



*На правах рукописи*

**СУСЛИКОВ Денис Владимирович**

**ПОЛУЧЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ  
ВОДНОГО ЛЬДА МЕТОДОМ  
ДИСПЕРГИРОВАНИЯ 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 «26» ноября 2009 г. в 14.00 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 «23» октября 2009 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



**ТРИФОНОВ С.А.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Поиск новых рабочих веществ для современных парокомпрессионных холодильных машин в настоящее время становится всё более острой проблемой из-за возрастающих экологических требований, предъявляемых к ним. Разработка новых экологически безопасных хладагентов связана с большими финансовыми затратами и не всегда может гарантировать успех. Поэтому такие факторы как совместимость с окружающей средой, доступность, термодинамическое совершенство, низкая стоимость, пожаровзрывобезопасность, актуализируют поиск рабочих веществ природного происхождения – в том числе воды, диоксида углерода, водных растворов солей и спиртов.

Вода является простым, дешевым, совершенным по теплофизическим свойствам веществом, обладающим высокими показателями скрытой теплоты парообразования и теплоемкости. Использование воды как холодильного агента в системах охлаждения является перспективным в сельском хозяйстве, на транспорте, в промышленном и гражданском кондиционировании. Однако рабочий цикл с применением воды в качестве хладагента проходит при давлении ниже атмосферного. В результате 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 парокомпрессионному холодильному циклу с традиционными холодильными агентами, за исключением того, что в связи с доступностью и относительно низкой стоимостью воды как холодильного агента, возможно, ее использование в разомкнутом цикле. В силу своих специфических свойств (низкое давление паров при температурах  $0...+20$  °C), существующий парк холодильных компрессоров не может быть использован, поэтому в качестве средств компремирования выбраны скоростные вакуумные насосы ротативного действия.

На сегодняшний день водоледяная суспензия и водный лёд находят широкое применение в разных отраслях промышленности. Применение водоледяных суспензий в холодильной технике существенно сокращает габариты теплообменного оборудования, более интенсивно протекают процессы теплообмена.

Классические методы получения мелкодисперсного водного льда предполагают наличие парокомпрессионных холодильных машин, использующих различные виды холодильных агентов от хладонов и аммиака до углеводородов и  $\text{CO}_2$ . В последние годы в холодильной технике появилась узкая группа синтетических хладагентов типа R123, R407C, которые имеют минимальное тепляющее воздействие на окружающую среду и не

разрушают озоновый слой. Подобные вещества не производятся в нашей стране, поэтому они весьма дороги. Еще более дорогими являются синтетические масла совместимые с ними.

В литературе имеются сведения относительно работ по созданию крупных по холодильной мощности установок, работающих на воде как хладагенте. 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), Дж. Кюхнл-Кинела (Швейцария), Петера Эгольфа (Швейцария). Создание вакуумных льдогенераторов малой и средней 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 процесса генерации водного льда мелкодисперсной структуры в условиях вакуума, создание опытного стенда-имитатора вакуумного льдогенератора и получение его характеристик.

## **Основные задачи работы**

1. Получение экспериментальных данных в условиях рабочих режимов на созданном стенде-имитаторе вакуумного генератора мелкодисперсного льда.
2. Разработка аналитического решения задачи замерзания мелкодисперсных капель воды, распыляемых через форсунку в вакуумируемую гермокамеру-генератор.
3. Создание методики теплового расчета установки, построенной по данному принципу.
4. Сопоставление энергетической эффективности вакуумного льдогенератора водного льда мелкодисперсной структуры с современными пароконденсационными холодильными установками аналогичного назначения, работающими на ГФУ (НФС).

## **Научная новизна**

Представлено аналитическое решение задачи замерзания мелкодисперсных капель воды, диспергируемых в вакуумируемом объеме гермокамеры с учетом технических характеристик средств вакуумной откачки (удельная быстрота действия вакуумного насоса-компрессора), на основе чего предложено расчетное уравнение для нахождения времени промерзания капель воды заданных геометрических характеристик.

Получены экспериментальные данные по динамике замерзания мелких капель воды, диспергируемых в вакуумируемое пространство гермокамеры.

## **Практическая значимость работы**

Разработана схема вакуумного генератора водного льда мелкодисперсной структуры.

Создан опытный стенд-имитатор вакуумного льдогенератора по получению мелкодисперсного водного льда.

Проведено сопоставление энергетической эффективности вакуумного генератора для получения мелкодисперсного водного льда с современными фреоновыми холодильными установками аналогичного назначения, выявлены экологические и эксплуатационные преимущества вакуумных генераторов мелкодисперсного льда.

Предложена методика расчета вакуумных генераторов водного льда мелкодисперсной структуры с учетом конечной пропускной способности вакуумной коммуникации. Показана возможность использования в качестве насос-компрессора на установке образцов быстроходных машин, выпускаемых отечественной промышленностью.

## **Апробация работы**

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 научных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Результаты исследований были представлены в виде научного доклада на 8-ой конференции в Копенгагене, Дания, имени Густава Лоренцена Conference on Natural Working Fluids, «Vacuum methods of water ice formation».

Установка была представлена на Международной специализированной выставке и конференции холодильной промышленности «ХолодЭкспо Россия 2009»

## **Структура и объем работы**

Объем диссертации составляют 120 страниц, включающих 54 рисунков, 5 таблиц. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений, списка используемой литературы, включающего ссылки на 56 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 в виде водолеяных суспензий. Состояние вопроса и задачи исследования.**

Рассмотрено состояние вопроса получения и применения водного льда в мелкодисперсном состоянии в составе водолеяных суспензий в различных отраслях промышленности. Дано описание методов получения водолеяной суспензии и применение ее для различных целей.

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

В зарубежной научно-технической литературе практически отсутствуют публикации по использованию двухроторных вакуумных насос-компрессоров 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 крайне редки публикации по описанию процесса замерзания водных капель в вакуумируемом объеме гермокамеры.

Сравнение энергетических параметров установок, использующих воду как холодильный агент, в зарубежных и отечественных публикациях проводились для замкнутых циклов и машин большой холодильной мощностью.

Создание вакуумных льдогенераторов в нашей стране в настоящее время находится в стадии развития. Учитывая потребность сельского хозяйства и малого предпринимательства в подобных машинах малой и средней холодопроизводительности, обоснована необходимость исследований в данной области.

## **Глава 2. Аналитическое решение задачи замерзания мелкодисперсных капель воды, диспергируемых в вакуумируемое пространство гермокамеры.**

Описание процесса вакуумного метода генерации мелкодисперсного водного льда основано на физических представлениях о процессах, происходящих в факеле жидкости диспергируемой в вакуумированное пространство гермокамеры.

Процессы получения вещества в мелкодисперсном состоянии в разное время изучали в МИХМе, (ныне МГУИЭ) такие исследователи как профессора Гухман А.А., Бражников С.М., активно продолжают сложившиеся традиции по этому направлению сегодня профессора Генералов М.Б., Вольнец А.З. и их ученики и последователи.

В процессе испарения и сублимации паров воды с поверхности диспергируемых капель происходит интенсивный отвод тепла с порциями паров, которые отводятся в водяной конденсатор.

На начальном этапе организации процесса в системе создается предварительное разрежение с остаточным давлением около 3-8 мм.рт.ст. После чего начинается скоростная откачка, вследствие которой создается требуемый уровень вакуума в гермокамере-генераторе. Затем через форсунку, смонтированную в гермокамере-генераторе, подается рабочее вещество (вода) с околонулевой температурой. В результате диспергирования воды в вакуумируемое пространство камеры происходит испарение и замерзание капель воды. 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 метода получения мелкодисперсного водного льда сделаны следующие допущения: начальная температура капли воды равна  $0^{\circ}\text{C}$ , фронт кристаллизации представляет собой сферу с переменным радиусом, рассматривается стационарное распределение температур в сферическом слое твердой фазы, теплота сублимации  $(L+r)$  постоянна, закон изменения давления насыщенных паров от температуры известен.

Вакуумирование полости осуществляется с эффективной скоростью откачки  $S_{\text{эф}}$ , которая остается постоянной в том диапазоне давления, при котором протекает процесс (см. рисунок 1).

Теплофизические свойства воды и водного льда известны — это молекулярная масса, теплота сублимации  $L^*$ , теплота замерзания  $L$ , температура замерзания  $T_{\text{ф}}$ , плотность льда  $\rho_{\text{л}}$ , коэффициент теплопроводности льда  $\lambda$ .

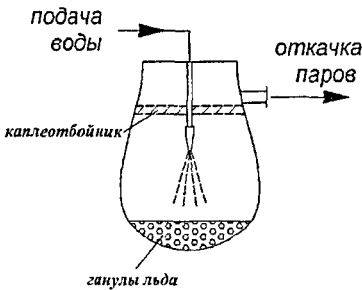


Рисунок 1. Схема вакуумного воздействия на замораживаемую жидкость

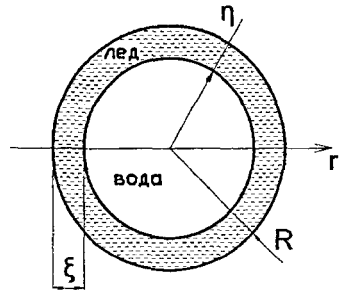


Рисунок 2. Схема промерзания капли воды

Понижение давления в гермокамере осуществляется первоначально до давления насыщенных паров при соответствующей температуре, распыляемой в нее жидкости. Далее происходит дальнейшее понижение упругости паров, сопровождающееся интенсивным отводом тепла и понижением температуры на поверхности раздела лед-пар ниже  $0^\circ\text{C}$ .

При принятых обозначениях на рисунке 2  $\eta$  — радиус поверхности фронта фазового превращения лед-вода по координате  $r$ .

На границе раздела «лед—пар» можно записать условие:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = S^* \cdot L \cdot \rho'' \quad (1)$$

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

$\rho''$  — упругость насыщенных паров воды.

На границе фронта фазового превращения «лед—вода» условие теплового взаимодействия определяется как

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=\eta} = L \cdot \frac{\partial \eta}{\partial \tau} \cdot \rho_{\text{л}} \quad (2)$$

Согласно рекомендациям профессора Лейбензона Л.С. распределение температуры в сферическом слое твердой фазы примем как стационарное:

$$T(r, \tau) = \frac{T_{\text{ф}} - T_0}{R - \eta} \cdot R \cdot \left( \frac{\eta}{r} - 1 \right) + T_0 \quad (3)$$



Продифференцируем уравнение (3):

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} = \frac{T_\phi - T_0}{R - \eta} \cdot \left( -\frac{R \cdot \eta}{r^2} \right)$$

Подставим уравнение (3) в граничные условия (1):

$$\frac{T_\phi - T_0}{R - \eta} \cdot \frac{\eta}{R} = \frac{S^* \cdot L^*}{\lambda} \cdot \frac{P \cdot \mu}{T_0 \cdot R_r} \quad (4)$$

где:

$$\rho^* = \frac{P \cdot \mu}{T_0 \cdot R_r};$$

Подставив уравнение (3) в граничные условия (2), получим:

$$\frac{T_\phi - T_0}{R - \eta} \cdot \left( -\frac{R}{\eta} \right) = \frac{L \cdot \rho_s}{\lambda} \cdot \frac{d\eta}{d\tau} \quad (5)$$

Разделяя переменные полученного уравнения (5) и интегрируя его, приходим к уравнению (6):

$$\begin{aligned} -\frac{L \cdot \rho_s}{\lambda \cdot R \cdot (T_\phi - T_0)} \cdot \left[ \frac{R \cdot \eta^2}{2} - \frac{\eta^3}{3} \right]_R^{\eta} &= \tau \Big|_0^{\tau} \\ \frac{L \cdot \rho_s}{\lambda \cdot R \cdot (T_\phi - T_0)} \cdot \left[ \frac{\eta^3}{3} - \frac{R \cdot \eta^2}{2} + \frac{R^3}{6} \right] &= \tau \\ T_0 = T_\phi - \frac{L \cdot \rho_s}{\lambda \cdot R \cdot \tau} \left( \frac{\eta^3}{3} - \frac{R \cdot \eta^2}{2} + \frac{R^3}{6} \right) & \quad (6) \end{aligned}$$

Данное уравнение (6) является ключевым, так как оно содержит помимо фактора времени  $\tau$  и искомый параметр — координату фронта фазового превращения внутри капли  $\eta$ . Зависимость упругости паров воды над льдом можно выразить в виде аппроксимационного выражения, которое дает вполне удовлетворительные результаты в диапазоне температур 0 °С...-15 °С с погрешностью 3—5%.

$$P = 35 \cdot T_0 - 8940 \quad (7)$$

Тогда, подставив уравнение (7) в (4) с учетом уравнения (6) получим:

$$\frac{L \cdot \rho_s}{R \cdot \tau \cdot (R - \eta)} \cdot \left( \frac{\eta^4}{3 \cdot R} + \frac{R^2 \cdot \eta}{6} - \frac{\eta^3}{2} \right) = \frac{S^* \cdot L^* \cdot \mu}{R_r} \cdot \left( 35 - \frac{8940}{T_\phi - \frac{L \cdot \rho_s}{\lambda \cdot R \cdot \tau} \cdot \left( \frac{\eta^3}{3} + \frac{R^2}{6} - \frac{R \cdot \eta^2}{2} \right)} \right) \quad (8)$$

Полученное результирующее уравнение (8) представлено в неявном виде относительно искомого параметра  $\eta$ . В нём удалось связать теплофизические свойства жидкости, геометрический размер капли со скоростью откачки насос-компрессора  $S^*$ .

Диспергированные капли, витая в объеме гермокамеры охлаждаются с последующим замерзанием частично или полностью в зависимости от условий тепломассообмена, геометрических размеров, фактора времени и температуры. Поэтому возникает необходимость связать режим диспергирования с размерами получаемых капель воды.

На опытном стенде в качестве распыливающего устройства была использована струйная форсунка с диаметром сопла  $D_c = 1,4$  мм.

Для расчета диаметра получаемых капель при диспергировании воды в вакуумируемое пространство было использовано следующее критериальное уравнение (9):

$$\frac{D_M}{D_c} = 1.1 \cdot We^{-0.3} \cdot Lp^{-0.07} \cdot M^{0.3} \quad (9)$$

- где  $D_M$  — средний межданный диаметр капель;  
 $D_c$  — диаметр сопла форсунки;  
 $We$  — критерий Вебера;  
 $Lp$  — критерий Лапласа;  
 $M$  — параметр отношения плотности жидкости к газу.

### Глава 3. Опытная установка для получения мелкодисперсного водного льда в условиях вакуума.

Для изучения режимов работы и снятия характеристик вакуумного генератора мелкодисперсных частиц льда на кафедре «Холодильная и криогенная техника» Московского государственного университета инженерной экологии был создан экспериментальный стенд, схема которого представлена на рисунке 3. Основное назначение установки: исследование динамики замораживания мелкодисперсных капель воды и параметров, влияющих на этот процесс.

Гермокамера-генератор представляет собой цилиндрический сосуд с внутренним диаметром 400 мм, выполненный из алюминиевого сплава с толщиной стенки 4 мм и емкостью 150 л с герметично закрывающейся прозрачной крышкой из орг.стекла. Паровое пространство камеры соединяется с основным насос-компрессором вакуумной коммуникацией. Предварительные опыты показали, что сетевая вода содержащая незначительное количество солей и дистиллированная вода дают идентичные результаты 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 диспергировании в гермокамеру-генератор и их сжатие до давления конденсации. В качестве основного вакуумного насоса-компрессора использовали двухроторную машину отечественного

производства, производительностью 150 л/с (основной насос-компрессор), а вспомогательного — 3 л/с.

Конденсатор кожухотрубчатый, с теплопередающей поверхностью 4 м<sup>2</sup> и водяным охлаждением. Конденсация паров осуществляется в межтрубном пространстве, охлаждающая вода протекает внутри медных трубок Ø16×1,5 мм.

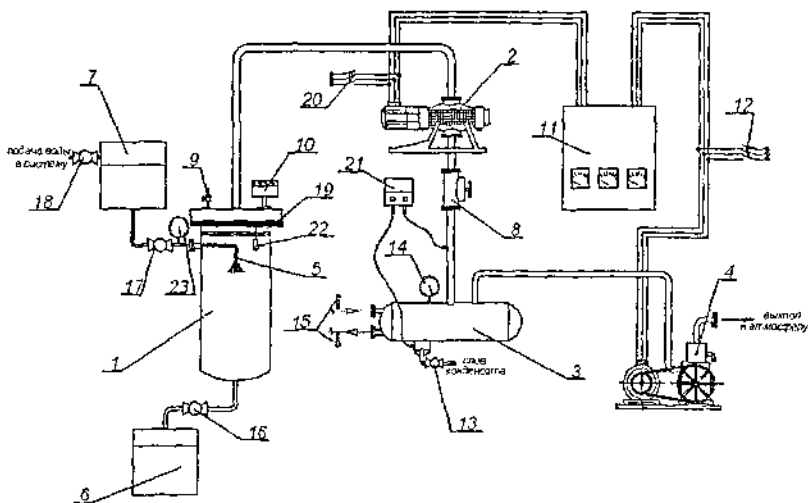


Рисунок 3. Схема вакуумной установки для получения мелкодисперсного водного льда

1 - бак испаритель; 2 - основной вакуумный насос-компрессор (ДВН-150); 3 - конденсатор; 4 - вспомогательный вакуумный насос (РВН-20); 5 - струйная форсунка; 6 - бак-сборник водоледяной суспензии; 7 - водяной бак; 8,13,16,17,18 - запорные вентили; 9 - вентиль натекаемый; 10 - цифровой прибор измерения вакуума; 11 - комплект для измерения вольтамперных характеристик К-505; 12 - выключатель вспомогательного насоса; 14,23 - мановакууметр; 15 - температурные датчики; 19 - каплеотбойник; 20 - выключатель основного насоса, 21 - двухканальный цифровой измеритель температуры ТРМ-202; 22 - лампа светодиодная.

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

Измерения остаточного давления в герметичной полости гермокамеры-генераторе выполнялись высокоточным электронным вакууметром комбинированного типа Mini-Convectron. 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.

Полученные в ходе опытов мелкодисперсные частицы водного льда собирались в донной части гермокамеры-генератора посредством ловушки и в дальнейшем исследовались под микроскопом МБС - 10 с разрешающей способностью 150 штр./мм с целью выявления распределения частиц водного льда по характерному геометрическому размеру-диаметру.

На установке также предусмотрено измерение напряжения, силы тока и мощности, подаваемые на основной и вспомогательный насосы при помощи лабораторного автотрансформатора «Комплекта измерительного К505», что позволило оценить затраты энергии на производство холода. Предельные относительные погрешности измерений потребляемой внутренней мощности составили в соответствии с ГОСТ 8746-93 не более  $\delta N = 1,0$  %.

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 %.

#### **Глава 4. Результаты экспериментальных исследований вакуумного генератора водного льда мелкодисперсной структуры.**

В результате полученных опытных данных по промерзанию капли в вакуумируемом пространстве гермокамеры и результатов аналитического решения, была построена зависимость глубины промерзания капли воды диаметром 4 мм от времени, которая представлена на графике (рисунок 4).

Одним из важных вопросов при проведении опытов являлось определение энергоэффективности вакуумно-сублимационного метода получения мелкодисперсного водного льда в зависимости от температуры воды, подаваемой на диспергирование. В результате проведенных опытов была определена массовая производительность установки по генерации мелкодисперсного льда с учетом температуры воды, поступающей на диспергирование. На рисунке 5 представлена такая зависимость. Расчетные данные по динамике замораживания капель воды различных диаметров приведены на рисунке 4. Опыты замораживания отдельной капли фиксированного диаметра показали удовлетворительную сходимость с расчетными данными.

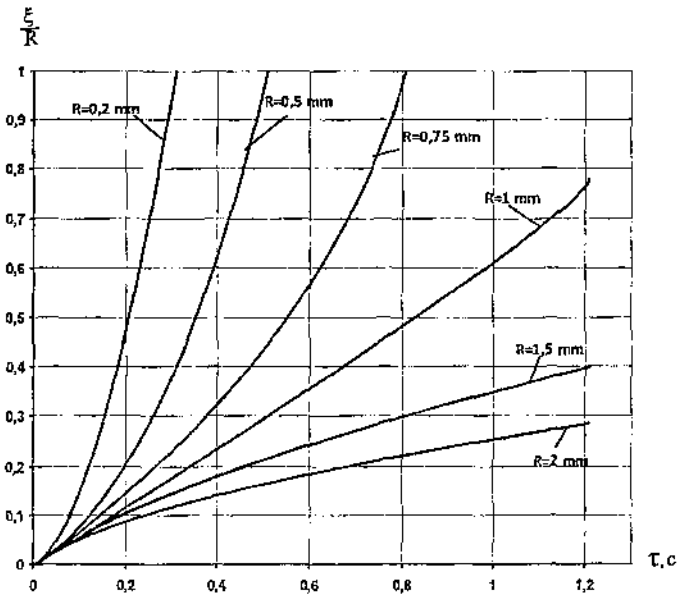


Рисунок 4. Зависимость относительной глубины промерзания капель различного радиуса в условиях вакуумирования среды от времени.

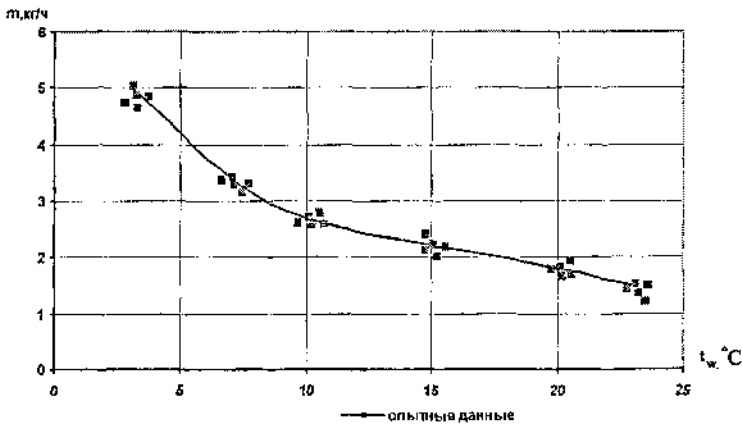


Рисунок 5. Массовая часовая производительность мелкодисперсного водного льда, получаемого на опытной установке в зависимости от начальной температуры диспергируемой воды.

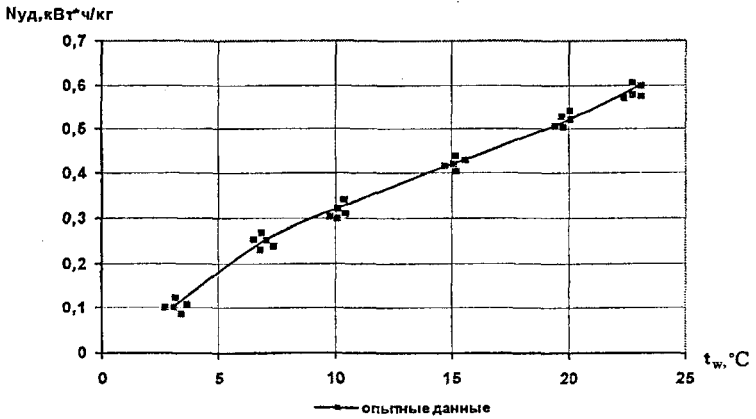


Рисунок 6. Зависимость мощности, потребляемой на опытной установке при получении единицы массы мелкодисперсного водного льда от начальной температуры диспергируемой воды

Исследование установки на разных температурных режимах, позволило сделать вывод, что энергетически выгодным является режим диспергирования воды с околонулевой температурой, что наглядно демонстрирует рисунок 6.

Полученные в ходе серии опытов мелкодисперсные гранулы водного льда были исследованы под стереоскопическим микроскопом МБС-10. В результате была построена кривая плотности распределения гранул водного льда по показателю их геометрической характеристики.

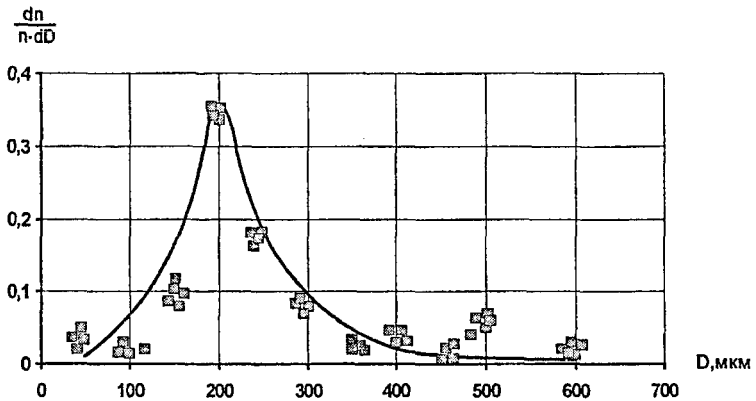


Рисунок 7. Характеристика плотности распределение гранул водного льда по геометрическому диаметру

Правдоподобие гипотезы нормального распределения частиц водного льда по геометрическому параметру было подтверждено с помощью критерия согласия А.Н. Колмогорова с вероятностью  $P(\lambda)=0,875$ . Характеристики распределения: матожидание  $Mx=211,4$  мкм; среднеквадратичное отклонение  $\sigma=94$  мкм.

Проведенные опыты позволяют утверждать, что перепад давления, создаваемый на форсунке, был достаточен для получения факела диспергируемой воды с ожидаемыми геометрическими характеристиками, которые согласуются с расчетными по уравнению (9).

На основании этого была создана расчетная методика проектирования вакуумного генератора водного льда мелкодисперсной структуры.

## **Глава 5. Практическое применение вакуумных льдогенераторов по производству мелкодисперсного водного льда.**

Холодильная техника является энергоемкой отраслью промышленности. Применение вакуумных льдогенераторов мелкодисперсного льда 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. Используя вакуумные льдогенераторы в качестве аккумулятора холода в ночное время со сниженными тарифами, можно существенно повысить энергосбережение в часы пиковых нагрузок. Стоит отметить, что они не требуют высококвалифицированного обслуживания, и при этом являются экологически безопасными.

Применение подобных установок в кондиционировании также выгодно, так как вода, используемая для получения водоледяной суспензии, является холодильным агентом, что упрощает и удешевляет систему. Также уменьшаются расходы на электроэнергию, связанные с перекачкой шуги насосами, а по сравнению с водой шуга имеет хладоемкость в 4-5 раз больше, что позволяет снизить металлоемкость системы.

Еще одним преимуществом применения вакуумных льдогенераторов водного льда является то, что схема организации процесса замораживания воды с помощью вакуумной установки упрощается по сравнению с классической парокompрессионной, так как фактически становится не нужен теплообменник-испаритель. Замораживание мелких капель воды производится в гермокамере-генераторе, которая одновременно служит как испаритель и может являться сменным технологическим аппаратом.

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

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

Приведены расчетные и опытные характеристики вакуумных генераторов мелкодисперсного водного льда и проведено сравнение с аналогичными парокомпрессионными льдогенераторами, использующими в качестве холодильного агента фреоны.

Данный льдогенератор Scotsman AF-200 AS производит высококачественный гранулированный лед /типа ледяная шуга/ с размером частиц 5...10 мм и температурой  $-0,5^{\circ}\text{C}$  при влажности 75%. Основными элементами льдогенератора являются неподвижный вертикальный теплоизолированный цилиндр-испаритель, в межстеночном пространстве которого проложен змеевик, шнек, емкость-накопитель воды, водяной коллектор, компрессорно-конденсаторный агрегат с конденсатором водяного охлаждения, с системой холодильных трубопроводов и арматурой. Энергопотребление фреонового льдогенератора составляет 0,5 кВт при температуре входящей воды  $+3^{\circ}\text{C}$ , производительность 120 кг/сут.

Вакуумный льдогенератор по получению мелкодисперсного водного льда, состоит из вакуумного насоса-компрессора НВД-200, потребляющего 400 Вт электроэнергии и дополнительного вакуумного насоса, потребляющего 120 Вт электроэнергии. Также в составе установки имеется гермокамера-генератор, в которой смонтирован каплеотбойник и форсунка для диспергирования воды, и водяной конденсатор. Суммарно вакуумная установка потребляет 0,52 кВт электроэнергии при температуре поступающей воды в генератор  $+3^{\circ}\text{C}$  и производительности 120 кг/сут.

Затраты электроэнергии составляют соответственно 0,1 кВт\*ч/кг для традиционной парокомпрессионной установки и 0,104 кВт\*ч/кг 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.

	Фреоновый льдогенератор	Вакуумный льдогенератор
Холодильный агент	R404a	вода
Масса получаемого льда, кг/сут	120	120
Потребляемая мощность, кВт	0,5	0,52
Температура воды на входе в льдогенератор, $^{\circ}\text{C}$	+3	+3
Время получения требуемого количества льда, ч	24	24
Удельные затраты энергии, на производство 1 кг льда, кВт*ч/кг	0,1	0,104



Как видно из таблицы 1, вакуумный льдогенератор и фреоновая пароконденсационная установка аналогичного назначения по энергетическим параметрам сопоставимы друг с другом. Несмотря на паритет по потребляемой электрической мощности между установками, вакуумный льдогенератор имеет в своем составе меньший набор оборудования, легко обслуживается и не производит отрицательного воздействия на окружающую среду.

## **Основные результаты и выводы**

- Создан стенд-имитатор вакуумного льдогенератора по получению мелкодисперсного водного льда.

- Получены основные характеристики вакуумного генератора мелкодисперсного водного льда, работающего в различных режимах испытаний.

- Выявлен энергетически выгодный режим работы льдогенератора.

- Экспериментально подтверждены технологические преимущества вакуумного метода получения мелкодисперсного водного льда методом диспергирования воды по сравнению с существующими льдогенераторными установками, работающими на традиционных холодильных агентах (HFC).

- На основе физических представлений о процессе предложено аналитическое описание процесса замерзания капель жидкости в вакуумируемом объеме гермокамеры-генератора.

- Расхождение между полученными опытными данными и аналитическим расчетом невелико и находится в пределах 8-11 %.

- Разработана инженерная методика расчета производительности вакуумных генераторов мелкодисперсного водного льда.

- Создана программа для проектного расчета вакуумных льдогенераторов с использованием ЭВМ.

### Условные обозначения:

$\mu$  — молекулярная масса воды, кг·моль<sup>-1</sup>;  $L$  — удельная теплота замерзания воды, Дж·кг<sup>-1</sup>;  $L^*$  — удельная теплота сублимации, Дж·кг<sup>-1</sup>;  $R_g$  — универсальная газовая постоянная;  $\lambda$  — теплопроводность льда, Вт·К<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>;  $\tau$  — время, с;  $\xi$  — толщина слоя льда, м;  $\eta$  — радиус жидкой фазы внутри сферы до границы льда, м;  $R$  — радиус капли, м;  $D_c$  — диаметр сопла форсунки, м;  $\rho_{\text{л}}$  — плотность льда, кг·м<sup>-3</sup>;  $\rho''$  — упругость насыщенных паров воды, кг·м<sup>-3</sup>;  $T_{\text{ф}}$  — температура фазового перехода воды в лед, К;  $T_0$  — температура поверхности капли;  $S^*$  — скорость откачки основного насоса, отнесенная к единице площади поверхности, с которой сублимируется водяной пар, м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>.

### 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. «Оценка расхода энергии при получении водного льда в холодильных установках различных типов» / Маринюк Б.Т., Сусликов Д.В. // Холодильная техника. — 2008. — №12 — С. 20—22.

3. 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.

4. Маринюк Б.Т. «Аспекты применения вакуумных насос-компрессоров в холодильных установках по генерации водного льда» / Маринюк Б.Т., Сусликов Д.В., Ермолаев А.Е., / Научная конференция студентов и молодых ученых МГУИЭ: тезисы докладов — М.: МГУИЭ, 2008

5. Маринюк Б.Т. «Получение водолеяной суспензии методом распыла воды в вакуумируемом пространстве» / Маринюк Б.Т., Сусликов Д.В. / Научная конференция студентов и молодых ученых МГУИЭ: тезисы докладов — М.: МГУИЭ, 2009

6. Маринюк, Б.Т. «Метод получения водолеяной суспензии на основе вакуумной технологии» / Б.Т. Маринюк, Д.В. Сусликов // Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии: сборник научных трудов. Выпуск 4. — М.: МГУПБ, 2008. — С. 82—85.

7. Маринюк Б.Т. «Получение воды при околонулевой температуре» / Маринюк Б.Т., Хегazi А.А., Сусликов Д.В // Холодильная техника. — 2009. — №6 — С. 16—18.

---

**Подписано в печать «    » октября 2009 г.**

**Печать офсетная. Бумага 80 г/м<sup>2</sup>**

**Формат 60 x 90/16. Объем 1,0 п.л.**

**Тираж 80 экз. Заказ №**

**Оригинал подготовлен автором**

**Отпечатано на множительной технике МГУИЭ**

**105066, г. Москва, ул. Старая Басманная, 21/4**