

Научная статья/Research article

УДК621.564

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-298-311

Игорь Алексеевич Короткий^{1✉}, Андрей Васильевич Усов², Елена Валерьевна Короткая³, Александр Николаевич Расщепкин⁴

^{1,2,3,4}Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

¹krot69@mail.ru

²usov-kemtipp@rambler.ru

³lena_short@mail.ru

⁴technoholod@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СМЕСИ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ

Цель исследований – разработка схемы низкотемпературной системы и проработка холодильной установки с каскадной системой охлаждения на смеси холодильных агентов R134a/R23 для обеспечения температурного режима до -70 °С в охлаждаемом объеме. Назначение низкотемпературной системы – исследование процессов холодильной обработки и низкотемпературного хранения пищевых продуктов и материалов, ферментно-эндокринного сырья, а также климатических испытаний материалов, механических устройств и технологических жидкостей. Исследования проводились на базе научно-образовательного центра «Холодильная, криогенная техника и технологии» ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет». По результатам конструктивной проработки был изготовлен экспериментальный образец низкотемпературной системы, реализованный в виде ларя с охлаждаемым объемом 360 л. Представлена принципиальная, конструктивная схема, внешний вид каскадной низкотемпературной системы, работающей на смеси холодильных агентов R134a/R23. Доказана работоспособность и эффективность предложенного исполнения низкотемпературной системы. Подобрано соотношение компонентов массовых долей в смеси холодильных агентов – 70 % для R134a и 30 % для R23. Данное соотношение обеспечивает необходимую холодопроизводительность низкотемпературной системы при температуре кипения холодильного агента в испарителе -80 °С, позволяющую обеспечить выход ее на температурный режим в течение заданного временного интервала 3 ч при избыточном давлении нагнетания холодильного агента менее 14 атм. Проведены испытания холодильной установки. Приведены результаты испытаний. Низкотемпературная система обеспечивает выход на температурный режим -70 °С за 3 ч. При этом уровень рабочих температур и давлений обеспечивает стабильную работу установки в течение продолжительного времени. Представленное конструктивное решение может быть использовано для низкотемпературной обработки и низкотемпературного хранения материалов при температуре в охлаждаемом объеме до -70 °С. Эффективно для применения в биотехнологическом, фармацевтическом производстве, а также для климатических испытаний различных устройств и материалов.

Ключевые слова: каскадная холодильная машина, смесевый холодильный агент, низкотемпературная холодильная машина, холодопроизводящая система

Для цитирования: Короткий И.А., Усов А.В., Короткая Е.В., и др. Разработка и испытание каскадной системы охлаждения на смеси холодильных агентов // Вестник КрасГАУ. 2026. № 2. С. 298–311. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-298-311.

Igor Alekseevich Korotkiy^{1✉}, Andrey Vasilyevich Usov², Elena Valeryevna Korotkaya³,
Alexander Nikolaevich Rasshchepkin⁴

1,2,3,4Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

¹krot69@mail.ru

²usov-kemtipp@rambler.ru

³lena_short@mail.ru

⁴technoholod@mail.ru

DEVELOPING AND TESTING A CASCADE COOLING SYSTEM USING A REFRIGERANTS MIXTURE

The objective of research is to develop a low-temperature system and to test a refrigeration unit with a cascade cooling system using a mixture of refrigerants R134a/R23 to provide temperatures down to -70 °C in the cooled volume. The purpose of the low-temperature system is to study the processes of refrigeration treatment and low-temperature storage of food products and materials, enzyme-endocrine raw materials, as well as climatic tests of materials, mechanical devices, and process fluids. Research was conducted at the Scientific and Educational Center Refrigeration, Cryogenic Engineering and Technology of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Kemerovo State University. Based on the design development results, an experimental prototype of the low-temperature system was manufactured, implemented in the form of a chest with a cooled volume of 360 liters. The fundamental, design diagram, and external appearance of the cascade low-temperature system operating on a mixture of refrigerants R134a/R23 are presented. The operability and efficiency of the proposed design of the low-temperature system are proven. The ratio of mass fractions of components in the mixture of refrigerants was selected: 70 % for R134a and 30 % for R23. This ratio ensures the required cooling capacity of the low-temperature system at a refrigerant boiling point in the evaporator of -80 °C, allowing it to reach the specified temperature within a specified time interval of 3 hours at an excess refrigerant discharge pressure of less than 14 atm. The refrigeration unit has been tested. The test results are presented. The low-temperature system reaches a temperature of -70 °C within 3 hours. Moreover, the operating temperatures and pressures ensure stable operation of the unit over an extended period. The presented design solution can be used for low-temperature processing and low-temperature storage of materials at temperatures in the cooled volume down to -70 °C. It is effective for use in biotechnology and pharmaceutical production, as well as for climatic testing of various devices and materials.

Keywords: cascade refrigeration machine, mixed refrigerant, low-temperature refrigeration machine, refrigeration system

For citation: Korotkiy IA, Usov AV, Korotkaya EV, et al. Developing and testing a cascade cooling system using a refrigerants mixture. *Bulletin of KSAU*. 2026;(2):298-311. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-298-311.

Введение. Использование в технологических процессах пищевой, перерабатывающей отраслях промышленности температурных уровней ниже -60 °C (что для данных отраслей производства является ультранизким температурным уровнем) зачастую является критическим фактором, определяющим сохранение и модификацию ключевых качественных характеристик продукции. Данный температурный диапазон обеспечивает подавление деструктивных биохимических и физических процессов, что напрямую влияет на функциональность, безопасность и стабильность конечного продукта.

В пищевой промышленности при низкотемпературной обработке быстрое охлаждение до

ультранизких температур минимизирует образование макрокристаллов льда за счет витрификации внутриклеточной жидкости. Это сохраняет целостность клеточных мембран [1].

Проведение быстрого замораживания мышечной ткани тунца при температурах ниже -60 °C обеспечивает ингибирование биохимических и ферментативных процессов на клеточном уровне, включая окисление железосодержащих белков – гемоглобина и миоглобина [2]. Данный механизм предотвращает образование метмиоглобина, ответственного за появление нежелательных коричневатых оттенков в мышечных волокнах. Как следствие, продукция, подвергнутая низкотемпературной обработке и

хранению при указанных температурах, демонстрирует стабильность цветовых показателей в течение всего периода хранения, а также после размораживания, что подтверждается сохранением исходных значений параметра «а» (краснота) в CIE Lab на уровне 90–95 % от контрольных образцов [3].

Применение ультранизкотемпературного замораживания для ягодных культур помимо формирования микрокристаллической структуры льда подавляет активность полифенолоксидаз и пероксидаз, ответственных за ферментативное потемнение тканей, а также замедляет окисление фенольных соединений, включая антоцианы [4]. В результате сохраняется не только структурная целостность ягод, но и их биохимический профиль: содержание витамина С и антиоксидантов остается на уровне 85–92 % от исходных значений даже после 18 месяцев хранения [5].

Ультранизкие температуры ингибируют ферментативную активность и рост микроорганизмов, что подтверждается кинетическими моделями микробного метаболизма [6].

Криоконсервирование генетического материала, семян, эмбрионов обеспечивает генетическую стабильность и длительную жизнеспособность этих биологических объектов [7]. Предварительная адаптация образцов к низким температурам снижает риски криповреждений за счет синтеза криопротекторных белков [8]. Для этого используется многоступенчатое замораживание: первичная стабилизация при $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем переход к $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это позволяет избежать фазовых переходов, разрушающих клеточные органеллы [9].

В технике искусственного холода для получения температурного уровня от -60 до $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ наилучшим решением с точки зрения энергетической эффективности, экономических и массогабаритных показателей технологического оборудования являются каскадные низкотемпературные системы [10]. Конструктивной особенностью классической каскадной низкотемпературной системы и принципиальным отличием ее от многоступенчатой холодильной машины является то, что каскадная низкотемпературная система представляет собой совокупность одноступенчатых, условно независимых холодильных машин [11]. Эти холодильные машины называют ветвями каскада. Рабочими телами различных ветвей каскада являются различные

холодильные агенты. Взаимодействие рабочих тел различных ветвей каскада происходит в теплообменных аппаратах, называемых испарителями-конденсаторами [12]. За счет теплового взаимодействия в испарителях-конденсаторах происходит конденсация рабочего тела нижней ветви каскада при испарении холодильного агента верхней ветви каскада.

В классической каскадной низкотемпературной системе смешение холодильных агентов различных ветвей каскада не происходит [13–15]. Принципиальная схема и цикл каскадной холодильной машины с двумя ветвями каскада приведены на рисунке 1.

Реальная классическая схема и цикл каскадной холодильной машины представлены на рисунке 2. Отличия от теоретической схемы заключаются в активном использовании рекуперации теплоты для повышения термодинамической эффективности каскадной холодильной машины [16, 17].

В каскадных низкотемпературных системах в испарителях-конденсаторах имеет место снижение термодинамической эффективности из-за дополнительных термических сопротивлений теплообмену между холодильными агентами ветвей различного уровня. Однако применение каскадных холодильных машин в указанном диапазоне рабочих температур оказывается энергетически более выгодным по сравнению с многоступенчатыми холодильными машинами [18]. Это обусловлено тем, что на нижних ветвях каскада используются рабочие вещества высокого давления, имеющие при низких рабочих температурах значительно более высокие давления и, соответственно, меньшие удельные объемы [19]. Это обеспечивает значительно большую холодопроизводительность компрессора при меньших объемных характеристиках. Также более высокие давления всасывания в компрессоре нижней ветви приводят к уменьшению потерь давления в клапанах, что также способствует увеличению производительности компрессора [20]. Однако применение для достижения одного температурного уровня несколько фактически независимых холодильных машин, реализующих ступенчатое понижение температурного уровня до заданного значения, усложняет конструкцию и эксплуатацию низкотемпературной каскадной системы и, соответственно, снижает ее надежность [21].

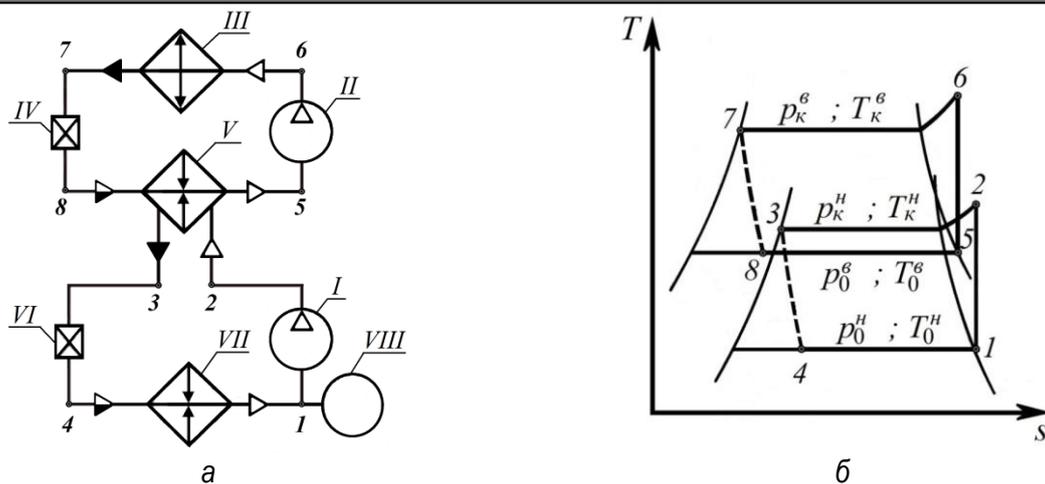


Рис. 1. Схема (а) и цикл в T - s координатах (б) каскадной холодильной машины без регенерации теплоты: 1–4 – узловые точки цикла нижней ветви каскада; 5–8 – узловые точки цикла верхней ветви каскада; I – компрессор нижней ветви каскада; II – компрессор верхней ветви каскада; III – конденсатор; IV – дроссельное устройство верхней ветви каскада; V – испаритель-конденсатор; VI – дроссельное устройство нижней ветви каскада; VII – испаритель; VIII – расширительная емкость

Scheme (a) and cycle in T - s coordinates (б) of a cascade refrigeration machine without heat regeneration: 1–4 – nodal points of the cycle of the lower branch of the cascade; 5–8 – nodal points of the cycle of the upper branch of the cascade; I – compressor of the lower branch of the cascade; II – compressor of the upper branch of the cascade; III – condenser; IV – throttle device of the upper branch of the cascade; V – evaporator-condenser; VI – throttle device of the lower branch of the cascade; VII – evaporator; VIII – expansion tank

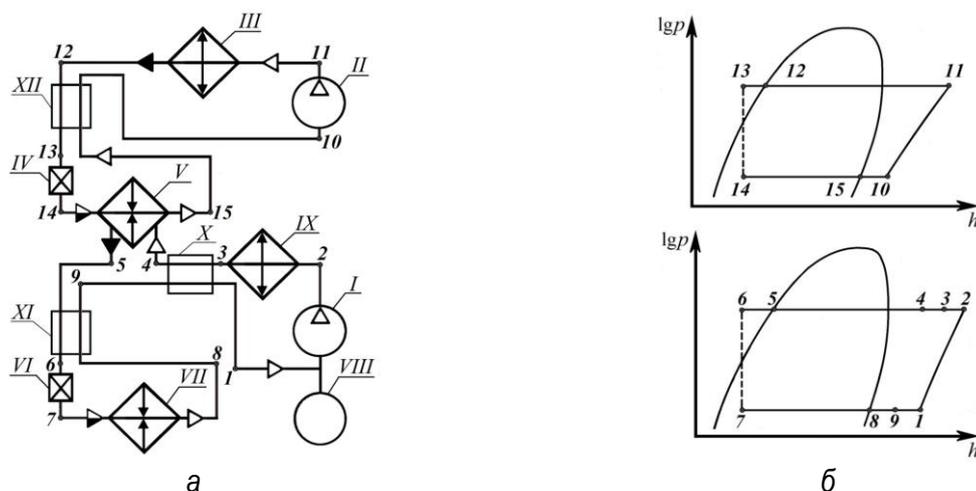


Рис. 2. Схема (а) и цикл в $\lg p$ - h координатах (б) действительной каскадной холодильной машины с регенерацией теплоты. 1–9 – узловые точки цикла нижней ветви каскада; 10–15 – узловые точки цикла верхней ветви каскада; I – компрессор нижней ветви каскада; II – компрессор верхней ветви каскада; III – конденсатор; IV – дроссельное устройство верхней ветви каскада; V – испаритель-конденсатор; VI – дроссельное устройство нижней ветви каскада; VII – испаритель; VIII – расширительная емкость; IX–XII – рекуператоры теплоты

Schematic (a) and cycle in $\lg p$ - h coordinates (б) of a real cascade refrigeration machine with heat recovery. 1–9 – nodal points of the cycle of the lower branch of the cascade; 10–15 – nodal points of the cycle of the upper branch of the cascade; I – compressor of the lower branch of the cascade; II – compressor of the upper branch of the cascade; III – condenser; IV – throttle device of the upper branch of the cascade; V – evaporator-condenser; VI – throttle device of the lower branch of the cascade; VII – evaporator; VIII – expansion tank; IX–XII – heat recuperators

В последнее время появились схемы и техническая реализация каскадных низкотемпературных систем на смесевых холодильных агентах с одним компрессором [22]. Использование в качестве холодильного агента смеси двух компонентов, имеющих значительные различия в давлениях насыщения при равных температурах, позволяет разделять эти компоненты после сжатия в компрессоре и реализовывать в дальнейшем классический вариант работы каскадного цикла [23].

Цель исследования – разработка каскадной низкотемпературной системы на смеси холодильных агентов R23/R134a, а также проверка его работоспособности.

Объекты и методы. Принципиальная схема низкотемпературной холодильной машины, работающей на смеси холодильных агентов, представлена на рисунке 3 [24].

В качестве холодильного агента выбрана смесь R134a, которая представляет собой высокотемпературный компонент смеси [25], и R23, представляющая собой низкотемператур-

ный компонент смеси [26]. По большому счету низкотемпературная система представляет собой каскадную холодильную машину, гидравлический контур которой заполнен двумя холодильными агентами в определенной пропорции [27]. По части гидравлического контура холодильные агенты перемещаются совместно в виде смеси. Затем они разделяются и выполняют заданные функции, затем вновь смешиваются.

Компрессор 4 сжимает смесь низкотемпературного и высокотемпературного компонента. Давление нагнетания определяется соотношением компонентов. Кроме того, соотношение компонентов определяет температуру нагнетаемого холодильного агента. Для поддержания приемлемого давления нагнетания (11–14 бар) при использовании конденсатора воздушного типа и температуре окружающей среды до 27 °С соотношение компонентов R134a/R23 должно составлять порядка 70 : 30 %. При таком соотношении температура нагнетаемого пара составляет менее 120 °С.

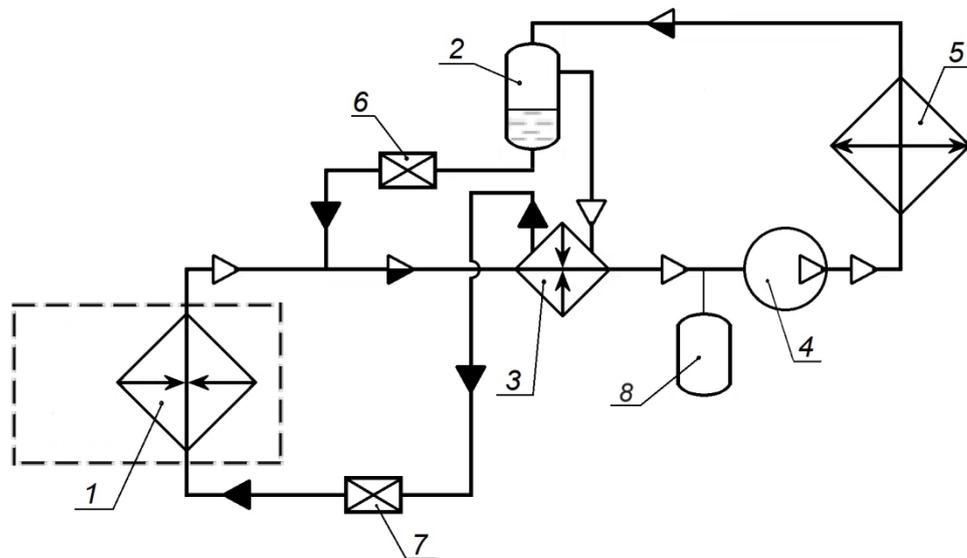


Рис. 3. Принципиальная схема холодильной установки, работающей на смеси хладагентов:
 1 – испаритель низкотемпературного хладагента; 2 – отделитель жидкого (высокотемпературного) от газообразного (низкотемпературного) хладагента;
 3 – конденсатор-испаритель; 4 – компрессор; 5 – конденсатор высокотемпературного хладагента; 6 – дроссельное устройство высокотемпературного хладагента;
 7 – дроссельные устройства низкотемпературного хладагента; 8 – расширительная емкость

Schematic diagram of a refrigeration unit operating on a mixture of refrigerants:
 1 – low-temperature refrigerant evaporator; 2 – liquid (high-temperature) refrigerant separator from gaseous (low-temperature) refrigerant; 3 – condenser-evaporator; 4 – compressor;
 5 – high-temperature refrigerant condenser; 6 – high-temperature refrigerant throttling device;
 7 – low-temperature refrigerant throttling devices; 8 – expansion tank

Из компрессора пары холодильного агента нагнетаются в конденсатор высокотемпературного холодильного агента 5, где смесь охлаждается и высокотемпературный холодильный агент (R134a) конденсируется. Далее смесь жидкого высокотемпературного компонента (R134a) и газообразного низкотемпературного компонента (R23) направляется в отделитель жидкого высокотемпературного компонента 2. Жидкий высокотемпературный компонент затем дросселируется в дроссельном устройстве 6 до давления всасывания и смешивается с обратным потоком парообразного низкотемпературного компонента, идущего из испарителя 1. Далее эта низкотемпературная смесь поступает в конденсатор-испаритель 3. Так же в элемент 3 поступает из элемента 2 низкотемпературный холодильный агент в парообразном состоянии, имеющий температуру, близкую к температуре окружающей среды. В конденсаторе-испарителе происходит теплообмен между потоками холодильных агентов, находящихся при различных

давлениях и температурах. В результате низкотемпературный холодильный агент конденсируется при давлении нагнетания, а высокотемпературный холодильный агент, находящийся при давлении всасывания, испаряется. Далее смесь холодильных агентов в парообразном состоянии поступает на всасывание в компрессор 4, а жидкий низкокипящий компонент дросселируется в дроссельном устройстве 7 до давления всасывания, при этом температура его соответствующим образом понижается. Из дроссельного устройства 7 низкотемпературный холодильный агент поступает в испаритель 1, установленный в охлаждаемом объеме. Смесь холодильных агентов R134a и R23 способна создать температурный уровень в охлаждаемом объеме до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [28, 29].

Результаты и их обсуждение. Разработали низкотемпературный ларь, холодоснабжение которого реализуется посредством каскадной холодильной машины на смесевом холодильном агенте (рис. 4.).

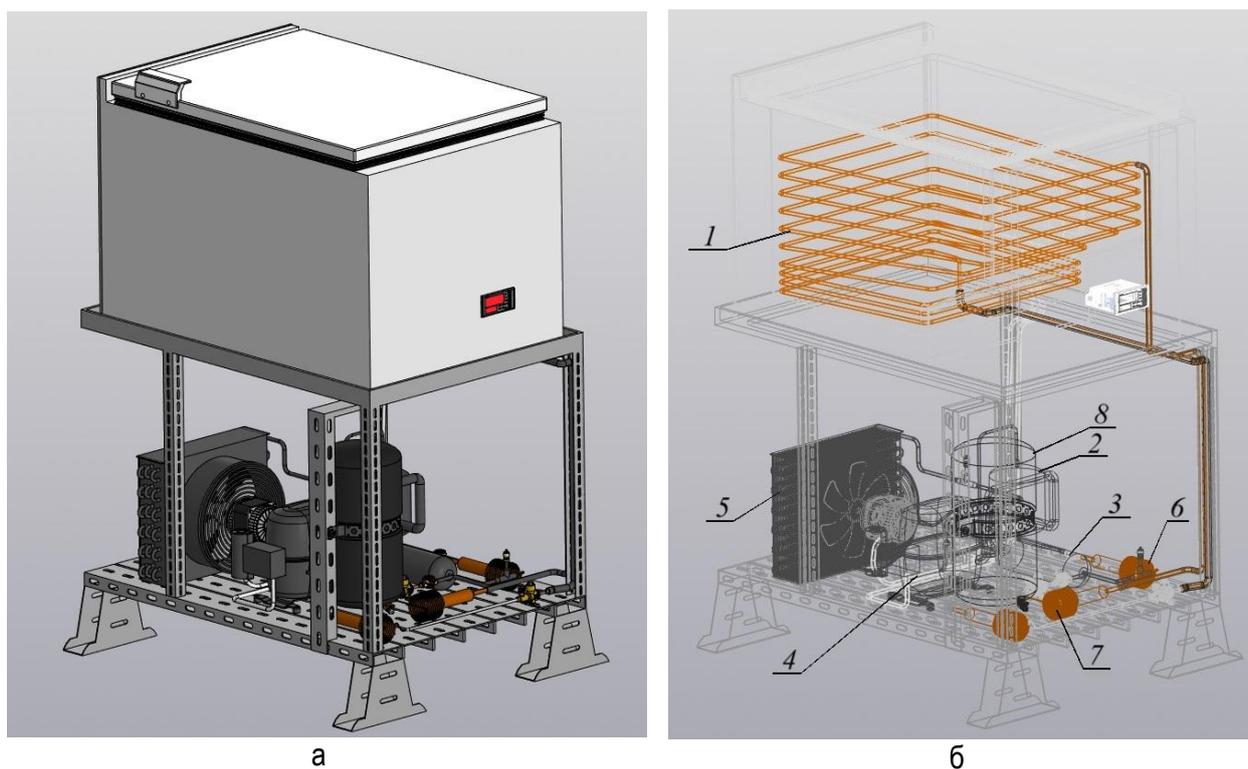


Рис. 4. 3D модель низкотемпературного ларя на смеси холодильных агентов R134a/R23
а – внешний вид ларя; б – расположение элементов системы холодоснабжения
в соответствии с рис. 3

3D model of a low-temperature chest refrigerant R134a/R23 mixture
а – external appearance of the chest; б – arrangement of the elements of the refrigeration system
in accordance with Fig. 3

Низкотемпературную систему, принципиальная схема которой представлена на рисунке 3, 3D модель которой представлена на рисунке 4, выполнили в виде низкотемпературного холодильного ларя, вид которого представлен на рисунке 5.

В качестве компрессора использовался герметичный поршневой компрессор Cubigel GX18TB, заправленный штатным маслом. Никаких доработок и модернизаций с компрессором не производились. В систему заправлялась смесь холодильных агентов R134a/R23 в соотношении 70 : 30. Низкокипящий холодильный агент – R23 является холодильным агентом высокого давления. Поэтому во время стоянки в теплом помещении, когда температура всех элементов низкотемпературной системы будет соответствовать температуре воздуха в помещении, давление низкокипящего компонента значительно возрастет. Критическая температура R23 составляет 25,7 °С, а критическое давление 48 атм. Для того чтобы обеспечить сохранность трубопроводов, паяных и резьбовых соединений, аппаратов низкотемпературной системы, запорной и защитной арматуры, а

также для того, чтобы облегчить запуск компрессора, необходимо обеспечить уровень избыточного давления в системе не выше 10–14 атм. Поэтому в контуре циркуляции холодильного агента перед всасыванием в компрессор предусматривают расширительную емкость, объем которой подбирается исходя из общего объема системы таким образом, чтобы во время длительной стоянки давление смеси холодильных агентов не превысило рекомендуемых значений.

Габаритные размеры холодильной камеры: 1200 × 500 × 600 мм, внутренний объем 360 л. Для испарителя использована труба диаметром 8 мм длиной 23 м. Объем испарителя составляет 0,29 л.

Измеритель-регулятор микропроцессорный 2TRM1 совместно с первичными преобразователями (датчиками) предназначен для измерения и регулирования температуры в рабочем объеме низкотемпературной системы.

Холодильная установка оснащена конденсатором воздушного охлаждения с принудительной циркуляцией охлаждающего воздуха.



Рис. 5. Внешний вид ларя с каскадной низкотемпературной системой на смеси холодильных агентов

External view of a chest with a cascade low-temperature system using a mixture of refrigerants

Отделитель жидкости в одноступенчатой холодильной установке, работающей на смеси холодильных агентов, предназначен для разделения фаз сконденсированного хладагента R134a и газообразного R23.

Конденсатор-испаритель в данной установке предназначен для конденсации холодильного агента R23 за счет кипения хладагента R134a. При проектировании компоновки холодильной установки было принято решение изготовить конденсатор-испаритель змеевикового типа.

В рамках экспериментальных исследований была проведена серия испытаний низкотемпературной холодильной установки, выполненной в виде низкотемпературного холодильного ларя, работающей на двухкомпонентной смеси холодильных агентов (R134a/R23). Основной целью работы являлась оценка эффективности системы при достижении температурного уровня $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже в охлаждаемом объеме. В ходе экспериментов осуществляли мониторинг следующих параметров:

- температура воздуха в центральной части охлаждаемого объема;
- температура холодильного агента после дроссельного устройства на входе в испаритель низкотемпературного контура;
- температура холодильного агента на выходе из испарителя низкотемпературного контура.

Измерения температур производили с помощью измерительного комплекса, включающего:

- хромель-копелевые термоэлектрические преобразователи (ТХК (тип L) в соответствии с ГОСТ Р 8.585-2001), установленные в медных гильзах с теплопроводящей пастой КПТ-8;
- контроллер ТРМ-136 с диапазоном измерений $-200\text{...}800\text{ }^{\circ}\text{C}$, пределы допускаемой основной приведенной погрешности измерения

температуры, в соответствии с ГОСТ Р 6651 составляют 0,25 %;

– преобразователь интерфейса AC-4, обеспечивающий передачу данных по протоколу Modbus RTU;

– специализированное программное обеспечение «Овен Термограф» версии 3.2.1 с частотой дискретизации 1 Гц.

Критерием эффективности испытаний являлось достижение заданной температуры воздуха в охлаждаемом объеме в течение временного интервала до 3 ч, а также поддержание величины избыточного давления нагнетания в холодильнопроизводящей системе не выше 14 атм. Наилучшим образом выполнение критериев эффективности обеспечивалось при 70 % массовой доли низкотемпературного (R23) и 30 % массовой доли высокотемпературного (R134a) холодильных агентов.

Результаты испытаний применительно к температурам, получаемым в охлаждаемом объеме, температуре холодильного агента после дроссельного устройства низкотемпературного холодильного агента и температуре холодильного агента после испарителя приведены на рисунке 6.

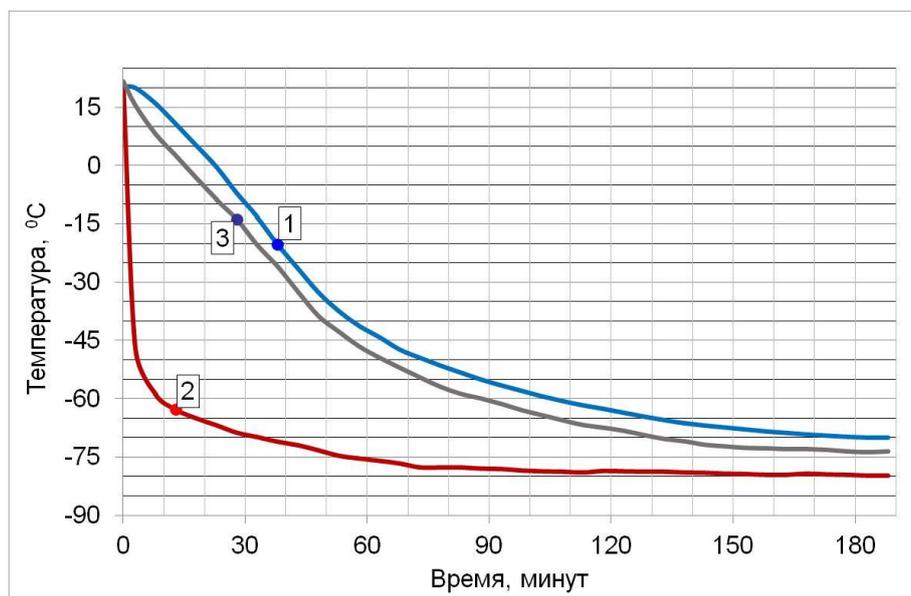


Рис. 6. Уровень температур, создаваемый в низкотемпературной системе на смешанном холодильном агенте: 1 – температура в охлаждаемом объеме; 2 – температура холодильного агента на входе в испаритель низкотемпературного холодильного агента; 3 – температура холодильного агента на выходе из низкотемпературного испарителя
 Temperature level created in a low-temperature system with mixed refrigerant: 1 – temperature in the cooled volume; 2 – temperature of the refrigerant at the inlet to the evaporator of the low-temperature refrigerant; 3 – temperature of the refrigerant at the outlet of the low-temperature evaporator

В процессе эксплуатации низкотемпературных систем важными контролируемыми параметрами, определяющими эффективность и надежность работы оборудования, являются температура нагнетаемого газа, а также давления всасывания и нагнетания, создаваемые компрессором. Мониторинг данных величин позволяет оценить энергетические потери, степень сжатия холодильного агента, а также выявить риски перегрева, надежности и долговечности работы компрессора.

Давления измерялись аналоговым манометрическим коллектором BM2-6-DS-CLIM Refco с диапазоном $-1...25$ бар для давления всасывания и $-1...40$ бар для давления нагнетания. Точность прибора $\pm 0,5\%$ относительно полной шкалы. Показания регистрировались в избыточных величинах (относительно атмосферного давления) с частотой 1 раз/5 мин.

Результаты измерений температуры нагнетания представлены на рисунке 7. Результаты измерения давлений приведены на рисунке 8.

В ходе проведенных испытаний холодильная установка была выведена на установившийся режим в течение 180 мин. Температура в рабочем объеме за этот период времени составила $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом температура холодильного

агента после дроссельного устройства составила $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура холодильного агента на выходе из испарителя составила $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура нагнетания составила $117\text{ }^{\circ}\text{C}$. Этот уровень температур наблюдался короткий период времени на 42–45-й мин работы низкотемпературной системы. В установившемся режиме работы температура нагнетания составила $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура воздуха в помещении, в котором производились исследования, составляла $24\text{--}26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рабочие давления в низкотемпературной системе в установившемся режиме работы, измеренные с помощью мановакуумметра составляли: давление всасывания смеси $-0,1$ атм., давление нагнетания $12,1$ атм. При выходе на рабочий режим давление всасывания оставалось относительно стабильным – колебания давлений не выходили за диапазон $-0,2...-0,1$ атм. Давление нагнетания колебалось в значительно большем диапазоне – до 43-й мин наблюдался устойчивый рост давления нагнетания до величины $14,1$ атм. После 48-й мин постепенное снижение давления нагнетания и стабилизация его на уровне $12,1$ атм. на 178-й мин опыта.

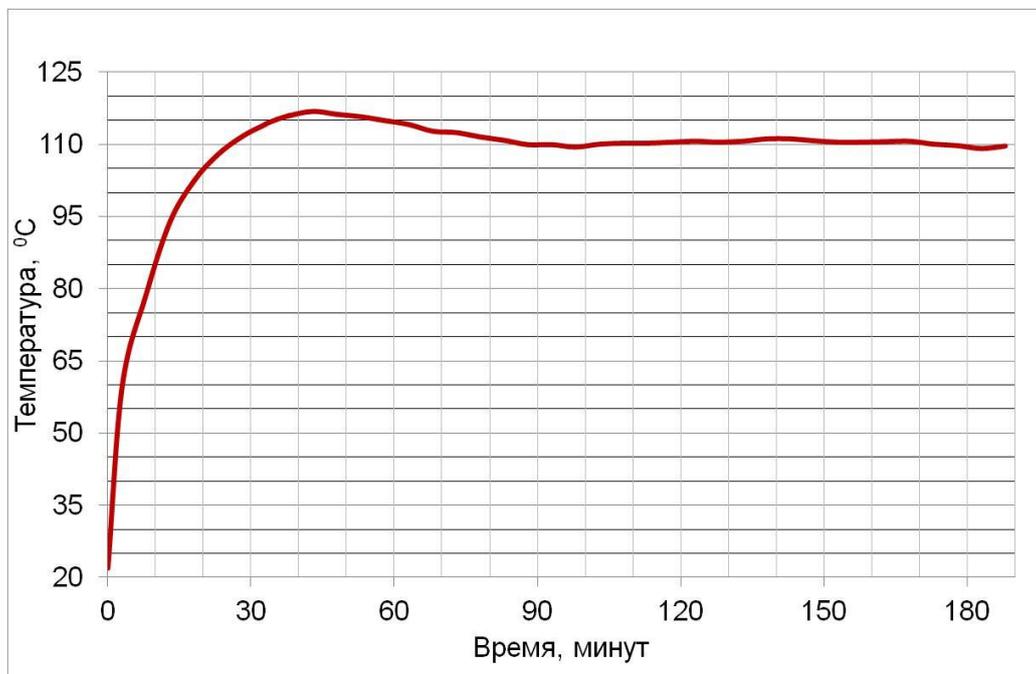


Рис. 7. Температура нагнетания холодильного агента на выходе из компрессора
Compressor discharge temperature of the refrigerant

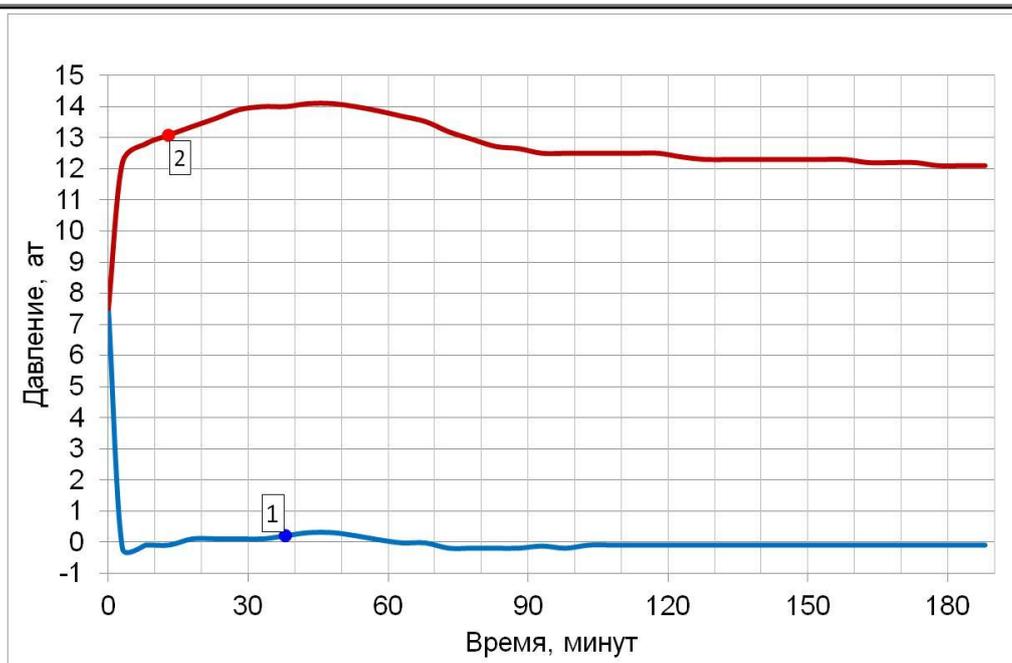


Рис. 8. Давления холодильного агента, создаваемые низкотемпературной системой на смесивом холодильном агенте: 1 – давление смесивого холодильного агента на всасывании в компрессор; 2 – давление смесивого холодильного агента на нагнетании
 Refrigerant pressures created by a low-temperature system with mixed refrigerant: 1 – pressure of mixed refrigerant at compressor suction; 2 – pressure of mixed refrigerant at discharge

Заключение. В рамках проведенной работы была разработана схема и конструкция низкотемпературной холодопроизводящей системы, ориентированной на достижение температурного уровня в охлаждаемом объеме $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Достижение требуемого уровня температуры обеспечивается холодильной машиной с одноступенчатым сжатием двухкомпонентного смесивого холодильного агента. В качестве низкотемпературного компонента использовали R23 (трифторметан), в качестве высокотемпературного компонента использовали R134a (1,1,1,2-тетрафторэтан). Основой низкотемпературной системы является двухконтурный каскадный цикл, включающий высокотемпературный (R134a) и низкотемпературный (R23) контуры, соединенные через промежуточный теплообменник. В холодильной машине производится разделение компонентов, их каскадное дросселирование и охлаждение.

Ключевым этапом стало определение оптимального соотношения компонентов смеси R134a/R23. В ходе исследований, включавших термодинамическое моделирование, было установлено, что массовая доля R134a в 70 % и R23 в 30 % обеспечивает:

- снижение абсолютного давления нагнетания до 15 бар (при температуре в охлаждаемом объеме $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$), что исключает риски механических перегрузок;

- обеспечение температуры кипения R23 в испарителе низкотемпературного контура $-82\text{ }^{\circ}\text{C}$ при абсолютном давлении всасывания в компрессор не ниже 0,8 бар, что является необходимым условием для получения температуры воздуха в охлаждаемом объеме требуемого уровня ($-70\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Экспериментально подтверждено, что данное соотношение минимизирует явление температурного глайда в испарителе, характерное для неазеотропных смесей. Дополнительным преимуществом выбранной композиции стала экологическая безопасность: потенциал озоноразрушения (ODP) смеси равен 0, а потенциал глобального потепления (GWP) составляет 1430, что соответствует современным конструктивным требованиям.

Начальная температура всех элементов низкотемпературной системы соответствовала температуре окружающей среды и составляла $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Продолжительность выхода низкотемпературной системы на температурный режим в охлаждаемом объеме $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ занял 180 мин при

средней скорости охлаждения 0,5 °С/мин. Максимальная температура нагнетания при испытаниях не превышала 118 °С, что на 15 % ниже предельно допустимого значения для используемого компрессора (140 °С). После выхода установки на режим избыточное давление нагнетания стабилизировалось на уровне 12,8 атм., избыточное давление всасывания стабилизировалось на уровне –0,1 атм. Градиент температуры по объему камеры не превышал ± 1,2 °С, что подтверждает эффективность системы воздухораспределения.

Таким образом, разработанная схема и конструкция могут быть использованы для произ-

водства низкотемпературных систем самого различного назначения: для низкотемпературной обработки и хранения биотехнологических материалов [17], ферментно-эндокринного сырья в биотехнологической, пищевой промышленности в фармакологическом производстве [18]. Также предложенная схема может быть применена в климатических испытаниях самого различного назначения [19].

Благодарность: коллектив авторов выражает благодарность руководству ООО «Термэкс» (Томск) и лично Дмитрию Александровичу Вавилкину за поддержку в разработке лабораторной установки и проведении исследований.

Список источников

1. Li B., Sun D.-W. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods // *Journal of Food Engineering*. 2002. Vol. 54, N 3. P. 175–182. DOI: 10.1016/S0260-8774(01)00209-6.
2. Nakazawa N., Wada R., Fukushima H., et al. Effect of long-term storage, ultra-low temperature, and freshness on the quality characteristics of frozen tuna meat // *International Journal of Refrigeration*. 2020. Vol. 112. P. 270–280. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.12.012.
3. Nakazawa N., Okazaki E. Recent research on factors influencing the quality of frozen seafood // *Fisheries Science*. 2020. Vol. 86, N 2. P. 231–244. DOI: 10.1007/s12562-020-01402-8.
4. Sman Van Der RGM. Impact of Processing Factors on Quality of Frozen Vegetables and Fruits // *Food Engineering Reviews*. 2020. Vol. 12, N 4. P. 399–420. DOI: 10.1007/s12393-020-09216-1.
5. Мукайлов М.Д., Улчибекова Н.А., Курбанов М.С. Изменение химического состава ягод земляники (*Fragaria ananassa* L.) при низкотемпературном замораживании и хранении // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2017. № 2. С. 118–125.
6. Russell, N.J. Bacterial membranes: the effects of chill storage and food processing // *International Journal of Food Microbiology*. 2002. Т. 79, № 1-2. С. 12–23.
7. Walters C., Wheeler L.M., Grotenhuis J.M. Longevity of seeds stored in a genebank: species characteristics // *Seed Science Research*. 2005. Vol. 15, N 1. P. 1–20. DOI: 10.1079/SSR2004195.
8. Fuller B.J., Lane N., Benson E.E. *Life in the Frozen State*. Boca Raton: CRC Press, 2004.
9. Yancey P.H. Organic osmolytes as compatible, metabolic and counteracting cytoprotectants in high osmolarity and other stresses // *Journal of Experimental Biology*. 2005. Vol. 208, N 15. P. 2819–2830. DOI: 10.1242/jeb.01730.
10. Rangel V.B., Almeida A.G.S., Almeida F.S., et al. Cascade refrigeration system for low temperatures using natural fluids // *Foco*. 2022. Vol. 15, N 1. P. e295. DOI: 10.54751/revistafoco.v15n1-013.
11. Kumar Singh K., Kumar R., Gupta A. Comparative energy, exergy and economic analysis of a cascade refrigeration system incorporated with flash tank (HTC) and a flash intercooler with indirect subcooler (LTC) using natural refrigerant couples // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020. Vol. 39. P. 100716. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100716.
12. Короткий И.А., Федоров Д.Е., Учайкин А.В., Мальцева О.М. Испаритель-конденсатор с промежуточным хладоносителем. Патент РФ № 2509281. 10.03.2014.
13. Сязин И.Е., Гукасян А.В. Теоретическое обоснование и практическая реализация схем «бихладагентной» и «двухкомпрессорной» холодильных машин // *Холодильная техника*. 2023. Т. 112, № 1. С. 29–38. DOI: 10.17816/RF588066.
14. Силенок А.В. Холодильные машины Johnson Controls для низкотемпературных аппаратов и установок // *Холодильная техника*. 2011. № 12. С. 12–13.
15. Черняк В.А., Клименко Т.А., Рукавишников А.М., и др. Каскадная холодильная установка для предприятий пищевой промышленности // *Холодильная техника*. 2006. № 5. С. 22–23.

16. Хрекин А.С., Баранов И.В., Никитин А.А. Анализ эффективности циклов каскадных холодильных машин с применением диоксида углерода // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 4. С. 55–64. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-55-64.
17. Neverov E.N., Korotkiy I.A., Korotkih P.S., et al. Improving the Environmental Efficiency of Engineering Systems Operating under the Scheme of Secondary Use of Thermal Energy // International Journal of Heat and Technology. 2022. Vol. 40, N 6. P. 1533–1539. DOI: 10.18280/ijht.400623.
18. Soni Sh., Mishra P., Maheshwari G., et al. Theoretical estimation of efficiency defect in cascade refrigeration system using low global warming potential refrigerant pair // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 59. P. 1040–1044. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.372.
19. Ибраев А.М., Мустафин Т.Н., Хамидуллин М.Н. Сравнительный анализ холодильных агентов пароконденсационных холодильных машин по ожидаемой холодопроизводительности // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 10. С. 159–162.
20. Хрекин А.С., Баранов И.В. Сравнительный анализ эффективности циклов холодильных машин // Вестник Международной академии холода. 2021. № 1. С. 12–21. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-12-21.
21. Короткий И.А., Неверов Е.Н., Приб И.А., и др. Проектные решения схемы холодильной машины с утилизацией теплоты конденсации // Холодильная техника. 2020. № 6. С. 30–33.
22. Усов А.В., Иваненко О.В. Разработка низкотемпературной холодильной установки, работающей на смеси холодильных агентов // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 2. С. 113–118.
23. Короткий И.А., Короткая Е.В., Усов А.В., и др. Каскадная холодильная машина на двухкомпонентной смеси холодильных агентов. Патент РФ № 2818740. 03.05.2024.
24. Usov A., Korotkiy I., Tyunin A. Experimental Mixed Refrigerant Low-Temperature System: Development and Trial. In: Bio web of conferences “Agro-Bio-Technologies – 2023. Innovative Solutions for the Development of the Industry”, Kaliningrad, 5 May 2023. Kaliningrad: EDP Sciences, 2023. P. 01013. DOI: 10.1051/bioconf/20236401013.
25. Цветков О.Б., Забодалова Л.А., Лаптев Ю.А., и др. Выбор холодильных агентов // Молочная промышленность. 2018. № 9. С. 21–22.
26. Tsvetkov O.B., Baranov I.V., Laptev Y.A., et al. Third generation of working fluids for advanced refrigeration heating and power generation technologies // Key Engineering Materials. 2020. Vol. 839. P. 51–56. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.839.51.
27. Француз О.С., Антипов А.В., Дугаров Ц.Б., и др. Исследование возможности применения бинарного хладагента в каскадной холодильной машине // Вестник ВСГУТУ. 2022. № 1(84). С. 30–36. DOI: 10.53980/24131997_2022_1_30.
28. Tsvetkov O.B., Laptev Y.A., Sharkov A.V., et al. Alternative refrigerants with low global warming potential for refrigeration and air-conditioning industries. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 3, Applied and Fundamental Research Dedicated to the 75th Anniversary of Professor Abdul-Hamid Mahmoudovich Bisliyev, Grozny, 28–29 Feb 2020. Grozny, 2020. P. 012070. DOI: 10.1088/1757-899X/905/1/012070.
29. Кравченко М.Б. Экспериментальное исследование холодильной установки, работающей на неазеотропной смеси холодильных агентов // Холодильная техника и технология. 2016. Т. 52, № 2. С. 4–11. DOI: 10.21691/ret.v52i2.48.

References

1. Li B, Sun D-W. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods. *Journal of Food Engineering*. 2002;54(3):175–182. DOI: 10.1016/S0260-8774(01)00209-6.
2. Nakazawa N, Wada R, Fukushima H, et al. Effect of long-term storage, ultra-low temperature, and freshness on the quality characteristics of frozen tuna meat. *International Journal of Refrigeration*. 2020;112:270–280. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.12.012.

3. Nakazawa N, Okazaki E. Recent research on factors influencing the quality of frozen seafood. *Fisheries Science*. 2020;86(2):231-244. DOI: 10.1007/s12562-020-01402-8.
4. Sman Van Der RGM. Impact of Processing Factors on Quality of Frozen Vegetables and Fruits. *Food Engineering Reviews*. 2020;12(4):399-420. DOI: 10.1007/s12393-020-09216-1.
5. Mukailov MD, Ulchibekova NA, Kurbanov MS. Changes in the chemical composition of strawberries (*Fragaria ananassa* L.) during low-temperature freezing and storage. *Bulletin of the Timiryazev Agricultural Academy*. 2017;(2):118-125. (In Russ.).
6. Russell NJ. Bacterial membranes: the effects of chill storage and food processing. *International Journal of Food Microbiology*. 2002;79(1-2):12-23.
7. Walters C, Wheeler LM, Grotenhuis J. M. Longevity of seeds stored in a genebank: species characteristics. *Seed Science Research*. 2005;15(1):1-20. DOI: 10.1079/SSR2004195.
8. Fuller BJ, Lane N, Benson EE. *Life in the Frozen State*. Boca Raton: CRC Press, 2004.
9. Yancey PH. Organic osmolytes as compatible, metabolic and counteracting cytoprotectants in high osmolarity and other stresses. *Journal of Experimental Biology*. 2005;208(15):2819-2830. DOI: 10.1242/jeb.01730.
10. Rangel VB, Almeida AGS, Almeida FS, et al. Cascade refrigeration system for low temperatures using natural fluids. *Foco*. 2022;15(1):e295. DOI: 10.54751/revistafoco.v15n1-013.
11. Kumar Singh K, Kumar R, Gupta A. Comparative energy, exergy and economic analysis of a cascade refrigeration system incorporated with flash tank (HTC) and a flash intercooler with indirect subcooler (LTC) using natural refrigerant couples. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;39:100716. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100716.
12. Korotkiy IA, Fedorov DE, Uchaikin AV, Maltseva OM. *Evaporator-condenser with intermediate coolant*. Patent RF № 2509281 C1. 03/10/2014. (In Russ.).
13. Syazin IE, Gukasyan AV. Theoretical substantiation and practical implementation of the schemes of "bi-refrigerant" and "two-compressor" refrigeration machines. *Refrigeration engineering*. 2023;112(1):29-38. (In Russ.). DOI: 10.17816/RF588066.
14. Silenok AV. Johnson Controls refrigeration machines for low-temperature devices and units. *Refrigeration engineering*. 2011;12:12-13. (In Russ.).
15. Chernyak VA, Klimenko TA, Rukavishnikov AM, et al. Cascade refrigeration unit for food industry enterprises. *Refrigeration engineering*. 2006;5:22-23. (In Russ.).
16. Khrekin AS, Baranov IV, Nikitin AA. Analysis of the efficiency of cascade refrigeration machine cycles using carbon dioxide. *Omsk Scientific Bulletin. Series: Aviation, Rocket and Power Engineering*. 2021;5(4):55-64. (In Russ.). DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-55-64.
17. Neverov EN, Korotkiy IA, Korotkih PS, et al. Improving the Environmental Efficiency of Engineering Systems Operating under the Scheme of Secondary Use of Thermal Energy. *International Journal of Heat and Technology*. 2022;40(6):1533-1539. DOI: 10.18280/ijht.400623.
18. Soni Sh, Mishra P, Maheshwari G, et al. Theoretical estimation of efficiency defect in cascade refrigeration system using low global warming potential refrigerant pair. *Materials Today: Proceedings*. 2022;59:1040-1044. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.372.
19. Ibraev AM, Mustafin TN, Khamidullin MN. Comparative analysis of refrigerants of vapor-compression refrigeration machines by expected cooling capacity. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2014;17(10):159-162. (In Russ.).
20. Khrekin AS, Baranov IV, Nikitin AA. Analysis of the efficiency of cascade refrigeration machine cycles using carbon dioxide. *Omsk Scientific Bulletin. Series: Aviation, Rocket and Power Engineering*. 2021;5(4):55-64. (In Russ.). DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-55-64.
21. Korotkiy IA, Neverov EN, Prib IA, et al. Design solutions for a refrigeration machine with condensation heat recovery. *Refrigeration engineering*. 2020;6:30-33. (In Russ.).
22. Usov AV, Ivanenko OV. Development of a low-temperature refrigeration unit operating on a mixture of refrigerants. *Equipment and technology of food production*. 2016;2:113-118. (In Russ.).
23. Korotkiy IA, Korotkaya EV, Usov AV, et al. *Cascade refrigeration machine using a two-component mixture of refrigerants*. Patent RF No. 2818740 C1. 05.03.2024. (In Russ.).

24. Usov A, Korotkiy I, Tyunin A. Experimental Mixed Refrigerant Low-Temperature System: Development and Trial. In: *Bio web of conferences "Agro-Bio-Technologies 2023 – Innovative Solutions for the Development of the Industry"*, 05 May 2023. Kaliningrad: EDP Sciences; 2023. P. 01013. DOI: 10.1051/bioconf/20236401013.
25. Tsvetkov OB., Zabodalova LA, Laptev YuA, et al. Selection of refrigerants. *Dairy industry*. 2018;9:21-22. (In Russ.).
26. Tsvetkov OB, Baranov IV, Laptev YA, et al. Third generation of working fluids for advanced refrigeration heating and power generation technologies. *Key Engineering Materials*. 2020;839:51-56. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.839.51.
27. Prantsuz OS, Antipov AV, Dugarov TsB, et al., Study of the possibility of using a binary refrigerant in a cascade refrigeration machine. *Bulletin of VSGUTU*. 2022;1:30-36. (In Russ.). DOI: 10.53980/24131997_2022_1_30.
28. Tsvetkov OB, Laptev YA, Sharkov AV, et al. Alternative refrigerants with low global warming potential for refrigeration and air-conditioning industries. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 3, Applied and Fundamental Research Dedicated to the 75th Anniversary of Professor Abdul-Hamid Mahmoudovich Bisliyev*, Grozny, Chechnya, 28–29 Feb 2020. Grozny; 2020. P. 012070. DOI: 10.1088/1757-899X/905/1/012070.
29. Kravchenko MB. Experimental study of a refrigeration unit operating on a non-azeotropic mixture of refrigerants. *Refrigeration engineering and technology*. 2016;52(2):4-11. (In Russ.). DOI: 10.21691/ret.v52i2.48.

Статья принята к публикации 23.01.2026 / The article accepted for publication 23.01.2026.

Информация об авторах:

Игорь Алексеевич Короткий, заведующий кафедрой теплохладотехники, доктор технических наук, профессор

Андрей Васильевич Усов, доцент кафедры теплохладотехники, кандидат технических наук, доцент

Елена Валерьевна Короткая, профессор кафедры общей и неорганической химии, доктор технических наук, профессор

Александр Николаевич Расщепкин, профессор кафедры теплохладотехники, доктор технических наук, доцент

Information about the authors:

Igor Alekseevich Korotkiy, Head of the Thermal and Refrigeration Engineering Department, Doctor of Technical Sciences, Professor

Andrey Vasilyevich Usov, Associate Professor at the Thermal and Refrigeration Engineering Department, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Elena Valeryevna Korotkaya, Professor at the General and Inorganic Chemistry Department, Doctor of Technical Sciences, Professor

Alexander Nikolaevich Raschepkin, Professor at the Thermal and Refrigeration Engineering Department, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

