

Е. Г. Бычков, А. А. Жердев,  
Б. А. Макаров, А. С. Кротов

## РАЗРАБОТКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КАМЕРЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ВЫСОКУЮ СКОРОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

*Предложен метод расчета режима охлаждения объектов в рабочем объеме низкотемпературной камеры, позволяющий на этапе проработки конструкции определить, обеспечит ли выбранная схема холодильной машины заданную скорость охлаждения.*

**E-mail:** euginne\_bmstu@mail.ru

**Ключевые слова:** скорость охлаждения, низкотемпературная камера.

В настоящее время в России растет спрос на недорогие и надежные низкотемпературные камеры объемом от 100 до 1000 литров, рассчитанные на уровни температур от  $-40$  до  $-150$  °С. Одной из основных характеристик работы таких камер является скорость охлаждения, которая показывает, как изменяется температура охлаждаемой среды за единицу времени:  $v = \Delta T / \tau$ , °С/с. Важность учета данного параметра определяет широкий спектр областей применения низкотемпературных камер.

Например, в медицине и животноводстве существует необходимость хранения биоматериалов при температурах до  $-150$  °С в течение нескольких месяцев, или даже лет. Отличительной чертой охлаждения биоматериала является необходимость обеспечения определенной скорости охлаждения. Оптимальной может быть как очень низкая скорость охлаждения ( $1 \dots 5$  °С/мин), при которой не происходит резкого изменения состояния охлаждаемой теплоемкой массы, например при замораживании растений, так и очень высокая скорость (до  $10$  °С/с), при которой происходит безкристаллическое затвердевание воды в клетках без кристаллизации.

Стали шире применяться такие методы низкотемпературной термообработки деталей, как криообжиг и криозакалка. При реализации этих методов детали охлаждаются до температур ниже  $-40$  °С в зависимости от материала. Для стали скорость охлаждения при криозакалке должна обеспечить получение структуры мартенсита. Для этого скорость охлаждения должна быть больше критической скорости закалки. Если быстрого охлаждения не будет, то в стали получатся иные структуры: троостит, сорбит или перлит, и она не приобретет желаемых твердости и прочности.

В настоящей статье описан пример выбора основных параметров низкотемпературной камеры, предназначенной для низкотемпературной термообработки рабочих колес (или их заготовок) авиационных

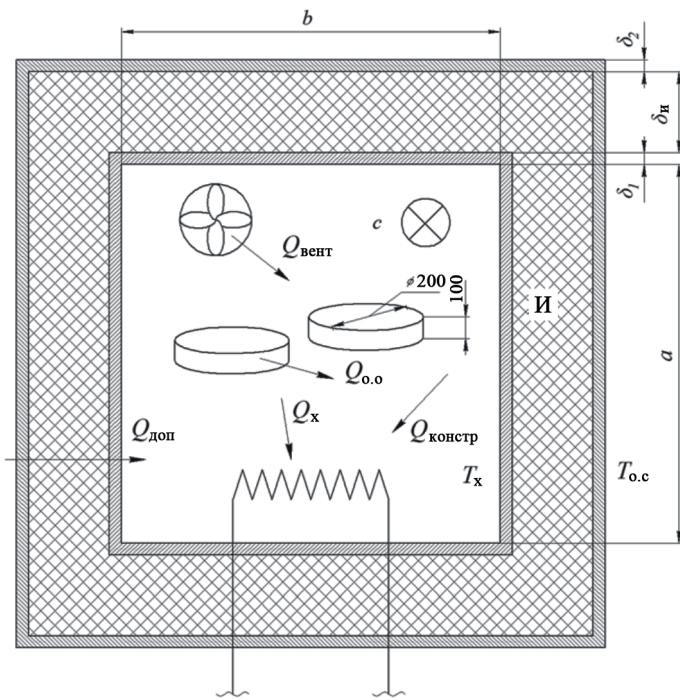
двигателей. По условиям технического задания, полученного от завода — изготовителя авиационных двигателей, стальные заготовки, массой 100 кг, расположенные в специальной клетке, должны охлаждаться до температуры  $-60^{\circ}\text{C}$  за 180 минут, не более.

В результате анализа способов охлаждения до заданного температурного уровня для разрабатываемой камеры в качестве генератора холода была выбрана парокомпрессионная холодильная машина (ПКХМ), работающая на многокомпонентной смеси хладагентов. Скорость охлаждения заготовок при этом будет зависеть от правильного выбора холодильного компрессора, рационального подбора характеристик теплообменных аппаратов и расширительных устройств, а также состава рабочего тела.

Из расчета цикла ПКХМ, работающей на смесях хладагентов, с учетом всех коэффициентов, определяющих эффективность работы ее частей, может быть получена зависимость холодопроизводительности ПКХМ от текущей температуры воздуха в рабочем объеме низкотемпературной камеры. Методика определения зависимости температуры охлаждаемых заготовок от времени при известной зависимости холодопроизводительности ПКХМ от температуры воздуха в рабочем объеме низкотемпературной камеры приведена далее.

Тепловая нагрузка на ПКХМ определяется как результат нестационарных процессов передачи теплоты в общем случае в объектах охлаждения, элементах конструкции теплоизолированного корпуса низкотемпературной камеры и на ее внешней поверхности. Точное определение тепловой нагрузки на ПКХМ требует разработки сложных физических и математических моделей нестационарных процессов передачи теплоты, учитывающих особенности конструкции конкретной низкотемпературной камеры. Авторами настоящей статьи была разработана упрощенная полуэмпирическая модель теплового состояния низкотемпературной камеры, учитывающая влияние основных тепловых потоков на тепловую нагрузку ПКХМ в нестационарных условиях ее эксплуатации.

В общем случае теплоизолированный корпус низкотемпературной камеры представляет собой трехслойную конструкцию, состоящую из внешней и внутренней металлических стенок и заключенной между ними тепловой изоляции. Передача теплоты в каждом из слоев осуществляется теплопроводностью, а на внешней и внутренней поверхностях — вследствие конвективного теплообмена. В процессе выхода на установившийся режим эксплуатации холодопроизводительность ПКХМ затрачивается на компенсацию изменяющихся теплопритоков из окружающей среды и охлаждение теплоемкой массы корпуса, теплоотдача от которой тоже меняется со временем. В качестве охлажда-



**Рис. 1. Расчетная схема теплоизолированного корпуса низкотемпературной камеры:**

И — тепловая изоляция;  $T_{о.с}$  — температура окружающей среды;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — толщина внутренней и внешней стенок;  $\delta_{и}$  — толщина тепловой изоляции;  $a$ ,  $b$  и  $c$  — длина, ширина и глубина камеры

емых объектов (заготовок) в расчете использовались цилиндры диаметром 200 мм и высотой 100 мм. Расчетная схема теплоизолированного корпуса низкотемпературной камеры представлена на рис. 1.

В общем виде уравнение теплового баланса для рабочего объема низкотемпературной камеры можно записать следующим образом:

$$\alpha_{\text{внутр}} F_{\text{внутр}} (T_{\text{ср.внутр}} - T_x) + Q_{о.о} + Q_{\text{вент}} + Q_{\text{констр}} + Q_{\text{доп}} + Q_{\text{T}} - Q_x = 0; \quad (1)$$

здесь  $\alpha_{\text{внутр}}$  — коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки к воздуху внутри рабочего объема камеры, значение которого в рамках данной работы было принято, исходя из опыта эксплуатации подобных низкотемпературных камер;  $T_{\text{ср.внутр}}$  — средняя температура внутренней стенки;  $F_{\text{внутр}}$  — площадь внутренней поверхности корпуса камеры;  $T_x$  — температура воздуха в рабочем объеме камеры;  $Q_{о.о}$  — тепловой поток, обусловленный изменением температуры находящихся в рабочем объеме камеры объектов охлаждения, определяется как

$$Q_{о.о} = \alpha_{о.о} S_{о.о} (T_{о.о} - T_x) = M_{о.о} C_{p_{о.о}} \frac{\partial T_{о.о}}{\partial \tau}, \quad (2)$$

( $\alpha_{о.о}$  — коэффициент теплоотдачи от объектов охлаждения, в данной работе принят равным коэффициенту теплоотдачи от внутренней стен-

ки к воздуху  $\alpha_{\text{внутр}}$ ;  $S_{\text{o.o}}$  — площадь наружной поверхности объектов охлаждения;  $T_{\text{o.o}}$  — температура объектов охлаждения;  $M_{\text{o.o}}$  — масса объектов охлаждения;  $C_{p_{\text{o.o}}}$  — теплоемкость объектов охлаждения);  $Q_{\text{вент}}$  — тепловой поток, эквивалентный работе циркуляционного вентилятора, значение которого берется из практики эксплуатации подобных камер;

$$Q_{\text{констр.}i} = m_i C_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \quad (3)$$

— тепловой поток, обусловленный изменением температуры элементов конструкции низкотемпературной камеры, находящихся в ее рабочем объеме (перегородок подвесов и т.п.) ( $m_i$ ,  $C_{pi}$  — масса и теплоемкость элемента конструкции);

$$Q_{\text{доп}} = \kappa (T_{\text{o.c}} - T_x) \quad (4)$$

— дополнительный тепловой поток из окружающей среды, обусловленный инфильтрацией воздуха через уплотнение дверного проема и теплопритоками через тепловые мосты. В первом приближении его можно принять пропорциональным разности температур окружающей среды и температуры воздуха в рабочем объеме низкотемпературной камеры ( $\kappa$  — коэффициент пропорциональности);  $Q_T$  — тепловой поток, обусловленный внутренними тепловыделениями при их наличии (в данной работе данные тепловыделения не учитывались).

Ранее<sup>1</sup> была описана методика расчетного определения зависимости  $T_{\text{ср.внутр}}$  от  $T_x$  в нестационарном процессе охлаждения низкотемпературной камеры, основанная на математическом моделировании процессов теплоотдачи на внешней и внутренней поверхностях корпуса камеры и теплопроводности по его толщине. Эта методика использовалась в сочетании с зависимостями, описывающими теплообмен с объектами охлаждения и дополнительные теплопритоки.

Теплопроводность внутри данных объектов принималась идеальной, т.е. температура всех их внутренних точек полагалась одинаковой.

На этапе выбора основных параметров проектируемой низкотемпературной камеры сложно определить с наличием тех или иных элементов конструкции в рабочем объеме и, соответственно, как-то задать условия теплообмена на их поверхности. Из опыта конструирования подобных камер можно лишь ориентировочно оценить их массу. Поэтому в настоящей работе для учета влияния теплового потока  $Q_{\text{констр}}$  было принято, что скорость изменения температуры элементов конструкции равна скорости изменения температуры объектов

<sup>1</sup>Макаров Б. А., Кротов А. С., Жердев А. А. Математическое моделирование динамических тепловых характеристик холодильной камеры // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2010. – Спец. вып. Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения. – С. 147–154.

охлаждения:

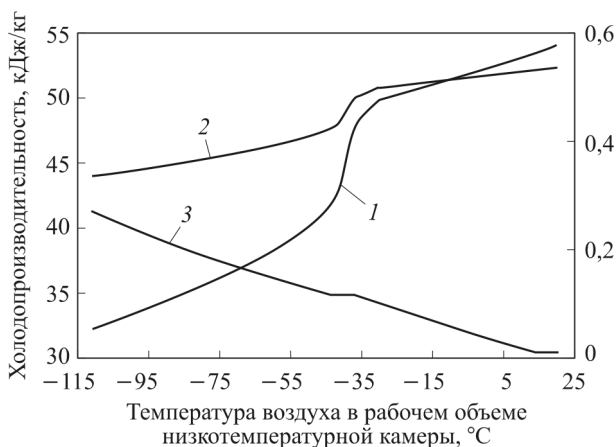
$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial T_{o.o}}{\partial \tau}. \quad (5)$$

В качестве допущения предполагалось, что данный коэффициент является постоянной величиной и не зависит от скорости охлаждения рабочего объема низкотемпературной камеры, определяется по теории подобия для аналогичных низкотемпературных камер, для которых он ранее получен экспериментально.

Таким образом, совместное решение уравнений (1)–(5) при известной зависимости холодопроизводительности  $Q_x$  от температуры воздуха в рабочем объеме камеры  $T_x$  и принятых допущениях позволит нам определить зависимость температуры охлаждаемых объектов от времени.

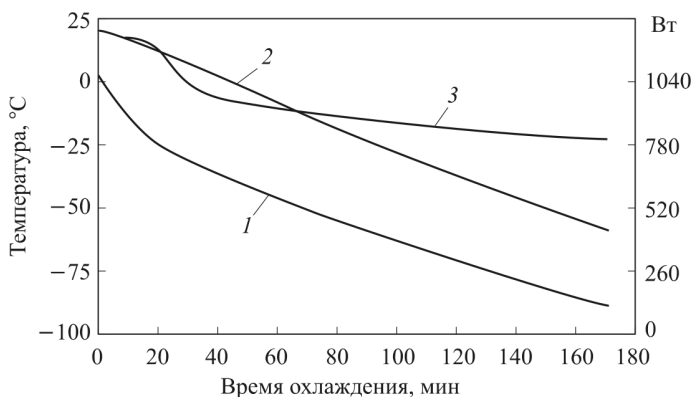
В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости удельной холодопроизводительности, холодильного коэффициента и термодинамического КПД от текущей температуры воздуха в рабочем объеме проектируемой низкотемпературной камеры, полученные из расчета выбранного цикла ПКХМ на смесях хладагентов. На рис. 3 приведена зависимость производительности холодильной машины (уже с учетом объемной производительности выбранного компрессора), работающей по данному циклу, а также температуры воздуха в рабочем объеме камеры и температуры охлаждаемых объектов от времени работы холодильной машины.

Резкое изменение удельной холодопроизводительности (см. рис. 2) связано с особенностями рассчитываемого цикла — регенеративного дроссельного цикла на многокомпонентной смеси хладагентов. Удельная холодопроизводительность такого цикла без учета потерь будет



**Рис. 2. Динамические характеристики ХМ в зависимости от температуры термостатирования:**

1 — удельная холодопроизводительность; 2 — холодильный коэффициент; 3 — термодинамический КПД



**Рис. 3. Изменение температуры и производительности ХМ в зависимости от времени захлаживания:**

1 — температура в камере, °C; 2 — температура теплоемкой массы; 3 — холодопроизводительность, Вт

равна разности энтальпий на концах используемого в цикле регенеративного теплообменника, т.е. минимальному удельному дроссель-эффекту в диапазоне температур от  $T_{oc}$  до  $T_x$ . Для рассматриваемой смеси по результатам расчета цикла при температуре воздуха в камере ниже  $-40^{\circ}C$  удельный дроссель-эффект перестает меняться, и дальнейшее уменьшение удельной холодопроизводительности связано только с увеличением потерь в теплообменных аппаратах. На рис. 3 резкое изменение характеристик незаметно вследствие высокой инерционности, так как масса загруженных охлаждаемых объектов значительна.

Как следует из графиков (см. рис. 3), температура охлаждаемых объектов достигла температуры  $-60^{\circ}C$  за 165 минут при температуре воздуха в камере  $-90^{\circ}C$ , что соответствует техническому заданию. Следовательно, производительности выбранной холодильной машины вполне достаточно, чтобы удовлетворить требованиям технического задания.

**Вывод:** Описанная методика позволяет на этапе проработки конструкции низкотемпературной камеры определить, обеспечит ли выбранная схема холодильной машины с определенными параметрами заданный режим охлаждения объектов в рабочем объеме низкотемпературной камеры.

Статья поступила в редакцию 27.09.2012