

На правах рукописи

ЕРМОЛАЕВ Андрей Евгеньевич

**ПОЛУЧЕНИЕ ВОДНОГО ЛЬДА МЕТОДОМ
ПОСЛОЙНОГО НАМОРАЖИВАНИЯ
В УСЛОВИЯХ ВАКУУМИРОВАНИЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва — 2009 г.

Работа выполнена в ГОУ ВПО **Московский государственный университет инженерной экологии (МГУИЭ)**

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
МАРИНЮК Борис Тимофеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
БАБАКИН Борис Сергеевич

кандидат технических наук, доцент
ФРОЛОВ Юрий Дмитриевич

Ведущая организация: **ЗАО НПО «ХИМСИНТЕЗ»**

Защита состоится «19» марта 2009 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.212.145.01 в Московском государственном университете инженерной экологии по адресу: 105066, г. Москва, ул. Старая Басманная, 21/4, аудитория имени Л.А. Костандова (Л-207).

С текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке МГУИЭ

Автореферат разослан «19» февраля 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

ТРИФОНОВ С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Охлаждение различных объектов и поддержание их низкой температуры всегда имело большое значение в жизни человека. Прежде всего, это относится к хранению пищевых продуктов, а значит, напрямую влияет на качество питания и, следовательно, здоровье людей. В последние годы во всем мире появилась тенденция увеличения потребления охлажденных продуктов вместо замороженных, поскольку охлажденные до околонулевых температур продукты при быстрой доставке их потребителю сохраняют ценные вкусовые и потребительские свойства, что менее характерно для замороженных продуктов. В этом контексте применение водного льда и воды с околонулевой температурой может стать наиболее простым и выгодным решением данной задачи. Существующие способы получения и заготовки водного льда в большинстве случаев представляют собой замораживание воды с помощью искусственного или естественного холода.

Традиционные методы получения водного льда предполагают задействование парокомпрессионных холодильных машин, использующих различные виды холодильных агентов от хладагенов и аммиака до углеводородов и CO_2 . Многие из предложенных в последние годы хладагенов, имея нулевое воздействие на озоновый слой земли, в то же время отепляют окружающую среду (R404a, R410, R125, R134a). Весьма редки хладагенты одновременно безопасные и для озонового слоя, и в плане воздействия на глобальное потепление (R32, R161), поэтому они весьма дороги.

Развитие холодильной техники в настоящее время находится под влиянием жестких экологических требований. Анализируя наиболее известные, разработанные к настоящему времени в нашей стране и за рубежом синтетические заменители запрещенных к использованию холодильных агентов, можно убедиться, что у каждого из них имеются уязвимые места с позиции выполнения всех экологических, энергетических и эксплуатационных требований, предъявляемых к современным холодильным агентам. Поэтому в перспективе все они могут оказаться объектами разного рода регулирования, которое в конечном итоге сведется к запретам или ограничениям их производства и применения.

В последние годы возрос интерес к холодильным агентам природного происхождения, к которым относится вода. Использование воды как холодильного агента в системах охлаждения является перспективным в сельском хозяйстве, на транспорте, в промышленном и гражданском кондиционировании. Вода — экологически чистое вещество, не загрязняющее окружающую среду и не отепляющее окружающую среду. Вода может быть как хладагентом, так и хладоносителем. Это уменьшает стоимость и сложность систем охлаждения. Вода химически стабильна, нетоксична, невоспламенима и не вредит окружающей среде. Однако вода как

холодильный агент имеет низкий уровень рабочих давлений. Как следствие — система должна пропускать большие объемные потоки водяного пара, имея сравнительно высокие коэффициенты сжатия. По этой причине, машины высокой объемной производительности являются наилучшим выбором. Основной цикл машин, работающих на воде, фактически идентичен парокompрессионному холодильному циклу с традиционными холодильными агентами, за исключением того, что в связи с доступностью и относительной дешевизной воды как холодильного агента, возможно ее использование в разомкнутом цикле. В силу своих специфических свойств (низкое давление паров при температурах $0...+20$ °С), существующий парк холодильных компрессоров не может быть использован, поэтому в качестве средств компримирования выбраны скоростные вакуумные насосы ротативного действия.

В литературе имеются сведения относительно работ по созданию крупных по холодильной мощности установок, работающих на воде. В них применяют центробежные и осевые компрессоры. В нашей стране данной проблемой в разное время занимались к.т.н., доц. Г.Ф. Ивановский с учениками. За рубежом наиболее известны работы профессора Йохима Пауэла (Дания) и Дж. Кюхнл-Кинела (Швейцария). Создание вакуумных холодильных машин малой производительности на основе турбомашин динамического действия не представляется возможным, поскольку КПД этих машин резко снижается при уменьшении потока пропускаемого газа. Требуется также организация промежуточного охлаждения водяного пара, что увеличивает стоимость и сложность установки.

Цель работы

Целью работы является экспериментальное и теоретическое обоснование принципа послойного намораживания водного льда в условиях вакуума, создание экспериментального стенда-имитатора вакуумного льдогенератора и получение его характеристик.

Основные задачи работы

1. Определение рациональных параметров и условий работы вакуумных генераторов водного льда с послойным намораживанием.
2. Разработка аналитического описания процесса послойного намораживания водного льда в условиях непрерывного вакуумирования рабочей камеры.
3. Создание методики расчета установки, построенной по данному принципу.
4. Сравнение энергетической эффективности вакуумной установки льдогенератора с современными парокompрессионными холодильными установками аналогичного назначения, работающими на ГФУ (HFC).

Научная новизна

Представлено аналитическое описание процесса послойного намораживания водного льда с учетом технических характеристик средств вакуумной откачки (быстрота действия насоса), на основе чего предложено расчетное уравнение для нахождения времени образования слоя водного льда заданной толщины в условиях вакуумирования герметичной полости.

Получены экспериментальные данные по динамике послойного намораживания льда путем вакуумной откачки водяных паров из герметичного объема резервуара-испарителя.

Практическая значимость работы

Разработана схема вакуумной холодильной установки для получения водного льда методом послойного намораживания.

Создан экспериментальный стенд-имитатор вакуумного льдогенератора с послойным намораживанием.

Проведено сопоставление эффективности вакуумной установки для получения водного льда с традиционными фреоновыми холодильными установками аналогичного назначения, выявлено преимущество вакуумных установок по расходу энергии.

Предложена методика расчета вакуумной холодильной установки с учетом конечной пропускной способности вакуумной коммуникации и зависимости теплоты испарения жидкости от температуры. Показана возможность использования в качестве насос-компрессора вакуумной холодильной установки образцов вакуумных насосов выпускаемых отечественной промышленностью.

Апробация работы

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Результаты исследований были представлены на 22-ом конгрессе по холоду в Китае, Refrigeration Creates the future, «Vacuum-evaporative refrigeration and ice generation installation» и на 8-ой конференции имени Густава Лоренцена Conference on Natural Working Fluids в Дании, «Vacuum methods of water ice formation».

Установка была представлена на всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи НТТМ-2007.

Структура и объем работы

Объем диссертации составляют 95 страниц, включающих 30 рисунков, 5 таблиц. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений, списка используемой литературы, включающего ссылки на 40 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Обоснована актуальность проблемы. Показана роль природных холодильных агентов в сохранении окружающей среды.

Глава 1. Обзор проблемы получения и применения водного льда. Состояние вопроса и задачи исследования.

Освещено состояние вопроса получения и применения водного льда в различных отраслях промышленности. Дано описание модификаций водного льда и технологии их получения.

Проанализированы работы, посвященные исследованиям в этой области. На основе публикаций отечественных и зарубежных авторов выявлено, что вода как холодильный агент применяется крайне редко, а для получения водного льда практически не используется совсем. Недостатки вакуумных холодильных машин, использующих воду как холодильный агент, компенсируются экологической безупречностью и энергетической эффективностью.

В зарубежной научно-технической литературе практически отсутствуют публикации по использованию двухроторных вакуумных насосов в холодильных установках на воде как хладагенте. В отечественной литературе имеются единичные публикации по данной проблеме, в которых пока не отражены важнейшие и принципиальные вопросы, относящиеся к данной тематике.

В доступной литературе отсутствуют физико-математические модели послыонного намораживания водного льда с использованием вакуумной технологии.

Исследования по определению предельных режимов работы вакуумной холодильной установки на основе двухроторных вакуумных насосов не проводились.

Сравнение энергетических параметров установок, использующих воду как холодильный агент, в зарубежных публикациях проводились для замкнутых циклов и машин большой мощности. Сравнения вакуумных холодильных машин с разомкнутым циклом с пароконденсационными холодильными машинами не проводились.

Создание вакуумных холодильных установок в нашей стране в настоящее время находится в стадии развития. Учитывая потребность сельского хозяйства и малого предпринимательства в экологически чистых машинах малой холодопроизводительности, обоснована необходимость исследований в данной области.

Глава 2. Анализ вакуумного замораживания жидкостей в спокойном состоянии.

Описание процесса вакуумного метода получения водного льда основано на физических представлениях о процессах, происходящих при околонулевой температуре в тонком слое спокойной жидкости, находящейся в изначальном состоянии в герметичном контейнере при атмосферном давлении.

Принцип действия вакуумной холодильной машины основан на том, что в процессе сублимации паров воды с поверхности льда в испарителе при давлении ниже атмосферного происходит интенсивный отвод тепла с порциями паров, которые конденсируются в водяном конденсаторе.

Вода для замораживания заправляется в бак-испаритель, который затем вакуумируется с помощью вспомогательного насоса. Как только давление в испарительной системе достигнет необходимого значения (около 5 мм рт. ст.), включается основной насос, при работе которого и происходит основной процесс вакуумной откачки. При сублимации льда с замерзшей поверхности часть замороженной воды переходит в паровую фазу, за счет чего происходит понижение температуры, откачиваемые пары воды направляются в конденсатор, где происходит отвод тепла конденсации с помощью охлаждающей воды.

При составлении аналитического описания вакуумного замораживания воды сделаны следующие допущения: поле температур по глубине слоя жидкости однородно; теплота сублимации ($L+r$) постоянна; профиль температуры в слое льда имеет прямолинейный характер; закон изменения давления насыщенных паров от температуры известен и имеет линейный характер; температура замораживаемой воды равна 0°C .

Жидкость (вода) в спокойном состоянии находится внутри замкнутой герметичной полости при температуре, близкой к 0°C . Вакуумирование полости осуществляется с эффективной скоростью откачки $S_{\text{эф}}$, которая остается постоянной в том диапазоне давления, при котором образуется ледяной массив.

Теплофизические свойства воды и водного льда известны — это молекулярная масса, теплоты испарения r и замерзания L , температура замерзания $T_{\text{ф}}$, плотность льда $\rho_{\text{л}}$, коэффициент теплопроводности льда λ в состоянии таяния X .

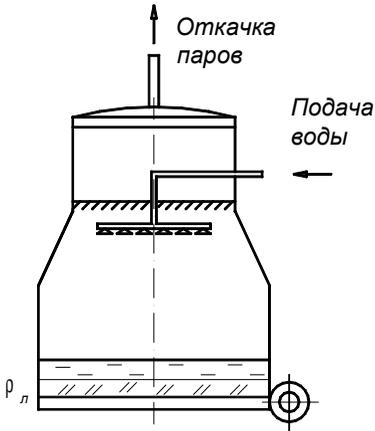


Рисунок 1. Схема вакуумного воздействия на замораживаемую жидкость

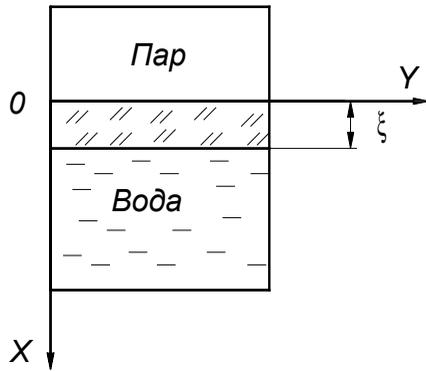


Рисунок 2. Схема образования льда в герметичной вакуумной полости

На первом этапе вакуумной откачки давление в паровом пространстве герметичного резервуара понижается до давления насыщенных паров при начальной температуре залитой в него жидкости. Производится дегазация жидкости, сопровождающаяся псевдокипением поверхностных слоев. На втором этапе откачки происходят понижение упругости насыщенных паров интенсивный отвод тепла с порциями паров рабочего вещества, температура жидкости в герметичном резервуаре падает.

Третий этап характеризуется замерзанием жидкости при постоянной упругости паров надо льдом. Дальнейшее уменьшение упругости насыщенных паров приводит к понижению температуры массива льда. Третий этап и является основным. А поскольку вода имеет околонулевую температуру, первые два этапа носят кратковременный характер.

При принятых обозначениях на рисунке ξ — глубина промерзания льда по координате X . На границе раздела «лед—паровая полость» можно записать условие

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0} = S^* \psi (L + r) \psi \rho'' \quad (1),$$

где S^* — эффективная скорость откачки на единицу площади сечения вакуумной полости;

ρ'' — упругость насыщенных паров воды.

На границе раздела «лед—вода» условие теплового взаимодействия определяется как

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=\xi} = L \psi \frac{d\xi}{dt} \psi \rho_e \quad (2).$$

Распределение температур в слое намораживаемого льда примем прямолинейным:

$$T = T_e + \frac{T_0 - T_0}{\xi} \psi X \quad (3),$$

где T_0 — переменная температура поверхности льда на границе раздела «лед — паровая полость».

Такое предположение обосновано тем, что лед образуется в тонких слоях толщиной ξ (отношение толщины ξ к внутреннему диаметру корпуса льдогенератора меньше 5 %), которые со временем смораживаются в ледяной массив цилиндрической формы.

Производя соответствующие преобразования и совершая необходимые по процедуре подстановки, получаем выражение для определения переменной температуры поверхности льда, с которой происходит сублимация паров

$$T_0 = T_0 - \frac{L \psi \rho_e \psi \xi^2}{\lambda \psi \tau} \quad (4).$$

Данное уравнение является ключевым, так как оно содержит параметр времени τ и искомую толщину слоя намораживаемого льда ξ . Выразим давление упругости паров воды над льдом в виде выражения:

$$P = A \psi e^{-\frac{k}{T_0}} \quad (5).$$

После подстановки этого выражения получим

$$\xi = \frac{(T_0 - T_0) \psi R \psi T_0^k - \frac{\rho_e \psi L \psi \xi^2}{2 \psi \lambda \psi \tau}}{\frac{\rho_e \psi L}{\lambda} \psi A \psi e^{-\frac{k}{T_0}} \psi} \quad (6).$$

Полученный результат приведен в виде неявного уравнения относительно искомого параметра ξ .

Зависимость упругости насыщенных паров воды от температуры кипения можно представить упрощенно в виде эмпирического уравнения

$$P = k \psi T_0 - u \quad (7),$$

где $k = 35$ и $u = 8940$ — константы.

Такое уравнение описывает табличные данные по упругости насыщенных паров воды от температуры в диапазоне температур $0 \dots -10$ °C с погрешностью менее 5%.

Тогда с учетом (7)

$$\frac{T_0 - T_0}{\xi} = \frac{S \psi \psi}{\lambda} \psi \frac{\psi}{R} \psi T_0^k - \frac{u \psi}{T_0 \psi} \quad (8)$$

и, применяя равенство (5), получаем

$$\frac{S^* \mu \psi (L+r) \psi^3 k - \frac{u}{T_0 - \frac{\rho_{\epsilon} \psi^2}{2 \lambda \psi}}}{R} = \frac{\rho_{\epsilon} \psi L \psi^2}{2 \psi} \quad (9).$$

Оставляя ζ в левой части, получаем аналог неявного уравнения (6), полученный для упрощенной до прямой зависимости давления от температуры

$$\zeta = \frac{2 \psi \psi^* \psi (L+r) \psi \psi^3 k - \frac{u}{T_0 - \frac{\rho_{\epsilon} \psi L \psi^2}{2 \lambda \psi}}}{L \psi \rho_{\epsilon} \psi R} \quad (10).$$

Решение задачи в явном виде выглядит следующим образом:

$$\zeta = \sqrt{-\frac{\frac{a^2}{3} + b}{3}} \cos \frac{1}{3} \arccos \frac{2a^3 - a b + c}{2 \sqrt{-\frac{a^2}{3} + b}} + 4\pi - \frac{a}{3}$$

где

$$a = -\frac{2S^* \mu (L+r) L k \rho_{\epsilon} \psi}{\rho_{\epsilon}^2 L^2 R};$$

$$b = -\frac{2 \lambda L \rho_{\epsilon} R T_0}{\rho_{\epsilon}^2 L^2 R} \psi;$$

$$c = \frac{4 \lambda S^* \mu (L+r) (k T_0 - u)}{\rho_{\epsilon}^2 L^2 R} \psi^2.$$

Глава 3. Опытная установка вакуумного льдогенератора с послынным намораживанием.

Для изучения режимов работы и снятия характеристик вакуумной холодильной машины на кафедре Холодильной и криогенной техники Московского государственного университета инженерной экологии была создана экспериментальная вакуумная холодильная установка, схема которой представлена на рисунке 3. Основное назначение установки: исследование динамики охлаждения пресной воды и параметров, влияющих на процесс.

Испаритель представляет собой сосуд из химического стекла емкостью 20 л с герметично закрывающейся крышкой, паровое пространство которого соединяется с насосно-конденсаторным агрегатом вакуумной коммуникацией. Предварительные опыты показали, что сетевая вода содержащая незначительное количество солей и дистиллированная вода дают одинаковый результат поэтому во всех опытах использовалась сетевая вода подготовленная фильтрованием от механических примесей и ржавчины.

В состав агрегата входят водяной конденсатор и два вакуумных насоса, один из которых является основным, а другой вспомогательным. Основной насос ротативного принципа действия обеспечивает откачку паров охлаждаемой жидкости при ее кипении в испарителе и их сжатие до давления конденсации. В качестве основного вакуумного насоса использовали двухроторные машины отечественного производства, производительностью 50 л/с (малый насос) и 150 л/с (большой насос), а вспомогательного — 5 л/с.

Конденсатор кожухозмеевиковый, с водяным охлаждением. Конденсация паров осуществляется в межтрубном пространстве, вода протекает внутри трубок.

Приборы и датчики, установленные в различных частях системы, позволяют проводить необходимые измерения, такие, как температура кипения, температура конденсации и другие параметры. Датчики температур представляют собой хромель-копелевые и медь-константановые термодпары.

Измерения остаточного давления в герметичной полости бака-испарителя выполнялись высокоточным электронным вакууметром комбинированного типа Mini-Convectron, установленным на баке-испарителе. Вакууметр имеет жидкокристаллический дисплей для отображения различной информации, в том числе текущего давления в рабочей камере установки. Диапазон измеряемых давлений электронного вакууметра составляет 10^{-4} — 10^3 мм рт. ст.



Рисунок 3. Электронный вакууметр типа Mini-Convectron

На установке также предусмотрено измерение напряжения, силы тока и мощности, подаваемых на основной и вспомогательный насосы, что позволяет оценить затраты энергии на производство холода.

Систематические ошибки при испытаниях удавалось существенно уменьшить путём тарирования средств измерения измерительными приборами с более высокой точностью. Вероятность появления предельных погрешностей показаний приборов составляет около 5%. Случайные погрешности минимизировались путём сравнения с большинством аналогичных точек при построении характеристик.

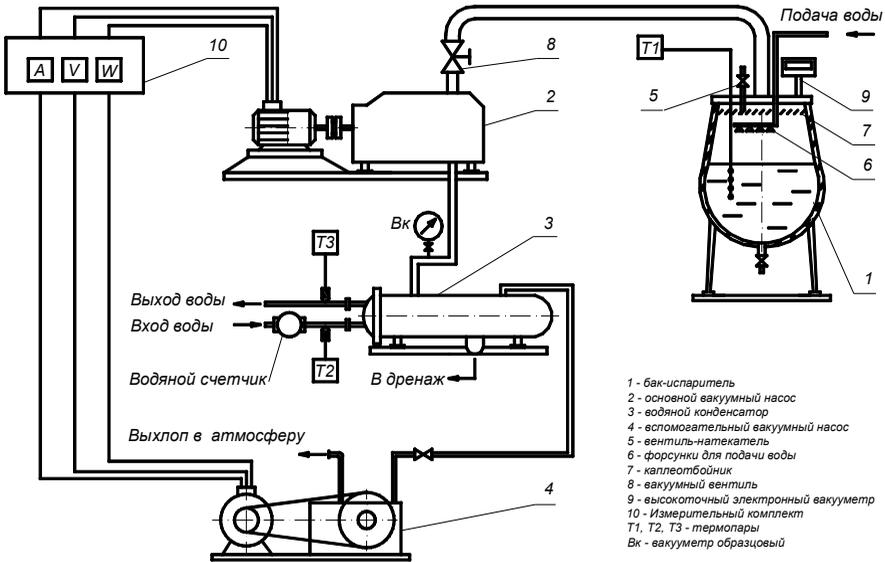


Рисунок 4. Схема вакуумной установки для получения водного льда:
 А — амперметр; V — вольтметр; W — ваттметр; Вк — образцовый вакуумметр

Глава 4. Экспериментальное исследование режимов работы вакуумной холодильной машины при производстве водного льда методом послойного намораживания.

Наиболее наглядно динамику ледогенерации описывает график зависимости толщины намороженного льда от длительности вакуумного процесса (рисунок 5).

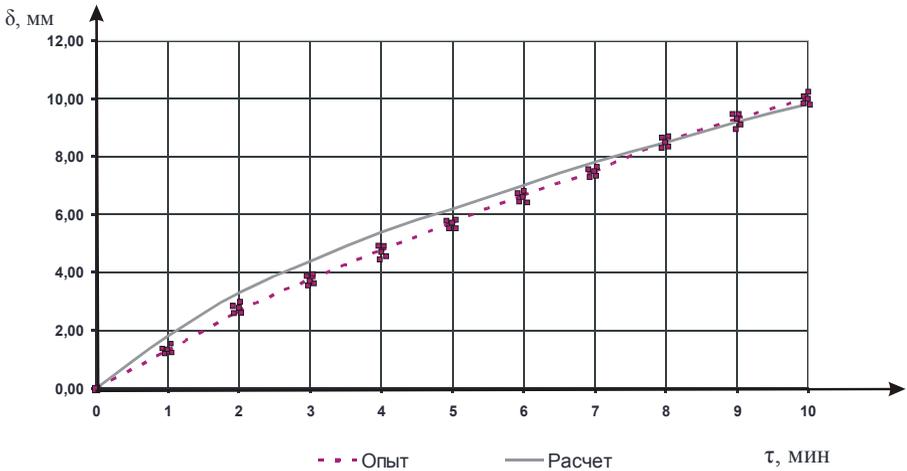


Рисунок 5. Экспериментальные и расчетные зависимости толщины слоя намороженного водного льда от времени, скорость откачки основного насоса 50 л/с, температура подаваемой воды 0 °С

Для исследования распределения температур в единичном слое льда экспериментальная установка, находящаяся в МГУИЭ, была модернизирована, и в бак испаритель были установлены 4 независимые терморпары, расположенные равномерно по толщине слоя льда.

Результаты опыта показаны на рисунке 6.

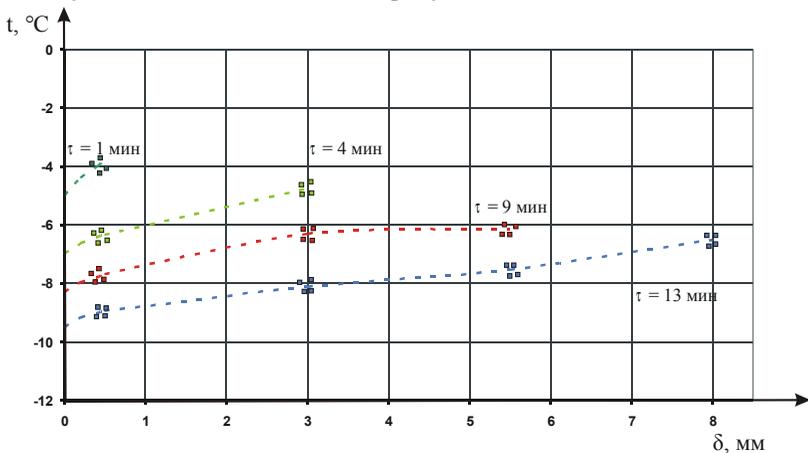


Рисунок 6. Распределение температур по глубине единичного слоя

В ходе опытов измерялись температуры в слое в различные моменты времени. В первые минуты лед образовывался только на поверхности, и его температура была близка к нулю. Позже температура во всем слое понижалась и имела профиль, близкий к прямолинейному. Под конец опыта поверхность слоя, с которой происходит сублимация льда, имеет температуру близкую к $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Стоит отметить, что столь низкая температура на поверхности имеет место только в случае обособленного слоя. Как только наливается новая линза воды, температура поверхности сразу же повышается за счет поглощения теплоты только что налитой незамерзшей воды, и средняя температура всего многослойного массива приближается к околонулевой.

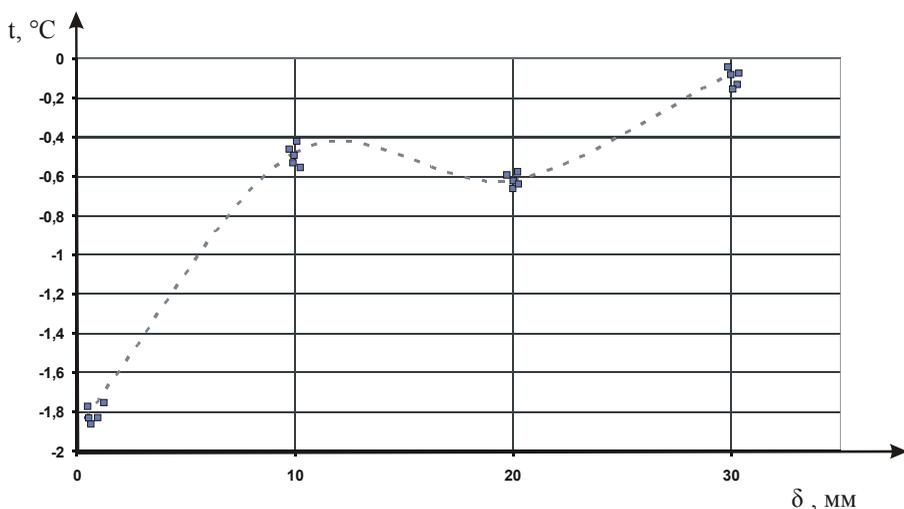


Рисунок 7. Распределение температур в толще ледаого массива

Автором была исследована температура среды не только внутри замерзающей линзы воды, но и между ними. Из рисунка 7 видно, что температуры эти близки к нулю, но чем ближе к поверхности раздела фаз «лед—пар», тем ниже температура, что вполне соответствует представлениям о физике процесса.

Получение льда с околонулевой температурой для целей холодоаккумуляции наиболее выгодно энергетически, так как энергия тратится только на замораживание воды, тогда как в обычных льдогенераторах происходит дополнительное переохлаждение полученного льда. Это переохлаждение совсем не обязательно и даже вредно, так как основной механизм холодоаккумуляции с применением льда заключается в «консервации» теплоты замерзания.

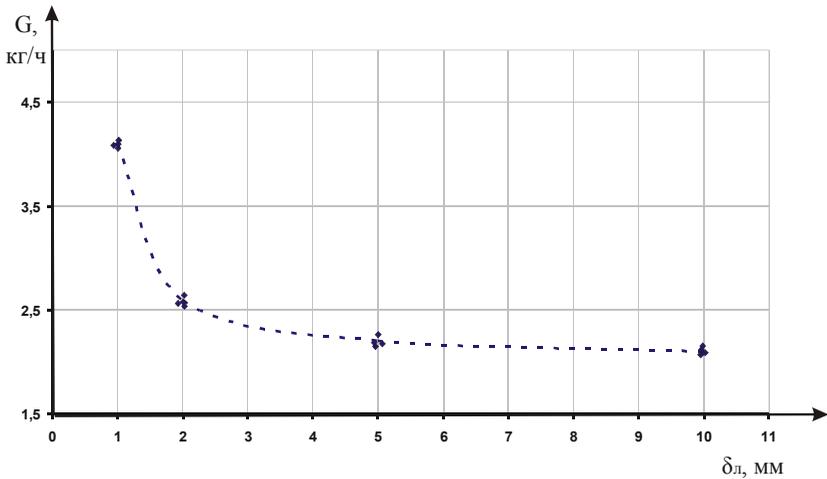


Рисунок 8. Зависимость между толщиной единичного слоя и производительностью

Крайне важными являются энергетические показатели установки и выбор оптимального режима послойного намораживания льда. На рисунке 8 видно, что оптимальным значением является толщина менее 2 мм.

При выборе оптимальной толщины намораживаемого слоя было изучено и влияние выбранной толщины слоя на энергопотребление основного насоса. Как показали опыты, потребляемая электрическая мощность практически не зависит от выбора толщины линзы воды.

Это позволяет выбирать ту толщину, которая будет удобна в конкретных условиях и не задумываться о ее влиянии на расход энергии.

Достоверность методики расчёта вакуумных холодильных установок подтверждена удовлетворительным согласованием распределения расчетных и экспериментальных данных по времени замерзания льда в баке испарителя (рисунок 5).

Для оценки меры расхождения между теоретическим и статистическим распределениями случайных величин был применен критерий согласия А.Н. Колмогорова, оценивающий в первую очередь максимальное значение модуля разности между статистической функцией распределения и соответствующей теоретической функцией распределения.

Глава 5. Практическое применение вакуумных льдогенераторов с послойным намораживанием.

Холодильная техника является энергоемкой отраслью промышленности. Тарифы на электроэнергию растут как для индивидуальных потребителей, так и для предприятий. Применение вакуумных холодильных машин приведет к экономии электроэнергии как в промышленности, так и в сельском хозяйстве.

В агропромышленном комплексе такие машины удобны для охлаждения молока, рыбы, овощей и фруктов, так как, кроме меньшего по сравнению с фреоновыми машинами энергопотребления, они не требуют высококвалифицированного обслуживания, и при этом являются экологически безопасными.

Применение вакуумных холодильных установок в кондиционировании также выгодно, так как вода является одновременно и хладоносителем, и холодильным агентом, что сильно упрощает систему и уменьшает расходы на электроэнергию и оборудование.

Также эти установки могут эксплуатироваться на предприятиях пищевой промышленности для охлаждения и транспортировки продуктов, например, на мясокомбинатах или пивоварнях.

Составлен промышленный ряд вакуумных установок на основе выпускаемых отечественной промышленностью насос-компрессоров типа ДВН-50 и ДВН-150.

Приведены расчетные и экспериментальные характеристики вакуумных установок и проведено сравнение с аналогичными парокомпрессионными льдогенераторами, использующими в качестве холодильного агента фреоны.

Парокомпрессионный фреоновый льдогенератор EURFRIGOR работает на фреоне R404a и состоит из компрессора, конденсатора водяного охлаждения и испарительного блока, внутри которого происходит замораживание воды. Установка, предназначена для производства льда в форме кубиков размером 34x33 мм, потребляет 1,15 кВт электроэнергии и производит 110 кг льда за 24 часа.

Время получения 100 кг льда для вакуумной установки, рассчитанное по формуле, составляет 21,39 часа. Затраты электроэнергии на производство данной массы льда составляют соответственно 25,07 кВт·ч для фреоновой установки и 20,30 кВт·ч для вакуумной.

Наглядно характеристики двух сравниваемых установок представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение параметров парокомпрессионной холодильной машины, работающей на фреоне, и вакуумной холодильной машины на воде.

	Фреоновая установка	Вакуумный льдогенератор
Холодильный агент	R404a	вода
Масса получаемого льда, кг	100	100
Потребляемая мощность, кВт	1,15	1,05
Затраченная электроэнергия, кДж	4140	3780
Время получения требуемого количества льда, ч	21,8	21,39
Удельные затраты энергии, на производство 1 кг льда, кВт·ч/кг	0,251	0,214

Как видно из таблицы 1, вакуумный генератор водного льда по энергетическим характеристикам превосходит традиционную парокомпрессионную установку на фреоне.

Основные результаты и выводы

- Создан стенд-имитатор вакуумного льдогенератора с послойным намораживанием.

- Получены основные характеристики вакуумного льдогенератора, работающего в различных режимах.

- Выявлена рациональная толщина замораживаемой линзы воды.

- Экспериментально подтверждены энергетические и экологические преимущества вакуумного метода получения водного льда методом послойного намораживания по сравнению с существующими льдогенераторными установками, работающими на традиционных холодильных агентах (HFC).

- На основе физических представлений о процессе предложено аналитическое описание процесса вакуумной ледогенерации.

- Расхождение между полученными экспериментальными данными и аналитическим расчетом невелико и находится в пределах 10 %.

- Разработана инженерная методика расчета вакуумных установок-льдогенераторов.

- Создана программа для расчета вакуумных установок с использованием ЭВМ.

Условные обозначения:

μ — молекулярная масса воды, кг·моль⁻¹; L — удельная теплота замерзания воды, Дж·кг⁻¹; r — удельная теплота парообразования воды, Дж·кг⁻¹; R — универсальная газовая постоянная; k — эмпирическая константа ($k = 35$); u — эмпирическая константа ($u = 8940$); λ — теплопроводность льда, Вт·К⁻¹·м⁻¹; τ — время, с; ξ — толщина слоя льда, м; $\rho_{\text{л}}$ — плотность льда, кг·м⁻³; ρ'' — упругость насыщенных паров воды, кг·м⁻³; $T_{\text{ф}}$ — температура фазового перехода воды в лед, К; T_0 — изменяющаяся температура кипения воды; S^* — скорость откачки основного насоса, отнесенная к единице площади поверхности, с которой сублимируется водяной пар, м³·с⁻¹·м⁻².

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

1. Маринюк, Б.Т. «Экологически чистые методы получения водного льда» / Б.Т. Маринюк, Д.В. Сусликов, А.Е. Ермолаев // Холодильный бизнес. — 2008. — №2. — С. 38—40.

2. Маринюк, Б.Т. «Вакуумно-сублимационная установка для получения водного льда» / Б.Т. Маринюк, А.Е. Ермолаев // Холодильная техника. — 2008. — №3. — С. 36—37.

3. Маринюк, Б.Т. «Вакуумная технология послойного намораживания водного льда. Аналитическое описание процесса» / Б.Т. Маринюк, А.Е. Ермолаев // Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии : сборник научных трудов. Выпуск 4. — М.: МГУПБ, 2008. — С. 33—36.

4. Marinyuk, B.T. «Vacuum-evaporative refrigeration and ice generation installation» / B.T. Marinyuk, K.S. Krysanov, A.E. Ermolaev // 22nd international congress of refrigeration, Refrigeration creates the future. August 21—26, 2007, Beijing. — Beijing, 2007. — P.R. China. ICR07-B2-60.

5. Marinyuk, B.T. «Vacuum methods of water ice formation» / B.T. Marinyuk, A.E. Ermolaev, D.V. Suslikov // 8th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids. September 7—10, 2008, Copenhagen. — Copenhagen, 2008.

6. Маринюк, Б.Т. Вакуумная холодильная машина. Принцип действия и снятие характеристик в режиме генерации водного льда : Методические указания / Б.Т. Маринюк, А.Е. Ермолаев, К.С. Крысанов . — М. : МГУИЭ, 2008. — 17 с.