

На правах рукописи
УДК 621.584.4

Егорова Анна Игоревна

СОЗДАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ШУГООБРАЗНОГО ЛЬДА
С ИНДУКЦИОННЫМ ЛЬДОУДАЛЕНИЕМ

Специальность 2.4.8 Машины и аппараты, процессы холодильной
и криогенной техники

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: кандидат технических наук,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Кротов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»,
профессор кафедры Низких температур (НТ)
Бухаров Александр Васильевич

кандидат технических наук,
ООО «ТехноФрост»,
руководитель отдела развитий компетенций
Малафеев Илья Игоревич

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности (ВНИХИ) - филиал ФГБНУ "ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова" РАН

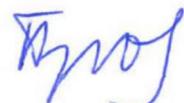
Защита состоится «20» ноября 2024 года в 14 часов на заседании Диссертационного совета 24.2.331.22 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение», 3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5. к. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.22.

Автореферат разослан «___» 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.22
кандидат физико-математических наук



А.А. Протопопов

Актуальность работы:

Роль вторичных хладоносителей в промышленном и коммерческом охлаждении растет в связи с увеличением выбросов гидрофторуглеродов в атмосферу в системах непосредственного кипения хладагента. В то же время энергопотребление систем с вторичными хладоносителями повышается от 10 до 20%, что влечет за собой увеличение выбросов углекислого газа от производства электроэнергии.

Согласно Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. (распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р) в число мероприятий по её реализации входит повышение эффективности систем теплохолодоснабжения.

По состоянию на март 2023 года энергопотребление холодильного оборудования и систем кондиционирования воздуха составило до 20 % всей произведенной в мире электроэнергии, что соответствовало примерно 8 % мировых выбросов парниковых газов.

Потенциально возможно снизить возросшее энергопотребление систем с вторичными хладоносителями в суточном эквиваленте до 5% относительно системы непосредственного кипения хладагента, если вместо жидкостей в режиме аккумуляции холода использовать двухфазный хладоноситель. Результат достигается за счет периодической работы холодильной машины вне времени пиковых нагрузок, например, ночью. В итоге суточное энергопотребление, а также стоимость электроэнергии за счет ночного тарифа снижается, однако капитальные затраты на оборудование для производства двухфазного хладоносителя выше.

Распространенный вид двухфазного хладоносителя – шугообразный лёд (жидкий лёд, ледяная шуга, айс сларри). Это – микроскопические частицы льда размером около 500 мкм в водном растворе, включающем соли, гликоли, спирты. При концентрации кристаллов льда в объеме жидкости до 30% шугообразный лёд обладает свойствами ньютоновской жидкости и может быть перекачан по системе трубопроводов насосами. Дополнительная энергетическая ёмкость за счет теплоты фазового перехода обеспечивает высокую интенсивность теплоотдачи, создает стабильный температурный режим хладоснабжения. Таким образом, снижаются количество хладоносителя в системе и затраты на его перекачивание, уменьшаются диаметры трубопроводов и размеры теплообменников.

Обширный перечень сфер применения шугообразного льда как в качестве хладоносителя промышленного ходоснабжения, систем вентиляции и кондиционирования, так и среди непосредственного охлаждения в разных отраслях экономики от пищевой промышленности до медицинского применения на тканях человека дал развитие темам, связанным с двухфазными хладоносителями ещё в конце 20-го века. Самый распространенный аппарат для производства шугообразного льда – скребковый генератор, в котором на цилиндрической стенке теплообменного аппарата, охлаждаемой кипящим хладагентом, намерзает лёд. С поверхности стенки лёд удаляется врачающимся вокруг своей оси скребком. Эта технология, как и другие способы производства

ледяной шуги (вакуумные генераторы, генераторы-переохладители), имеют недостатки, что стало одной из причин низкой распространенности двухфазных хладоносителей в промышленности. Повысить привлекательность ледяной шуги можно, во-первых, уменьшением энергопотребления систем холоснабжения на таком двухфазном хладоносителе (за счет снижения разности температур кипения хладагента и кристаллизации раствора), во-вторых, применением более дешевого оборудования для его производства.

Внедрение в контур холоснабжения генератора ледяной шуги, обладающего вышеперечисленными преимуществами, позволит снизить эксплуатационные затраты систем с малой заправкой хладагента и разветвленными потребителями холода, составить конкуренцию системам с однофазными вторичными хладоносителями и существующим методам генерации льда.

Рабочая гипотеза:

Согласно теории индукционного нагрева, воздействие переменного магнитного поля индуцирует в металлической поверхности проводника вихревые токи, которые вызывают её нагрев. Таким образом, ожидается, что на теплообменной поверхности со слоем льда в результате воздействия переменного магнитного поля будет образовываться расплавленный контактный слой. Если теплообменная поверхность будет находиться в потоке жидкости, то лёд над контактным слоем может быть унесен потоком. За счет малого теплопритока при воздействии переменного магнитного поля с кратковременным интервалом и непрерывного охлаждения теплообменной поверхности на ней можно добиться стабильной кристаллизации.

Ожидаемое производство льда в непрерывном режиме, отказ от механического привода для отделения слоя льда, использование тонкостенной теплообменной поверхности дают основания выдвинуть гипотезу о том, что генератор шугообразного льда, работающий по указанному принципу, может генерировать лёд с меньшей разницей температур кипения хладагента и кристаллизации, чем это необходимо скребковым генераторам, с типичными для шугообразного льда размерами кристаллов.

Степень разработанности темы:

Среди ученых, плодотворно работавших в указанном направлении, и на публикации которых автор опирался при решении задач диссертации, следует назвать Алексея Александровича Круглова (ИТМО, г. Санкт-Петербург), который работает над вакуумно-испарительными методами производства ледяной шуги, Бориса Тимофеевича Маринюка (МИХМ, г. Москва), который занимался вопросами теплообмена и математического моделирования процессов кристаллизации, Михаэля Кауффельда (Германия), который несколько десятилетий занимается изучением как свойств шугообразного льда, так и энергоэффективными способами его генерации. Он же продемонстрировал применение эффекта электромагнитной индукции для льдоудаления и её потенциал с точки зрения энергетической эффективности. Разработка носила демонстрационный характер и не являлась генератором ледяной шуги непрерывного действия. Разрабатываемый в данной работе

генератор с индукционным льдоудалением представляет собой аппарат непрерывного действия, который может рассматриваться как полноценный аналог скребкового генератора.

Объект исследования – генератор шугообразного льда с индукционным льдоудалением.

Предмет исследования – развитие энергосберегающих технологий при производстве двухфазного хладоносителя холодильной машины.

Цели и задачи работы:

Целью данного исследования является разработка методики расчета и лабораторного образца генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением для повышения энергетической эффективности производства двухфазного хладоносителя.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. разработка способа производства ледяной шуги и конструкции генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением, основанных на рабочей гипотезе;
2. разработка методики расчета режима работы и производительности генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением;
3. изготовление экспериментального стенда и лабораторного образца генератора для исследования теплообмена, кристаллизации и режимов работы лабораторного генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением;
4. экспериментальные исследования процессов теплообмена и кристаллизации, обработка результатов, оценка эффективности и качества процесса льдогенерации;
5. валидация результатами эксперимента математической модели, на которой основана методика расчета режима работы и производительности;
6. апробация методики расчета режима работы и производительности генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением;
7. выработка практических рекомендаций по выбору размеров и режимам работы генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением.

Научная новизна:

1. Впервые разработана методика расчета режима работы и производительности генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением.
2. Предложены и валидированы результатами эксперимента поправочные коэффициенты в уравнении расчета доли жидкости в объеме межтрубного пространства при расходе раствора для производства шугообразного льда от 0 до 11,5 л/мин.
3. Получены и аналитически обоснованы экспериментальные зависимости производительности генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением в диапазоне от 14,7 кг/ч до 18,3 кг/ч по льду и интенсивности кристаллизации для 5% водного раствора пропиленгликоля в зависимости от расхода раствора.

Практическая значимость:

1. Разработан и экспериментально исследован лабораторный образец генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением в диапазоне расходов раствора для производства шугообразного льда от 9,16 л/мин до 11,45 л/мин.

2. Экономия электроэнергии на примере системы холодопроизводительностью 100 кВт в режиме аккумуляции холода составляет 11739 кВт·ч в год относительно аналогичной системы со скребковым генератором и соответствует снижению энергопотребления на 8 %. При сравнении с системой непосредственного кипения хладагента экономия составит 14367 кВт·ч или снижение энергопотребления на 9 %.

3. Разработаны рекомендации по проектированию и выбору режимов работы генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением для достижения высокой производительности.

4. Результаты работы внедрены в деятельность ООО «СоюзХолод».

5. Результаты работы используются в рамках дисциплины «Теоретические основы холодильной техники» кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Методология и методы исследования:

1. Математическое моделирование нестационарного теплообмена.
2. Экспериментальное исследование теплообмена.
3. Экспериментальная валидация результатов численного моделирования теплообмена.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ производства шугообразного льда в теплообменном аппарате типа «труба в трубе» с индукционным льдоудалением.

2. Результаты аналитических и экспериментальных исследований режимов работы лабораторного генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением и его производительности по льду.

3. Методика расчета режима работы и производительности генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением на основе нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности Фурье.

4. Рекомендации по выбору размеров и режимам работы генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением и предложения по совершенствованию конструкции генераторов подобного типа.

Апробация работы:

Основные результаты выполненных исследований докладывались автором на 4 конференциях, в том числе на 3-х международных научно-технических конференциях:

- XXVII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2021 г.);

- 13-й Международной конференции по теплоносителям с фазовым переходом и сусpenзиям для охлаждения и кондиционирования воздуха «PCM 2021» (Виченца, Италия, 2021 г.);

- Международной научно-практической конференции «Применение низких температур в науке и промышленности» (Москва, 2022 г.);
- XXXIX Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2023 г.).

Личный вклад автора:

Личный вклад автора заключается в разработке конструкции лабораторного генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением, проведении теоретических и экспериментальных исследований производства шугообразного льда, разработке математической модели расчета генераторов шугообразного льда. Автором предложена методика расчета режима работы и производительности генератора шугообразного льда и определены границы её применимости; проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований, на их основе даны рекомендации по усовершенствованию конструкции, оптимальной геометрии генератора шугообразного льда и режимам работы с максимальной производительностью.

Публикации:

Основное содержание диссертации изложено в пяти работах, из которых три соответствуют категории индексации журналов К1, две опубликованы в сборниках тезисов докладов конференций. Зарегистрирована программа для ЭВМ.

Благодарности:

Автор благодарит сотрудников кафедры Э4 «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» и сотрудников отдела НИИ ЭМ 3.1. Особую благодарность автор выражает Рябикину Сергею Сергеевичу за помощь в проведении исследований, подготовке материалов докладов, подготовке и обсуждении работы.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка использованной литературы. Объем работы 155 страниц основного текста, включая 55 рисунков, 22 таблицы и 108 наименований источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования. Приведены научная новизна и практическая ценность выполненных исследований, указан личный вклад соискателя, представлены сведения об апробации результатов диссертационной работы и публикациях.

В первой главе проведен анализ предпосылок перехода к двухфазным хладоносителям. Проведен краткий обзор работ, посвященных оценке эффективности двухфазных хладоносителей и областей их применения, обоснован выбор шугообразного льда для исследования в данной работе. Из анализа опубликованных работ следует, что существующие технологии производства шугообразного льда наряду с различными достоинствами обладают недостатками, которые связаны с ограниченной производительностью и расходом получаемого хладоносителя, высоким энергопотреблением из-за разности температур между охлаждающим веществом и температурой кристаллизации, со стабильностью работы генераторов. При этом, несмотря

на многолетний практический опыт эксплуатации генераторов, вопрос разработки комплексной методики их расчета и описания теплообмена остается актуальным. Рассмотрены современные направления научных исследований в области генерации льда, которые характеризуются бесконтактной кристаллизацией, либо бесконтактным отделением льда от поверхности кристаллизации.

По итогам сравнения систем холоснабжения с непосредственным кипением хладагента, чиллера на однофазном хладоносителе и чиллера на шугообразном льде, установлено, что самая низкая температура кипения потребуется именно для системы с двухфазным вторичным хладоносителем (шугообразным льдом). Это приводит к наибольшему энергопотреблению холодильного компрессора среди сравниваемых систем. Шугообразный лёд становится выгодным в случае аккумуляции холода вне пиковых нагрузок, с суточной работой холодильной установки в течение нескольких часов. На основании обзора сформулирован вывод о целесообразности снижения разности температур кристаллизации и кипения хладагента при производстве шугообразного льда с целью снижения затрат на электроэнергию для системы холоснабжения.

Рассмотрены бесконтактные методы очистки поверхностей обледенения, представлен метод, на котором основана рабочая гипотеза диссертации. Сформулирована цель исследования, поставлены задачи работы.

Во второй главе описан способ производства ледяной шуги в генераторе типа «труба в трубе» с индукционным льдоудалением, основанный на явлении образования вихревых токов, индуцированных переменным магнитным полем, на внешней поверхности проводника. Разработана методика расчета генератора шугообразного льда, которая включает в себя расчет этапов кристаллизации, воздействия индуктора на теплообменную поверхность, захолаживания телообменной поверхности.

Моделирование кристаллизации выполнено по методу информационно-вероятностного подхода Маринюка Б.Т. и по методу энталпийной пористости.

Для моделирования кристаллизации на трубе информационно-вероятностным подходом применяется нелинейное дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье в цилиндрических координатах r - τ

$$C_p(T)\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_0}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (1)$$

где $C_p(T)$ – удельная теплоемкость льда, зависящая от температуры, Дж/(кг·К); ρ – плотность льда, кг/м³; τ – текущее время, с; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности льда, зависящий от температуры, Вт/(м·К); λ_0 – коэффициент теплопроводности водного льда при температуре фазового перехода, Вт/(м·К); r – цилиндрическая координата в слое намораживаемого льда.

В результате решения вычисляется коэффициент β , с помощью которого определяется толщина льда ξ на теплообменной поверхности в мм:

$$\xi = \beta \cdot \sqrt{\tau} \quad (2)$$

Было установлено, что при температуре стенки 270,15 К и температуре кристаллизации 272,65 К толщина слоя льда через 5 секунд от начала кристаллизации составляет 0,42 мм и увеличивается до 1,47 мм к 60 секунде. На основе этих результатов был рассчитан необходимый теплоприток от индукционного нагревателя, глубина прогрева трубы при воздействии магнитного поля, фактический теплоприток для оттаивания слоя льда наибольшей толщины. Было установлено, что на отвод излишка теплопритока от нагрева 125 Дж для потока хладоносителя с параметрами $\Delta T_{xH} = 1,5$ К и $G = 0,2$ кг/с требуется менее 1 секунды.

Для верификации применяемой модели выполнен расчет времени намораживания льда по методике Чуклина С.Г. для скребковых генераторов. Результаты, представленные на Рисунке 1, демонстрируют расхождение результатов: согласно расчету по методике Чуклина С.Г, потребуется меньше времени на намораживание слоя льда аналогичной толщины. Такое расхождение можно объяснить изменяющимся слоем термического сопротивления для разрабатываемого генератора, в то время как в скребковом генераторе это значение постоянно и зависит от зазора между теплообменной стенкой и скребком. Сделан вывод о том, что целесообразно применение для расчета разрабатываемого генератора модели общего случая намораживания льда. Погрешность на интервале времени кристаллизации от 15 до 35 секунд составляет не более 10 %.

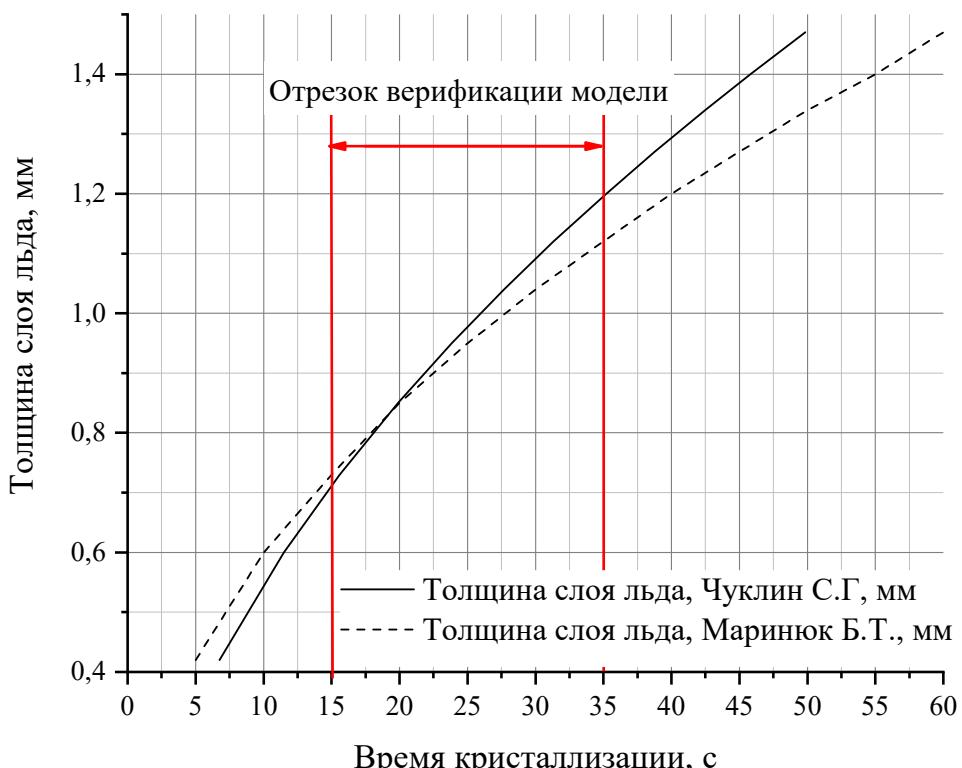


Рисунок 1. Время роста слоя льда по методам информационно-вероятностного подхода Маринюка Б.Т. и Чуклина С.Г. для скребкового льдогенератора

Ввиду того, что решение с помощью нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности Фурье не учитывает динамику среды, процесс

намораживания дополнительно смоделирован методом энталпийной пористости, который применяется для моделирования теплофизических свойств шугообразного льда. При совместном решении в программном комплексе ANSYS Fluent выбрана однофазная модель для динамики потока и модель энталпийной пористости для кристаллизации.

Основные уравнения, описывающие динамику однофазного ламинарного потока представлены выражениями (3) - (5).

Уравнение неразрывности:

$$\nabla \cdot (\rho_l \vec{v}) = 0 \quad (3)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\nabla \cdot (\rho_l \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_l \nabla \vec{v}) + \rho_l g \quad (4)$$

Уравнение энергии:

$$\nabla \cdot (\rho_l \vec{v} H) = \nabla \cdot (\lambda_l \Delta T), \quad (5)$$

где ρ_l – плотность жидкости, кг/м³; \vec{v} – вектор скорости, м/с; μ_l – вязкость жидкости, Па·с; λ_l – теплопроводность жидкости, Вт/(м·К).

Согласно методу энталпийной пористости энталпия вещества вычисляется как сумма энталпии соответствующей температуры h и скрытой теплоты ΔH :

$$H = h + \Delta H, \quad (6)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT, \quad (7)$$

где h_{ref} – базовая энталпия, Дж/кг; T_{ref} – базовая температура, К; C_p – теплоемкость вещества при постоянном давлении Дж/(кг·К).

Жидкая фракция β может быть определена как (8) – (10):

$$\beta = 0 \text{ при } T < T_{solidus}, \quad (8)$$

$$\beta = 1 \text{ при } T > T_{liquidus}, \quad (9)$$

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \text{ при } T_{solidus} < T < T_{liquidus} \quad (10)$$

Уравнение энергии для случая плавления/кристаллизации имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S, \quad (11)$$

где H – энталпия жидкости, Дж/кг; ρ – плотность жидкости кг/м³; \vec{v} – скорость жидкости, м/с; S – характеристика источника, Дж/К.

Результаты численного моделирования процесса намораживания методом энталпийной пористости показывают, что доля жидкости выше в сравнении с результатами моделирования по информационно-вероятностному подходу. Расхождение результатов составило от 6 до 22 % в зависимости от времени намораживания.

Анализ результатов численных экспериментов в программном комплексе ANSYS Fluent позволил сделать следующие выводы: течение в моделируемом генераторе ламинарное; переохлаждается только пограничный слой, в котором

начинается кристаллизация; более теплые слои жидкости, не контактирующие с теплообменной поверхностью, являются ограничителями для роста слоя льда. Визуализация процесса кристаллизации в ANSYS Fluent демонстрирует необходимость регулирования воздействия магнитного поля, что было реализовано при проектировании лабораторного образца генератора шугообразного льда. При этом расхождение результатов расчета для неподвижной среды и среды с расходом 0,11 и 0,15 кг/с отличаются не более чем на 2,5 %, что свидетельствует о том, что совместное решение плохо учитывает динамику среды. Необходима валидация расчетов экспериментом для выбора наиболее подходящего метода расчета кристаллизации.

В третьей главе изложены цели и задачи экспериментального исследования лабораторного генератора шугообразного льда. Для достижения этих целей разработан экспериментальный стенд, гидравлическая схема которого представлена на Рисунке 2. Лабораторный генератор представляет собой теплообменник на Рисунке 3.

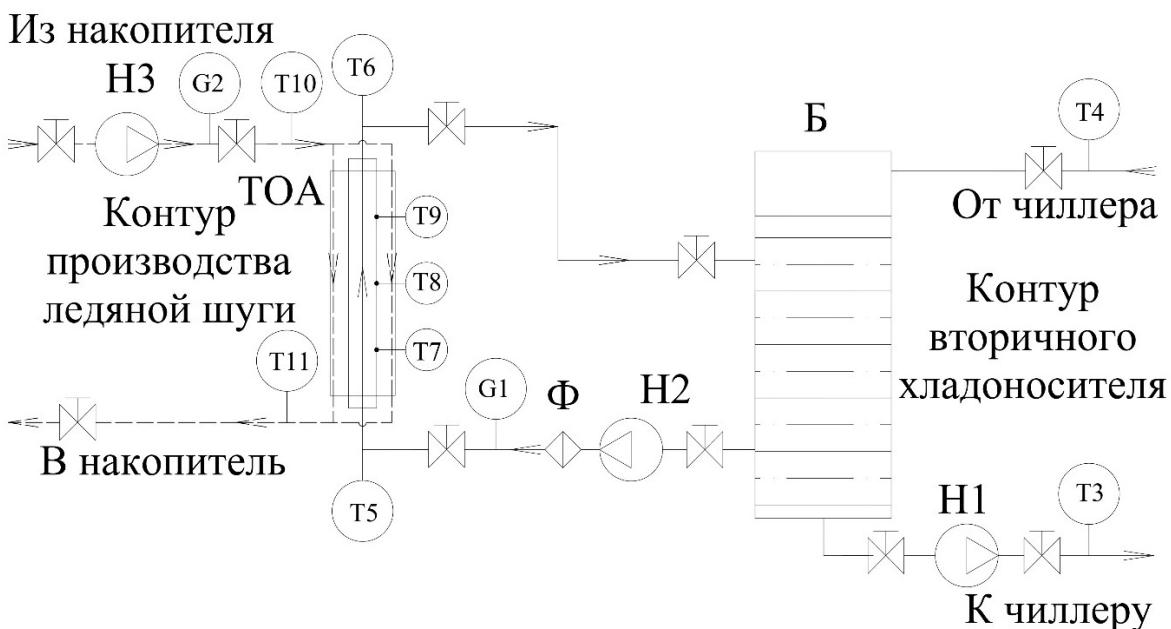


Рисунок 2. Гидравлическая схема экспериментального стенда. Б – бак-накопитель, Н1 – насос контура вторичного хладоносителя к чиллеру, Н2 – насос байпасной линии контура вторичного хладоносителя, Ф – фильтр, ТОА – экспериментальный участок лабораторного генератора ШЛ, Н3 – насос контура производства ледяной шуги, Т3, Т4 – датчики температуры, Т5, Т6, Т7, Т8, Т9, Т10, Т11 – термометры сопротивления Pt100 класс А, G1, G2-расходомеры. Штриховая линия – контур производства шугообразного льда. Сплошная линия – контур вторичного хладоносителя.

Проведены серии экспериментов на водных растворах пропиленгликоля с концентрацией 5, 10 и 20 % с индукционным нагревателем мощностью 270 Вт.

Производительность генератора оценивалась по материально-энергетическому балансу экспериментального участка (10):

$$Q_{XH} + Q_{I_{H\delta}} = Q_{P-pa} + Q_{Kp}, \quad (10)$$

где Q_{XH} – теплота, отводимая хладоносителем, Вт; $Q_{I_{H\delta}}$ – теплота, от нагрева теплообменной стенки под воздействием индукции, Вт; Q_{P-pa} – теплота на охлаждение раствора для производства шугообразного льда, Вт; Q_{Kp} – теплота, поглощаемая при кристаллизации льда, Вт.

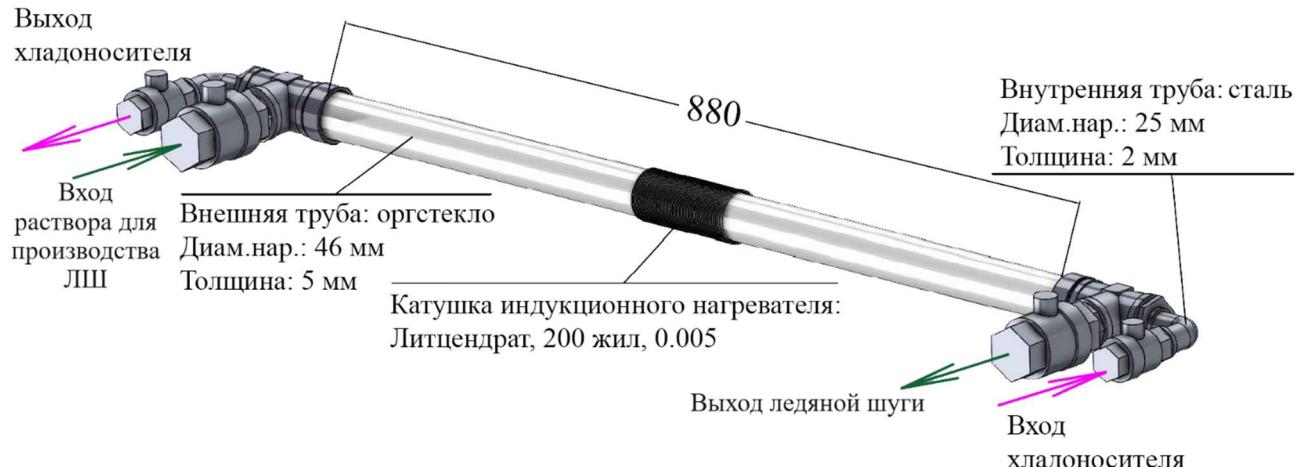


Рисунок 3. Экспериментальный участок лабораторного генератора шугообразного льда

На основе измерений входных и выходных температур потоков и их расходов рассчитан расход сгенерированного льда:

$$G_{Kp} = \frac{Q_{XH} - Q_{P-pa} + Q_{I_{H\delta}}}{\lambda}, \quad (11)$$

где G_{Kp} – расход льда, кг/с; λ – теплота кристаллизации воды, кДж/кг.

Погрешность расчета косвенного измерения составила $\pm 7,3\%$.

Получены данные о расходе льда для различных расходов раствора, а, следовательно, и скоростей потока, вдоль теплообменной поверхности генератора на разных режимах работы. Режим работы представляет собой этап «Намораживание» (Рисунок 4, этап А-Б): временной отрезок после начала процесса кристаллизации жидкости на поверхности до формирования устойчивого ледяного слоя на поверхности. И следующий за ним этап «Оттаивание» (Рисунок 4, этап В-Г): воздействие индуктора на теплообменную поверхность до визуального наблюдения очищенной от ледяного слоя поверхности в течение некоторого времени.

Графическая зависимость расхода льда от времени намораживания, представленная на Рисунке 5, а также от времени оттаивания позволяют сделать выводы:

1. номинальная производительность достигнута в диапазоне расходов от 9,16 л/мин до 11,45 л/мин, и составила в пересчете на суточную производительность льда 0,4 т/сутки;

2. длительность режима «намораживание» должна лежать в интервале от 25 ± 2 до 45 ± 2 секунд для достижения максимальной производительности;

3. длительность режима «оттаивание» не должна превышать 35 ± 2 секунд для достижения максимальной производительности;

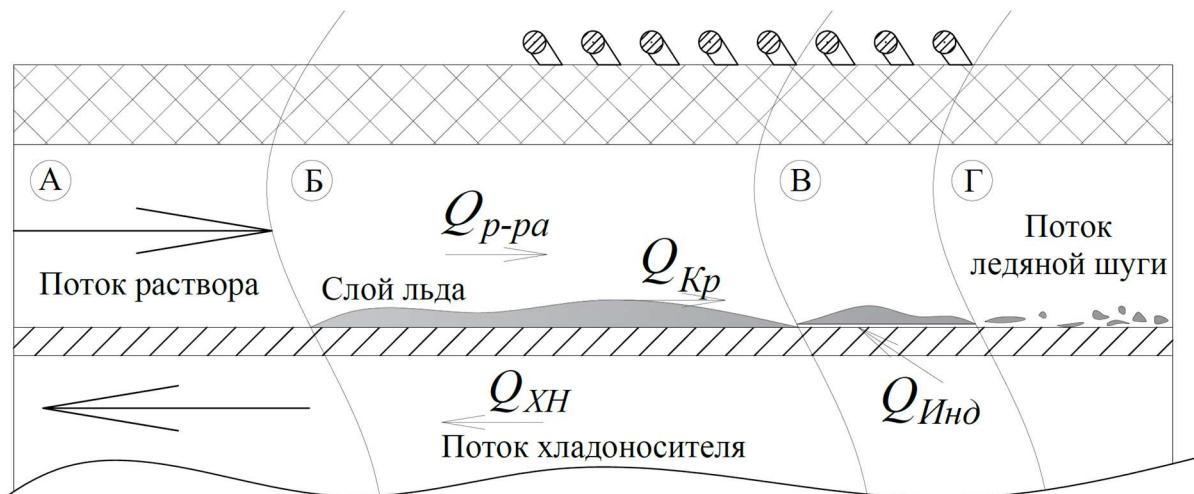


Рисунок 4. Схема работы экспериментального участка генератора шугообразного льда: А – охлаждение; Б – кристаллизация; В – воздействие индуктора на теплообменную поверхность; Г – отделение льда

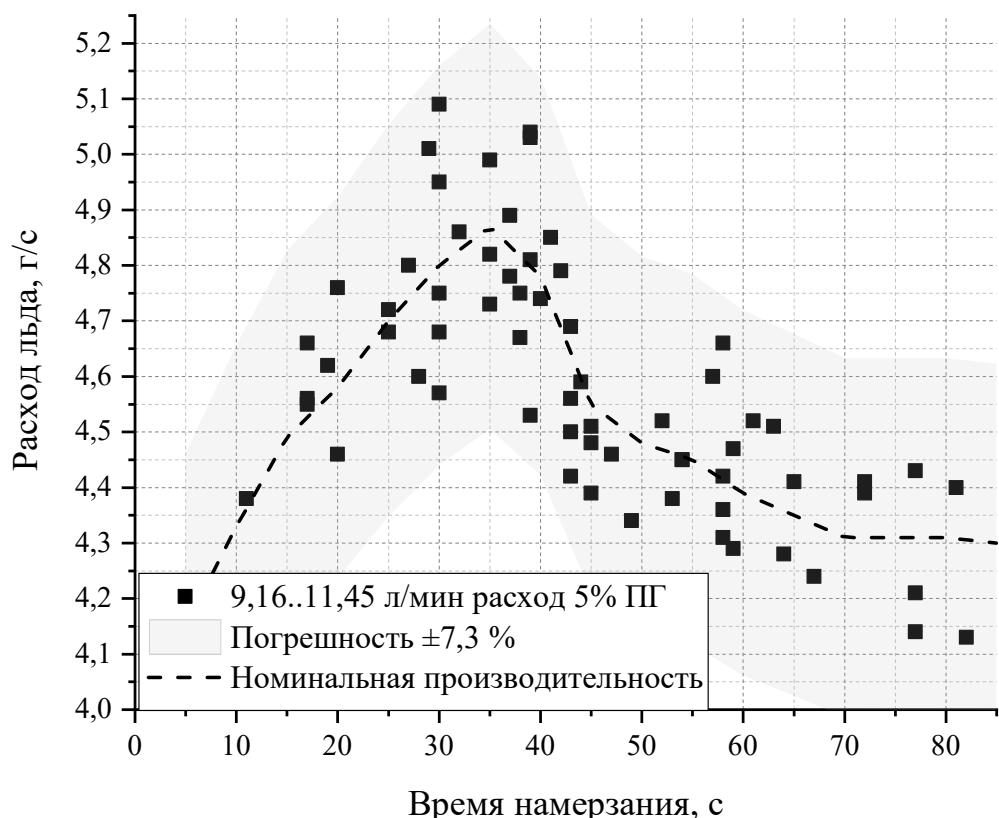


Рисунок 5. Зависимость расхода льда от времени намерзания льда для исследованных расходов 5-ти % раствора пропиленгликоля

Кристаллообразование в единицу времени с единицы поверхности ТОА в зависимости от расхода раствора представлено на Рисунке 6 и характеризует интенсивность процесса. С ростом скорости потока теплообмен интенсифицируется, поэтому переохлаждение способствует активной

кристаллизации. В результате визуального наблюдения процесса в потоке с расходом выше 12,1 л/мин кристаллы не удерживались на поверхности и уносились потоком. В процессе теплообмена среднее значение коэффициента теплопередачи через стенку экспериментального ТОА составило 600 Вт/К·м².

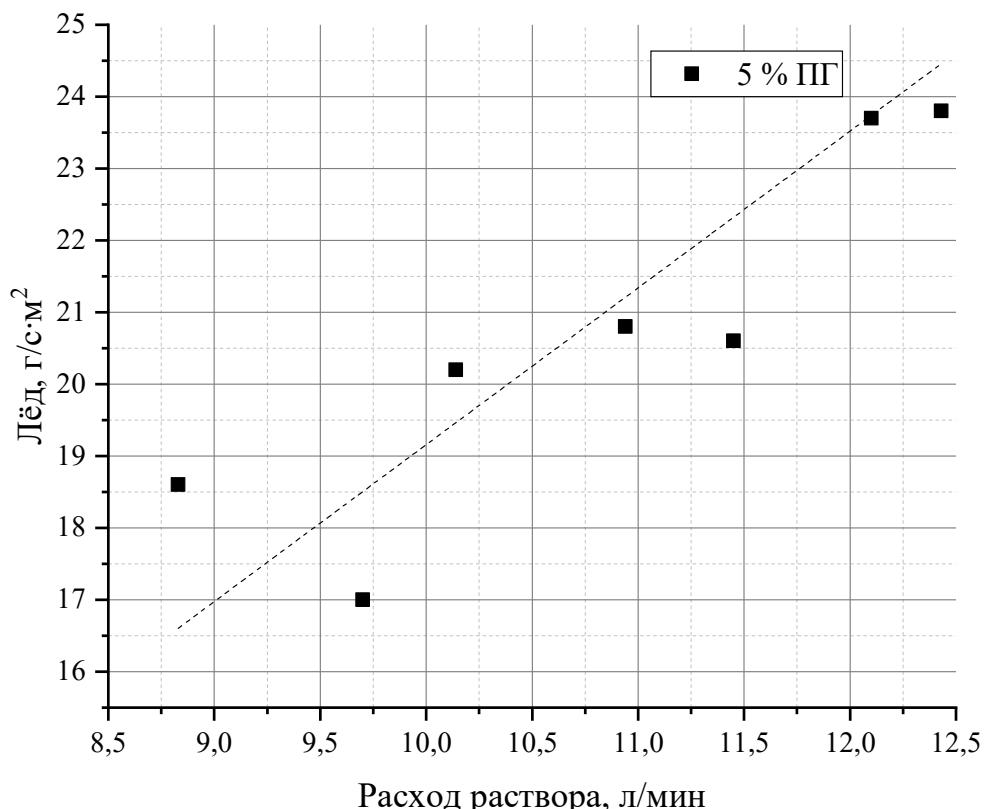


Рисунок 6. Интенсивность кристаллизации на поверхности в зависимости от расхода раствора для 5% раствора пропиленгликоля

Проведено сравнение экспериментального образца со скребковыми генераторами. В части разницы температур между охлаждающей средой и температурой кристаллизации раствора достигнуто снижение в среднем на 5,2 °С. Это является потенциальным выигрышем относительно скребковых генераторов в части энергопотребления компрессора для охлаждения вторичного хладоносителя. Удельные затраты энергии для лабораторного генератора составляют 0,33 кВт·ч/кг льда. Суммарное энергопотребление экспериментального стенда с генератором, приведенное к производительности аналога (чиллер, насосы, индуктор, 5 параллельно установленных генераторов шугообразного льда) составило 8,58 кВт·ч и на 8% экономичнее аналогичного скребкового генератора с производительностью 2 т/сутки.

В эксперименте получены агломерации частиц льда размерами до 0,6 мм (Рисунок 7). Наблюдается преобладание кристаллов игольчатой формы. Таким образом, с помощью генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением можно получить ледяную шугу аналогичного качества по сравнению со скребковыми генераторами, но при этом затратить меньше электроэнергии в том числе за счет повышения температуры кипения хладагента холодильной машины при охлаждении раствора для производства льда.

Результаты эксперимента сопоставлены с данными, полученными с использованием математических моделей (Рисунок 8). Результаты применения нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности Фурье ближе к результатам эксперимента, чем решение по методу энталпийной пористости.

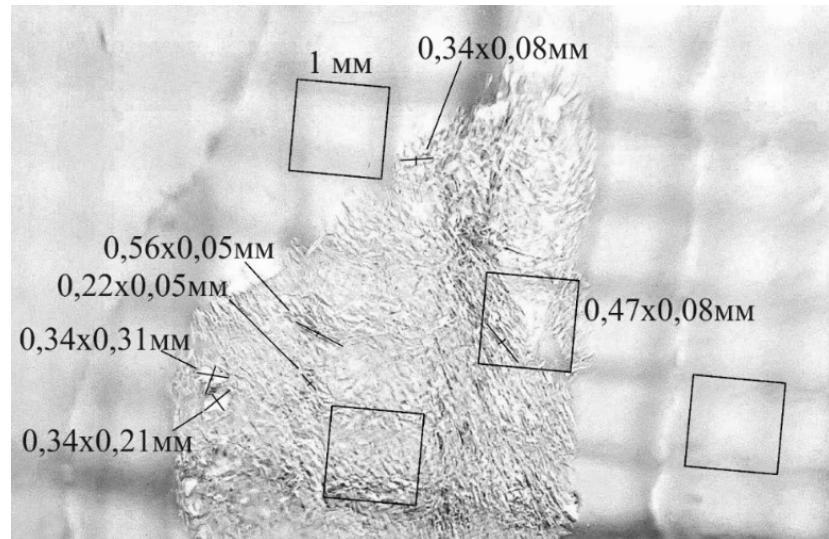


Рисунок 7. Фото агломерации льда с размерами кристаллов

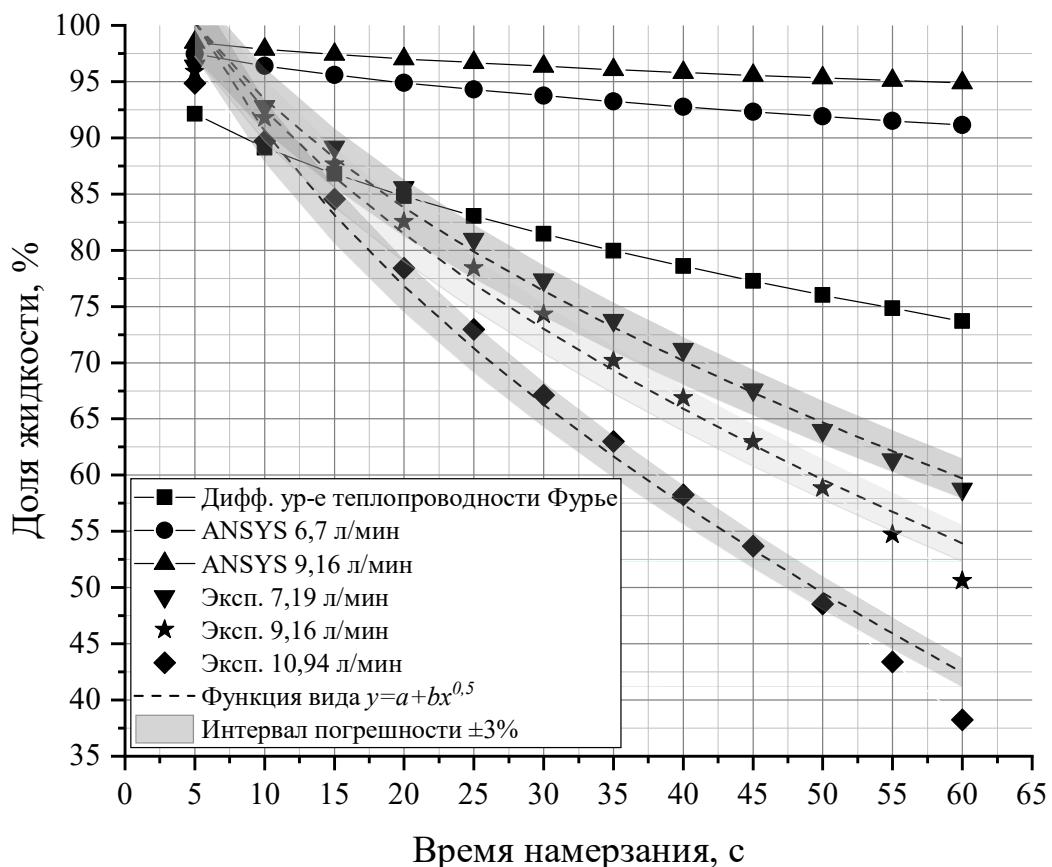


Рисунок 8. Экспериментальные данные, результаты применения математических моделей и расчет с помощью поправочных коэффициентов

Расхождение на интервале максимальной производительности (от 25 до 45 секунд) составляет до 10 % для расхода раствора 7,19 л/мин, до 18 % для расхода раствора 9,16 л/мин, до 30 % для расхода раствора 10,94 л/мин. Расхождение результатов увеличивается как с ростом времени намерзания,

так и с ростом расхода раствора. В эксперименте получено больше льда, чем ожидалось по результатам расчета с использованием математических моделей. Это объясняется тем, что на ледообразование значительно влияют 2 фактора: температура стенки и скорость потока.

Решение дифференциального уравнения моделирует процесс равномерной кристаллизации на поверхности, тогда как в эксперименте лед начинал образовываться на холодном конце ТОА и распространялся как по длине участка, так и увеличивался по толщине. По визуальным наблюдениям в эксперименте толщина льда была выше ожидаемой. Это связано с возможным перемешиванием слоев раствора из-за закрепленных на теплообменной поверхности датчиков температуры, а также из-за наличия на холодном конце слоя льда, который не попадал в зону воздействия индуктора и являлся активным источником кристаллообразования.

Все результаты могут в общем виде быть описаны функцией вида:

$$y = a + b \cdot x^{0.5} \quad (12)$$

Полученные результаты дают основание ввести поправочные коэффициенты a и b для расчета доли жидкости в объеме межтрубного пространства генератора в зависимости от времени, которые можно заложить в выведенное уравнение расчета доли жидкости (13) и уточнить предлагаемую методику расчета:

$$D_{жидк} = \frac{V_{жидк} \cdot 100}{V_{Mtp}}, \quad (13)$$

где $V_{жидк}$ – объем жидкости после намерзания льда, м^3 ; V_{Mtp} – объем межтрубного пространства генератора, м^3 .

Вычисляя объем с учетом толщины слоя льда по уравнению (2), получим степенную зависимость от времени. Введены 3 пары коэффициентов для расчета кристаллизации с учетом расхода раствора от 0,00 до 11,50 л/мин. Они представлены в таблице 1.

Таблица 1.
Поправочные коэффициенты

Наим-е	$G, \text{ л/мин}$	a_1	b_1	Функция
П1	0 – 8,17	1,18	2,52	$y = 1,18a - 2,52b \cdot x^{0.5}$
П2	8,17 – 10,05	1,20	2,87	$y = 1,20a - 2,87b \cdot x^{0.5}$
П3	10,05 – 11,50	1,25	3,60	$y = 1,25a - 3,60b \cdot x^{0.5}$

В четвертой главе апробирована разработанная методика расчета, поставлены ограничения её применимости. Проведен расчет генераторов шугообразного льда различных размеров, но одинаковой с экспериментальным образцом площадью поверхности по уточненной методике расчета с поправочными коэффициентами. Показано, что введенные коэффициенты актуальны только для генераторов ледяной шуги с межтрубным расстоянием 10 мм. Влияющим фактором на увеличение толщины слоя льда является

снижение температуры стенки. При одинаковом температурном режиме ожидается одна и та же толщина льда на теплообменной поверхности независимо от диаметра трубы. С учетом слоистого течения и переохлаждения только пограничного слоя жидкости увеличение межтрубного расстояния более 10 мм не представляется целесообразным.

При применении методики для расчета генератора шугообразного льда с $d_{внутр} = 70$ мм, $l_{mp} = 394$ мм изменение доли жидкости было близко к экспериментальным данным, однако, ожидаемый расход льда несмотря на режим максимальной производительности в диапазоне от 25 ± 2 до 45 ± 2 секунд оказался ниже.

На основе проведенной работы даны 10 рекомендаций для расчета и проектирования генераторов шугообразного льда, представлен пример внедрения генератора в корпус парокомпрессионного чиллера.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан способ производства шугообразного льда в генераторе с индукционным льдоудалением и его конструкция. Производство льда осуществляется в теплообменном аппарате типа «труба в трубе» с периодическим намораживанием и оттаиванием водного льда в постоянном потоке жидкости.

2. Разработана методика расчета генератора шугообразного льда на основе информационно-вероятностного подхода Маринюка Б.Т. с решением нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности Фурье с поправочными коэффициентами для учета расхода жидкости вдоль теплообменной стенки для определения производительности генератора по льду.

3. Создан лабораторный образец генератора шугообразного льда и экспериментальный стенд на основе парокомпрессионного чиллера с вторичным хладоносителем ХНТ-40. Стенд оснащен измерительным оборудованием температуры потоков и теплообменной поверхности, расходов рабочих сред.

4. Поставлен эксперимент на водных растворах пропиленгликоля с концентрациями 5 %, 10 % и 20 %. Что соответствует температурам кристаллизации минус $0,5^{\circ}\text{C}$, минус $3,0^{\circ}\text{C}$ и минус $6,0^{\circ}\text{C}$. Проведен эксперимент, результатами которого с погрешностью $\pm 7,3\%$ является номинальная производительность 400 кг/сут при генерации льда из раствора пропиленгликоля в концентрации 5 % в диапазоне расходов раствора от 9,16 л/мин до 11,45 л/мин. Рекомендован режим «намораживание» длительностью до 45 ± 2 секунд, режим «оттаивание» длительностью до 35 ± 2 секунд для достижения максимальной производительности.

5. При валидации модели результатами эксперимента определено расхождение результатов до 30 %. К уравнению расчета доли жидкости через толщину ледяного слоя введены 3 пары поправочных коэффициентов для учета движения среды в диапазонах от 0 до 8,17 л/мин, от 8,17 до 10,05 л/мин, от 10,05 до 11,5 л/мин для генераторов с межтрубным расстоянием 10 мм.

Применение поправочных коэффициентов показало сходимость результатов численного и физического эксперимента до 3 %.

6. В результате апробации методики расчета установлено, что поправочные коэффициенты применимы только для частного случая генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением с межтрубным расстоянием 10 мм.

7. Даны практические рекомендации по выбору размеров генератора шугообразного льда, выбору температуры охлаждаемой стенки, соотношению расходов хладоносителя и раствора, увеличению производительности генераторов такого типа.

8. В эксперименте разность температур кристаллизации и охлаждающей среды составила 11,8 °С, что на 5,2 °С ниже по сравнению со скребковыми генераторами при получаемых аналогичных размерах кристаллов льда. Это повышает на 8% энергетическую эффективность генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением по сравнению со скребковым генератором. Удельные затраты энергии для лабораторного генератора составляют 0,33 кВт·ч/кг льда. Для системы кондиционирования воздуха холодопроизводительностью 100 кВт, ежегодная экономия электроэнергии на холодильную машину в режиме аккумуляции холода в течение 8 часов, может достигать 14367 кВт·ч по сравнению с ПКХМ и 11739 кВт·ч по сравнению с аналогичной системой на скребковых генераторах льда. Что составляет экономию до 9 % по сравнению с ПКХМ и до 8 % относительно системы аккумуляции холода со скребковым генератором.

9. Отличие генератора шугообразного льда с индукционным льдоудалением от скребковых и вакуумных генераторов льда заключается также в том, что у него отсутствуют движущиеся части, что классифицирует его не как машину, а как аппарат.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Egorova A. I., Kolesnikov A. S., Krotov A. S. Air Conditioning System with Integrated Cold Storage for Domestic Use // PCM2021 13th IIR Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning Conference, PCM2021 – Proceedings. 2021. №2024. Р.1-7. (0,44 п.л./0,2 п.л.).

2. Применение встроенных аккумуляторов холода для повышения эффективности парокомпрессионных холодильных машин / А. И. Егорова [и др.] // «Химическое и нефтегазовое машиностроение». 2020. №6. С.21-25. (0,31 п.л./0,1 п.л.).

3. Исследование режимов работы генератора бинарного льда с применением индукционного нагрева / А. И Егорова [и др.] // «Химическое и нефтегазовое машиностроение». 2023. №8. С.24-28. (0,31 п.л./0,25 п.л.).

4. Программа расчета производительности генератора бинарного льда с индукционным нагревом (межтрубный зазор 10 мм): Государственная регистрация программы для ЭВМ № RU 2024616122 / А. И. Егорова; заявл. № 2024614247 от 04.03.2024; опубл. 18.03.2024. Бюлл. №3.