволяющем реализовать частные варианты функционирования.

Установка содержит: стандартный сосуд Дьюара I типа СДС-20, в который встроен теплообменник с распылителем потока для обеспечения барботажа газа через слой жидкого криоагента. Там же находится нагревательный элемент (60 Вт) для частичного испарения жидкости с целью продувки всей установки. Емкость I оборудована устройством подпитки 4 – резерв, которое работает по известному принципу перекачивания жидкости и служит для поддержания постоянного уровня криоагента. Эта емкость через гибкий патрубок (металлорукав диаметром 20 мм) подсоединена к криогенной камере 2 цилиндрической формы ($D = 200$ мм, $L = 800$ мм, $\delta = 1$ мм) со встроенным нагнетателем II – двухступенчатый центробежный вентиляторный агрегат АВИ-3, $N = 340$ Вт, электродвигатель коллекторный универсального типа. В полости всасывания нагнетателя располагается охлаждаемый объект 3. Криогенная камера 2 посредством трубопровода 12 (медная трубка 22х1, $l = 1,3$ м) соединена с емкостью I. Таким образом, последовательно соединяясь, эти элементы образуют геометрически замкнутый контур. С целью уменьшения теплопритоков из окружающей среды установка по всему контуру изолирована стекловолокном.

Для регулирования потоков по контуру располагается запорно-регулирующая арматура (клапаны и вентили ручного и электромагнитного действия). В определенных местах установки смонтированы штуцеры для присоединения манометров (МІ-М8) с целью измерения давления (перепада) давлений на различных участках контура.

Для измерения температурного поля объекта: температуры по-

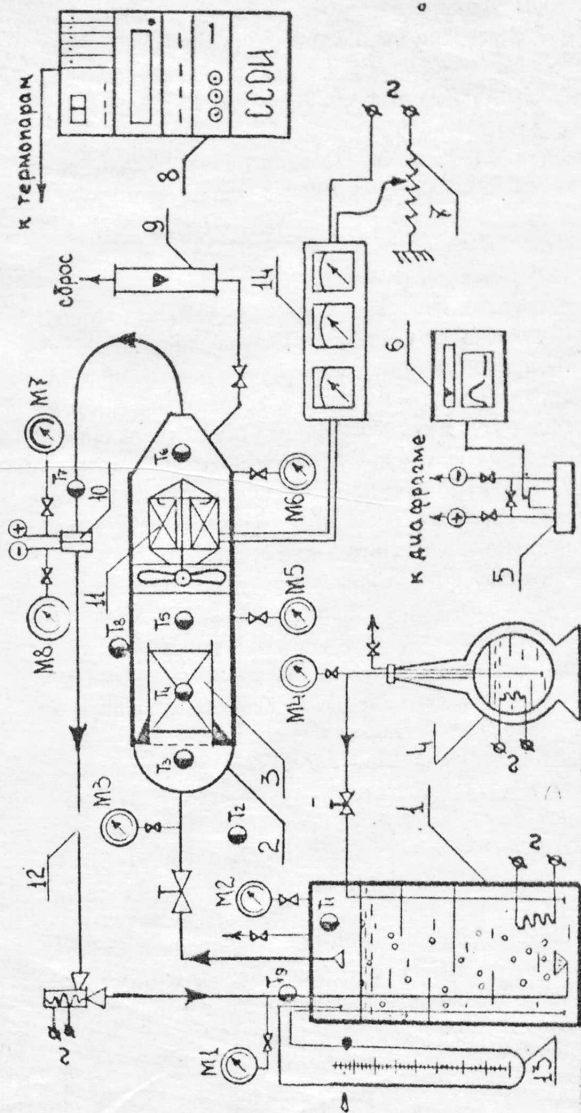


Рис. 3. Схема экспериментального стенда

тока в различных точках контура и отдельных узлов установки использованы медно-константановые термодатчики (тарировка НПО "Криогенмаш"), ($T_I + T_9$), сигнал с которых поступал в систему сбора и обработки информации 8 ССОИ (разработка МВТУ им. Н.Э.Баумана), которая включает:

- коммутатор сигналов Ф.799/2, измеритель сигналов Ц68000, регистратор сигналов ЦИУ-Ц68000К, устройство управления сигналами УУ-1м.

ССОИ дает возможность измерять и регистрировать сигналы с интервалом 4+64 с с кратностью, равной 2.

Расход потока измерялся диафрагмой 10 ($\Delta_0 = 5, 10, 15$ мм), сигнал с которой поступал на дифференциальный манометр и регистрировался самопишущим прибором. Измерение уровня жидкости в емкости I производилось уровнемером манометрического типа 13, таким же жидкостным манометром и измерялось гидравлическое сопротивление отдельных участков контура. Регулирование производительности нагнетателя, а, значит, охлаждающего потока, производилось путем изменения напряжения питания автотрансформатором 7, показания контролировались электроизмерительным мостом 14.

Объектом экспериментального охлаждения служили цилиндрические ампулы из полимерного материала (полипропилена), ($\ell = 100$ мм, $\Delta = 2,5$ мм, $\delta = 0,25$ мм), заполненные модельной жидкостью биоматериала). Ампулы компоновались в пакеты для продольного и поперечного течения потока криоагента и располагались в каналы соответствующей формы. Криоагентом выбран жидкий азот.

Эксперименты проведены по частным вариантам функционирования, для различных режимов охлаждения объекта и его массы при продольном и поперечном течении потока. Проведены эксперименты по программированному замораживанию натурального биоматериала (семя быков-производителей) по заданным программам.

В четвертом разделе - анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, рекомендации для проектирования системы - отмечено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных. Максимальное отклонение для различных величин лежит в пределах $\pm 20\%$.

Показана возможность реализации различных режимов охлаждения биоматериала в диапазоне 1+200 К/мин, в интервале до 130 К с отклонением ± 3 К (рис. 5). Отмечена допустимая неравномерность

2+5 К температурного поля выбранной компоновки ампул (150 шт., 5 рядов, расположение поперечно потоку).

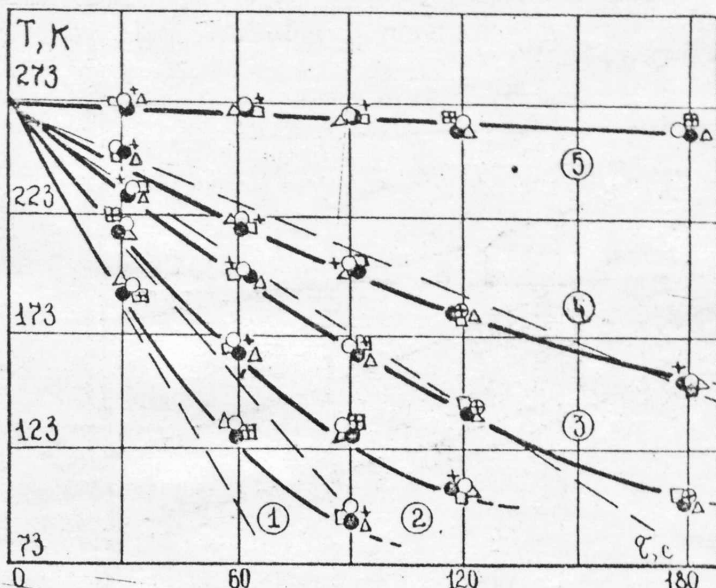


Рис. 4. Режимы охлаждения объекта

Показано, что при реализации режимов охлаждения биоматериалов, независимо от варианта функционирования, имеет место существенное изменение величины расхода охлаждающего потока, зависящее, прежде всего, от заданных режимов (программ).

Проведенное сопоставление результатов расчетов по разработанной методике и экспериментов – динамике температуры потока по длине контура (рис. 6) и расходу жидкого азота при различных вариантах функционирования, показало удовлетворительное совпадение с максимальным отклонением до 15%.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили корректность предложенной методики расчета системы программированного охлаждения, с частными вариантами функционирования. Это позволяет рекомендовать методику для оценочных расчетов динамических характеристик системы; проведения инженерных расчетов при проектировании подобных систем. Получены результаты

по охлаждению натурального биоматериала (семена быков-производителей), показавшие приемлемость методики расчета при различных режимах. Качественная оценка биоматериала соответствует уровню контрольных образцов (выживаемость в среднем 50%, показатель фертильности - 600 ± 1000 ед.).

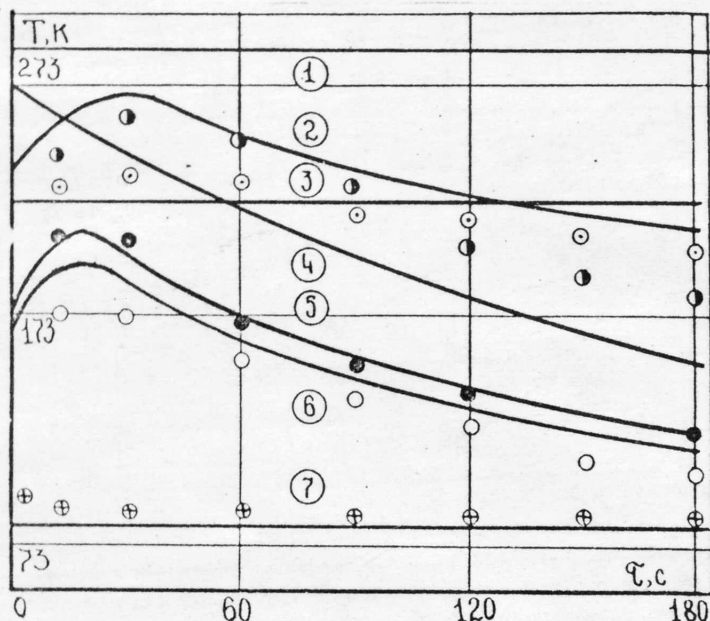


Рис. 5. Динамика температуры потока

Проведен анализ некоторых факторов, влияющих на расход системы. В частности, показано влияние конструктивного расположения и исполнения нагнетателя на экономичность системы. Выбор в качестве тепловой изоляции вакуума позволит сократить потребление жидкого азота примерно на 10%. Отмечено, что стартовые значения величин объемов жидкости и пара в емкости не влияют на динамику давления и уровня. Установлены границы применимости методики расчета - для режимов (1 ± 200) K/мин в интервале до 130 K (при линейном характере заданного режима). Выработаны рекомендации к проектированию и эксплуатации системы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предложенная система программированного охлаждения, функционирующая по геометрически замкнутому контуру, реализует необходимые режимы охлаждения в интервале до 130 К. Данная установка позволит вести процесс замораживания более экономично, чем по традиционным схемам в 2,5-3 раза за счет наиболее полного использования теплоты испарения жидкого хладагента и холода отработавших паров.

2. Дано математическое описание динамики системы, работающей по геометрически замкнутому контуру с возможными частными вариантами функционирования с учетом изменения физических свойств хладагента.

3. Создан экспериментальный стенд, позволяющий проводить исследования по программированному охлаждению в широком диапазоне скоростей и температур при различной ориентации и компоновке объекта для частных вариантов функционирования.

4. Разработана методика расчета замкнутого контура, позволяющая определить динамические характеристики системы, произвести сопоставление экономичности различных вариантов функционирования. Полученные результаты подтверждены экспериментально с максимальным отклонением до 20%. Анализ расчетных и экспериментальных результатов позволил рекомендовать к внедрению систему с любым из частных вариантов функционирования в зависимости от конкретных условий эксплуатации. При этом существенной экономии жидкого хладагента не достигается.

5. Выработаны рекомендации к проектированию и использованию систем, позволяющие автоматизировать процесс программированного охлаждения, обеспечить надежность функционирования и безопасность эксплуатации.

Содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Микулин Е.И., Антонов А.Н., Арутюнян М.П. Разработка и исследование системы для программированного охлаждения биологических материалов // Интенсификация производства и применения искусственного холода: Тезисы докладов всесоюзной научно-практической конференции. - Ленинград, 1986. - С. 69.
2. А.С. 1317251 СССР, МКИ⁴ F25D 3/10. Установка для замораживания объектов / А.Н.Антонов, М.П.Арутюнян, Ю.Г.Крейндлин,

- Е.И.Микулин, В.Ф.Турбин (СССР). - № 3883275/3I-13. Оpubл.
15.06.67. Бюлл. № 22// Открытия. Изобретения. - 1967.-
№ 22. - С. 33.
3. Положительное решение на заявку № 3863258/3I-13(051910),
подана 11.04.65.
4. Микулин Е.И., Антонов А.Н., Арутюнян М.П. Криогенная система
для программированного охлаждения различных объектов// Извест-
тия вузов. Машиностроения, 1968 . - № I. - С. 18 - 20.

Микулин

Л - 46039. Подписано к печати 14.01.1988г.

Заказ № 67 Объем I п.л. Тираж 100 экз.

Типография МВТУ им. Н.Э. Баумана.

