

На правах рукописи

Королев Игорь Антонович

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАМЕРНОГО ВОЗДУХОХЛАДИТЕЛЯ
С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ИНЕЯ
НА ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ АППАРАТА**

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 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет», кафедра «Техника низких температур им. П.Л. Капицы»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Маринюк Борис Тимофеевич

кандидат технических наук, доцент Белуков Сергей Владимирович

Официальные оппоненты:

Горбачев Станислав Прокофьевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Центра использования газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Феськов Олег Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Инженерия процессов, аппаратов, холодильной техники и технологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет пищевых производств»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Защита состоится «__» __ 20__ г. в __:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу 105005, г. Москва, Лефортовский вал, д. 1, корпус «Энергомашиностроение», 3 этаж, Конференц-зал кафедры Э-4.

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

Автореферат размещен на сайте Министерства образования и науки Российской Федерации _____ 2020 г.

Автореферат диссертации разослан _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.141.16

О.В. Белова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В условиях нарастания экологических проблем энергосбережение и повышение эффективности промышленного оборудования определены одним из приоритетных направлений инновационного развития экономики страны в рамках государственной программы «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года». Доля потребления электроэнергии, приходящейся на холодильную, криогенную технику и кондиционирование воздуха, достигает 17 % в общемировом балансе энергопотребления. При этом холодильная обработка является одним из основных способов консервирования пищевой продукции, а доля электроэнергии, затрачиваемой на выработку холода, в ряде отраслей пищевой промышленности превышает 50%.

Полная реализация потенциала энергосбережения и обеспечение установленных технологиями и стандартами температурно-влажностных режимов холодильной обработки и хранения пищевых продуктов во многом зависит от правильного подбора и эксплуатации воздухоохладителей, работающих в условиях образования инея на теплообменных поверхностях. Рост слоя инея оказывает негативное влияние на процесс теплопередачи за счет создания им дополнительного аэродинамического и термического сопротивлений. Необходимость периодического оттаивания инея с поверхности аппаратов приводит к дополнительным затратам электроэнергии, достигающим 25% от потребляемой холодильными установками мощности.

Расчет технических характеристик воздухоохладителей в условиях инеообразования осложнен нестационарностью процесса теплопередачи, а также большим числом факторов, определяющих теплофизические свойства инея, – плотность слоя $\rho_{ин}$ может варьироваться в диапазоне от 30 до 450 кг/м³, а теплопроводность $\lambda_{ин}$ от 0,04 до 0,55 Вт/(м·К).

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в изучение процесса роста инея на теплообменных поверхностях и совершенствование конструкций аппаратов внесли: Маринюк Б.Т., Явнель Б.К., Напалков Г.Л., Дитенбергер М.А., Ирагорри Ж. , Сандерс С.Т. и целый ряд других ученых. Используемые в существующих методиках расчета воздухоохладителей эмпирические зависимости теплофизических свойств инея значительно ограничивают допустимые температурные диапазоны их применения, а моделирование роста слоя инея в виде диффузионного процесса приводит к необоснованному увеличению продолжительности расчетов (от нескольких часов до нескольких дней), не гарантируя при этом повышения их точности. Кроме того, в настоящее время подбор камерных воздухоохладителей

осуществляется на основе их промышленных испытаний в «сухих» условиях. Указанные испытания не позволяют сопоставить эффективность работы аппаратов в условиях инеообразования (динамика снижения коэффициента теплопередачи, холодопроизводительности и объемного расхода воздуха) и определить требуемую периодичность оттаивания инея с их теплообменной поверхности.

В этой связи наибольший практический интерес представляет разработка методики расчета камерных воздухоохладителей, учитывающей особенности роста слоя инея на теплообменных поверхностях, обеспечивающей возможности анализа технических характеристик и подбора аппаратов под конкретные режимы работы холодильных камер производства и хранения пищевых продуктов с целью снижения капитальных и энергетических затрат.

Объект исследований: Камерные воздухоохладители.

Предмет исследований: Влияние динамики образования и распределения слоя инея по теплообменной поверхности аппарата на технические характеристики воздухоохладителей.

Цель работы: Разработка уточненной методики расчета камерных воздухоохладителей с учетом динамики образования инея на теплообменной поверхности аппарата при различных теплоподавленных условиях их работы.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель роста слоя инея на охлаждаемой поверхности, обобщающую экспериментальные данные независимых исследований при вынужденной конвекции влажного воздуха с оклонулевой и отрицательной температурой.

2. Создать экспериментальный стенд и экспериментально исследовать влияние образования инея на технические характеристики камерного воздухоохладителя при температурах воздуха от минус 6 до минус 20°C, относительной влажности воздуха от 40 до 100% и различных расходно-напорных характеристиках вентилятора.

3. Разработать математическую модель процесса охлаждения влажного воздуха в камерном воздухоохладителе трубчатого типа с пластинчатым оребрением и компьютерную программу расчета его технических характеристик, учитывающие температурно-влажностные условия работы аппарата, неравномерный характер роста толщины слоя инея по глубине теплообменного ядра, а также расходно-напорные характеристики вентиляторов и зону перегрева холодильного агента (создание уточненной методики расчета воздухоохладителей).

4. Верифицировать математическую модель процесса охлаждения влажного воздуха и программу расчета технических характеристик воздухоохладителей сравнением с эмпирическими данными, полученными на разработанном экспериментальном стенде.

Научная новизна:

Разработана математическая модель роста слоя инея на охлаждаемых поверхностях, учитывающая влияние температуры слоя инея на его теплопроводность и верифицированная на экспериментальных данных независимых исследователей при температурах воздуха от плюс 10 до минус 20°C.

Получено новое эмпирическое соотношение для расчета теплопроводности инея с учетом значений локальной температуры слоя.

Получены новые экспериментальные данные по влиянию температуры и относительной влажности воздуха на динамику снижения эффективности теплообмена (коэффициент теплопередачи, температурный напор, объемный расход воздуха) в двухконтурном воздухоохладителе для морозильных камер.

Впервые разработана математическая модель процесса охлаждения влажного воздуха в камерном воздухоохладителе с непосредственным кипением холодильного агента (для наиболее распространенных рабочих веществ – R134a, R404a, R507, R717), обеспечивающая возможность прогнозирования технических характеристик аппарата в условиях инеевобразования при различных температурно-влажностных условиях по заданным значениям температурного напора или объемной производительности холодильного компрессора.

Практическая значимость:

1. Разработана компьютерная программа для расчета технических характеристик воздухоохладителей, работающих в условиях инеевыпадения, а также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617452.

2. Разработанная методика расчета воздухоохладителей внедрена на производственном предприятии ООО «Терма» г. Фрязино и используется при выполнении конструкторских и поверочных расчетов теплообменников.

3. Предложена усовершенствованная конструкция воздухоохладителя, обеспечивающая снижение интенсивности образования инея. Патент на изобретение РФ № 2691895.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель роста слоя инея на охлаждаемых поверхностях, обращенных в среду влажного воздуха.

2. Математическая модель процесса охлаждения влажного воздуха в низкотемпературном воздухоохладителе трубчатого типа с пластинчатым оребрением с учетом неравномерного образования инея на теплопередающих поверхностях, а также напорно-расходных характеристик вентиляторов и зоны перегрева холодильного агента.

3. Результаты экспериментальных исследований технических характеристик воздухоохладителя в условиях образования инея.

4. Верифицированная на основе проведенных экспериментов методика расчета камерных воздухоохладителей трубчатого типа с пластинчатым оребрением в широком диапазоне температурно-влажностных условий, учитывающая неравномерный характер распределения инея по теплообменной поверхности аппарата и напорно-расходные характеристики вентиляторов.

Методы исследований. При решении поставленных в работе задач использовались общепринятые методы: разработки математических моделей и численного моделирования, проведения натурного эксперимента и обработки экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя: Разработка и совершенствование математических моделей роста слоя инея и процесса охлаждения влажного воздуха в камерных воздухоохладителях, а также методики расчета технических характеристик воздухоохладителей, работающих в условиях инеообразования. Создание экспериментального стенда для испытаний промышленного низкотемпературного воздухоохладителя в широком диапазоне температурно-влажностных условий, проведение опытов и обработка экспериментальных данных. Сопоставление результатов расчетов по разработанным моделям с экспериментальными данными.

Достоверность полученных автором результатов основывается на: использовании сертифицированных средств измерений, воспроизводимости полученных экспериментальных данных в пределах рассчитанной погрешности измерений, физической обоснованности разработанных автором математических моделей и тщательном тестировании численных алгоритмов, а также подтверждается хорошей согласованностью результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными соискателем и независимыми исследователями.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были представлены на 10 конференциях: Научно-практическая конференция, посвященная столетию со дня рождения Л.А. Костандова (г. Москва, 2015 г.); Научно-практическая конференция «Школа

молодых ученых имени профессора И.М. Калнина» («Мир Климат», Экспоцентр, г. Москва, 2016 г.; 2017 г.; 2018 г.; 2019 г.); XI международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов отделения сельскохозяйственных наук РАН «Пищевые системы: теория, методология, практика» (г. Москва, 2017 г.); Международная научно-практическая конференция молодых ученых и аспирантов «Научное обеспечение инновационных технологий производства и хранения сельскохозяйственной и пищевой продукции» (г. Краснодар, 2018 г.; 2019 г.); Научно-практическая конференция с международным участием «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» (г. Москва, 2018 г.; 2019 г.).

Структура и объем работы: Диссертационная работа включает в себя: введение, пять глав, выводы, список литературы и приложение на 50 листах. Объем работы составляет 180 страниц основного текста, 61 рисунок, 13 таблиц и список литературы из 178 наименования.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 7 научных работ общим объемом 1,15 печатных листа, из них 3 в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, тезисы 4 докладов в сборниках трудов научно-практических конференций, а также получены патент на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится обзор информации о физических особенностях процесса инеообразования; существующих зависимостях для расчета теплофизических свойств инея, его плотности, теплопроводности и толщины, внешних коэффициентов тепло- и массообмена; экспериментальных данных и математических моделях, описывающих рост инея и работу воздухоохладителей в условиях инеообразования. Показано, что многие из существующих исследований выполнены при положительных и околонулевых температурах воздуха, не характерных для холодильной техники. На основе проведенного анализа литературных источников проведена систематизация существующих экспериментальных исследований, выработаны цель и основные задачи представленного исследования.

Во второй главе представлена разработанная автором математическая модель роста слоя инея и выполнена ее верификация на основе экспериментальных данных независимых исследователей.

Задача расчета роста инея в первую очередь связана с определением толщины, удельной массы и температуры поверхности образующегося слоя инея, а также теплового потока через его

поверхность, для чего необходимо приблизенно решить нелинейное дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности Фурье:

$$Cp_{uh}(\rho_{uh}(\tau)) \cdot \rho_{uh}(\tau) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{uh}(T_{uh}, \rho_{uh}(\tau)) \frac{\partial T}{\partial x} \right]. \quad (1)$$

Краевые условия для стенки с известной температурой и тепломассообмена поверхности инея с влажным воздухом:

$$T(0, \tau) = T_{noe}, \quad (2)$$

$$\lambda_{uh}(T_{uh}^{noe}, \rho_{uh}) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta_{uh}} = \alpha_e \cdot (T_e - T_{uh}^{noe}) + L \cdot \frac{\partial m_{uh}}{\partial \tau}. \quad (3)$$

Применим к уравнению (1) подстановку Ламе-Клапейрона (4), и представим решение в виде степенного ряда Тейлора, описывающего распределение температур в слое инея:

$$T(x, \tau) = T(\nu); \quad \nu = x/\sqrt{\tau}; \quad \delta_{uh} = \beta \cdot \sqrt{\tau}, \quad (4)$$

$$T(\nu) = T(\beta) + \frac{T'(\beta)}{1!} \cdot (\nu - \beta) + \frac{T''(\beta)}{2!} \cdot (\nu - \beta)^2 + \dots + \frac{T^n(\beta)}{n!} \cdot (\nu - \beta)^n. \quad (5)$$

Для расчета локальной теплопроводности инея на основе анализа большого числа экспериментальных данных различных исследователей, полученных в условиях работы холодильного оборудования, автором разработана методом минимизации среднеквадратического отклонения эмпирическая зависимость следующего вида ($R^2=0,785$):

$$\lambda_{uh}(T_{uh}, \rho_{uh}(\tau)) = 0,00285 \cdot \exp(0,0196 \cdot T_{uh} - 2,41) \cdot [1 + 0,0134 \cdot \rho_{uh}(\tau)]. \quad (6)$$

После выполнения всех необходимых преобразований температура поверхности слоя инея может быть рассчитана как:

$$T_{uh}^{noe}(\tau) = T_{noe} + \left[\frac{\alpha_e \cdot (T_e - T_{uh}^{noe}(\tau)) \cdot \sqrt{\tau}}{\lambda_{uh}(T_{uh}^{noe}(\tau), \rho_{uh}(\tau))} \cdot \left(1 + \frac{L \cdot (d_e - d_{uh}^{noe}(\tau))}{Cp_e \cdot (T_e - T_{uh}^{noe}(\tau))} \right) \right] \cdot \beta \times \\ \times \left(1 + \frac{\beta}{2} \cdot \left(0,0196 \cdot \left[\frac{\alpha_e \cdot (T_e - T_{uh}^{noe}(\tau)) \cdot \sqrt{\tau}}{\lambda_{uh}(T_{uh}^{noe}(\tau), \rho_{uh}(\tau))} \cdot \left(1 + \frac{L \cdot (d_e - d_{uh}^{noe}(\tau))}{Cp_e \cdot (T_e - T_{uh}^{noe}(\tau))} \right) \right] + \frac{\beta \cdot Cp_{uh}(\rho_{uh}(\tau)) \cdot \rho_{uh}(\tau)}{2 \cdot \lambda_{uh}(T_{uh}^{noe}(\tau), \rho_{uh}(\tau))} \right) \right). \quad (7)$$

Плотность теплового потока через охлаждаемую поверхность:

$$q(\tau) = \lambda(T_{noe}, \rho_{uh}(\tau)) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} \approx \alpha_e \cdot (T_e - T_{uh}^{noe}(\tau)) + L \cdot \frac{\partial m_{uh}}{\partial \tau}. \quad (8)$$

Для расчета толщины слоя инея использовано предложенное проф. Маринюком Б.Т. полуэмпирическое соотношение:

$$\delta(\tau) = 3 \sqrt[3]{\frac{6,34 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha_e \cdot (d_e - d_{uh}^{noe}(\tau))^2 \cdot \tau^2 \cdot (T_{uh}^{noe}(\tau) - T_{noe})}{Cp_e \cdot [L \cdot (d_e - d_{uh}^{noe}(\tau)) + 2 \cdot Cp_e \cdot (T_e - T_{uh}^{noe}(\tau))]}}. \quad (9)$$

Расчеты удельной массы инея (на 1 м² площади поверхности) и плотности слоя выполнены на основе аналогии Льюиса:

$$\rho_{uh}(\tau) = \frac{m_{uh}(\tau)}{\delta_{uh}(\tau)} = \frac{1}{\delta_{uh}(\tau)} \cdot \int_0^{\tau} \frac{\alpha_e \cdot (d_e - d_{uh}^{nos}(\tau))}{Cp_e} \cdot d\tau. \quad (10)$$

С целью верификации математической модели роста слоя инея автором были отобраны эмпирические данные независимых исследователей (Явнель Б.К., 1969; Ямакава Н., 1972; Сандерс С.Т., 1974; Мао Ю., 1999; Ванг В., 2013), наиболее близко соответствующие по температурно-влажностным параметрам проведения опытов условиям, характерным для работы воздухоохладителей средне и низкотемпературных холодильных камер ($t_e =$ плюс 10 \div минус 20 $^{\circ}\text{C}$, $t_{nos} =$ минус 10 \div минус 24 $^{\circ}\text{C}$, $w_e = 1,5 \div 10 \text{ м/с}$). На Рисунке 1 представлено сравнение результатов расчетов толщины инея и теплового потока по разработанной автором модели с экспериментальными данными Явнеля Б.К, Мао Ю. и Сандерса С.Т.

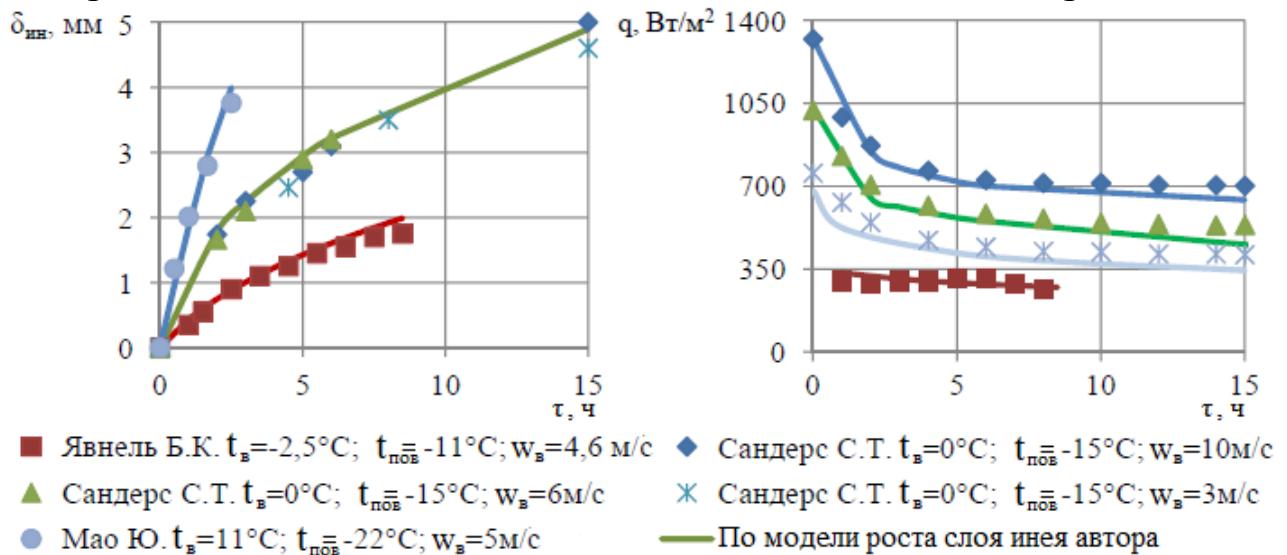


Рисунок 1. Зависимость толщины слоя инея δ_{uh} и плотности теплового потока q от продолжительности роста слоя τ : результаты расчетов по модели автора, опытные данные независимых исследователей

Расчетные данные по толщине слоя δ_{uh} и плотности теплового потока q по разработанной автором математической модели согласуются с экспериментальными данными с погрешностью, не превышающей 15%, что является достаточной для инженерных расчетов точностью. При этом, в отличие от эмпирических зависимостей для расчета толщины слоя инея других исследователей, представленная модель является универсальной и может использоваться в широком диапазоне температур и влажностей воздуха, характерных для холодильной техники.

На основе разработанной математической модели роста слоя инея проведен анализ влияния температуры, относительной влажности и коэффициента теплоотдачи воздуха на интенсивность роста толщины

слоя инея (фактор роста β) и интенсивность снижения удельного теплового потока (Ω). Показано, что в условиях, характерных для работы тепловых насосов и холодильной техники, с понижением температуры воздуха на 30°C интенсивность роста толщины слоя инея β снижается в 6 раз, а интенсивность снижения теплового потока Ω на 40%. При постоянной температуре воздуха его относительная влажность линейно пропорциональна интенсивности роста слоя инея и динамике снижения теплового потока. С увеличением коэффициента теплоотдачи воздуха α_a выше $45 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ его влияние на интенсивность роста толщины слоя инея многократно снижается.

В третьей главе приводятся описание разработанного автором экспериментального стенда для исследования технических характеристик воздухоохладителя, методики обработки экспериментальных данных и приборной погрешности эксперимента.

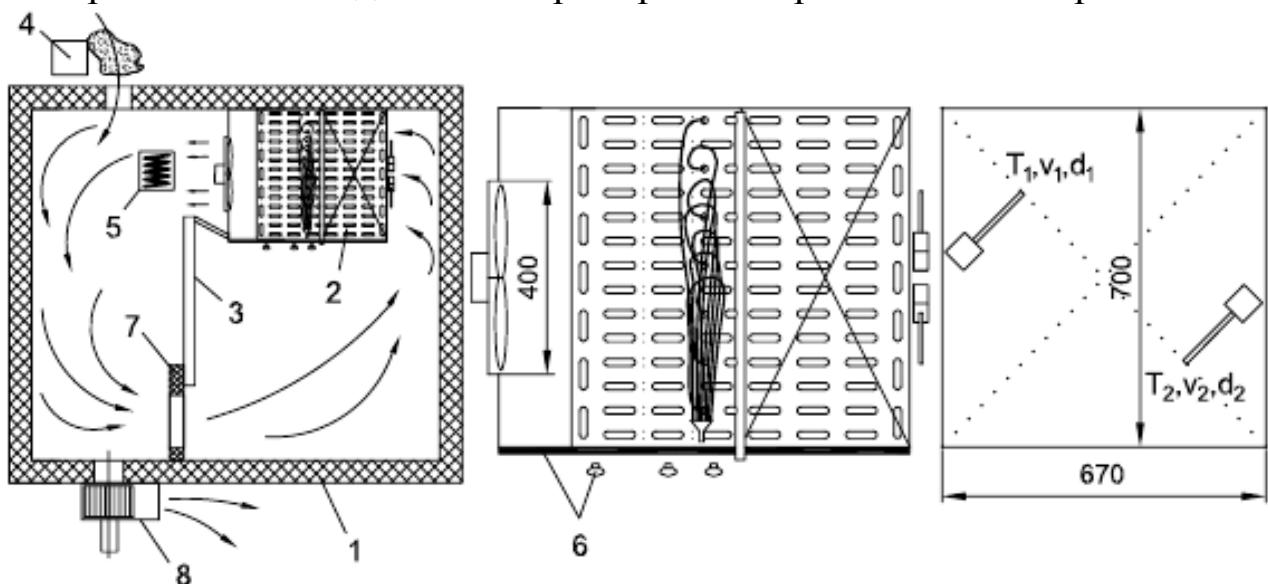


Рисунок 2. Принципиальная схема экспериментального стенда и геометрические характеристики исследуемого воздухоохладителя

Разработанный автором стенд (Рисунок 2) представляет собой холодильную камеру 1, оснащенную двухконтурным промышленным воздухоохладителем с непосредственным кипением 2 и аэродинамическими перегородками 3, обеспечивающими циркуляцию воздуха по замкнутому контуру. Процесс инеообразования происходил во втором контуре по ходу движения воздуха. Технические характеристики воздухоохладителя представлены в Таблице 1.

Увлажнение воздуха в камере осуществлялось подачей извне воздуха комнатной температуры при помощи воздуховодки 8, дополнительно увлажняемого ультразвуковым парогенератором 4. Поддержание заданной температуры воздуха выполнялось электронагревателем 5 и ПИД ШИМ регулятором температуры. В

результате их совместной работы температуру воздуха на входе в воздухоохладитель можно было поддерживать на постоянном уровне с погрешностью не более $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, а относительную влажность воздуха в диапазоне от 40 до 100 процентов с погрешностью до $\pm 5\%$.

Таблица 1.

Технические характеристики воздухоохладителя

Марка воздухоохладителя	GUNTNER S-GHN
Поверхность контура F^{BO} , м^2	33,9
Шаг оребрения S_p , мм	10
Толщина ребер δ_p , мм	0,5 (алюминий)
Шаг трубок по длине S_1 , мм, и высоте S_2 , мм	50
Толщина стенок δ_{mp} , мм и диаметр трубок d_{mp} , мм	15x0,5 (Медь)
Число рядов по высоте и глубине контура (аппарата)	14x7 (14x14)

Для сбора экспериментальных данных был использован измерительный комплекс (Рисунок 3) на базе двух модулей аналогового ввода «ОВЕН МВ110 - 8А», семи игольчатых термометров сопротивления «ЭЛЕМЕР ТС-1288», трех датчиков влажности «Rotronic HC2-IC102», двух термоанемометров «ЭКСИС ТТМ-2-04» и счетчика электроэнергии «Меркурий 231-АМ01». Аэродинамическое сопротивление аппарата измерялось микроманометром «МАШПРИБОР ММН 2400».



Рисунок 3. Общий вид системы сбора экспериментальных данных

Для наблюдения за ростом инея вместо поддона воздухоохладителя была установлена рама с двойным прозрачным стеклом, светодиодные лампы, обеспечивающие освещение во внутреннем объеме воздухоохладителя, и видеокамеры 6 для измерения толщины слоя инея. В серии опытов дополнительно устанавливалось калиброванное сужение 7, обеспечивающее иную расходно-напорную характеристику вентилятора (Таблица 2).

По результатам расчетов приборная погрешность измерений холодопроизводительности и коэффициента теплопередачи не превышала 12%, что является допустимым при проведении теплофизического эксперимента. В рамках настоящей работы автором выполнена серия опытов по исследованию работы воздухоохладителя как в сухих (температура точки росы воздуха ниже температуры кипения), так и в регулируемых температурно-влажностных условиях с образованием инея на поверхности аппарата (Таблица 2).

Перед началом проведения каждого из опытов осуществлялась просушка холодильной камеры и воздухоохладителя. После запуска холодильной установки осуществлялся ее вывод на заданный температурный режим (поддержание постоянной температуры и влажности воздуха на входе в воздухоохладитель) при безостановочной работе холодильного компрессора на всем протяжении опыта.

Таблица 2.

Температурно-влажностные условия проведения экспериментов по работе воздухоохладителя

#	Температура воздуха на входе t_{B1} , °C	Влажность воздуха на входе ϕ_{B1} , %	Характеристика вентилятора
Эксп. 1	-6,4 ÷ -24,7	20 ÷ 65	Без сужения
Эксп. 2	-10,8	93,0	Без сужения
Эксп. 3	-12,6	86,0	Без сужения
Эксп. 4	-18	99,7	Без сужения
Эксп. 5	-5,3 ÷ -23,4	20 ÷ 65	С сужением
Эксп. 6	-13,3	87	С сужением
Эксп. 7	-6,8	92,5	С сужением
Эксп. 8	-6,5	87,2	С сужением
Эксп. 9	-19,1	87,1	С сужением

В случае проведения испытаний аппарата в «сухих» условиях после запуска холодильной установки осуществлялась ее выдержка в каждом из температурных режимов в течение не менее 1,5 часов. Критерием окончания опытов, проводимых во «влажных» условиях, выступал эффект «помпажа», связанный с ростом аэродинамического сопротивления воздухоохладителя из-за уменьшения инем проходного сечения аппарата. В дальнейшем осуществлялось оттаивание инея с поверхности воздухоохладителя, сбор и измерение массы влаги.

Начальные значения скорости воздуха на входе в воздухоохладитель (с установленным калиброванным сужением и без него) составляли $w_B = 1,60$ м/с и $w_B = 2,35$ м/с при соответствующих числах Рейнольдса $Re_B = 2250$ и $Re_B = 3300$.

В четвертой главе приводится описание разработанной автором математической модели процесса охлаждения влажного воздуха в низкотемпературном воздухоохладителе. Расчеты аппарата могут выполняться как для заданного температурного напора, так и по величине объемной производительности холодильного компрессора.

В проведенных соискателем экспериментальных исследованиях распределение инея носило равномерный характер по ширине воздухоохладителя, а в качестве расчетного элемента аппарата принята отдельная оребренная трубка, длина которой равна ширине аппарата. Схема разбиения секции воздухоохладителя на расчетные элементы представлена на Рисунке 4.

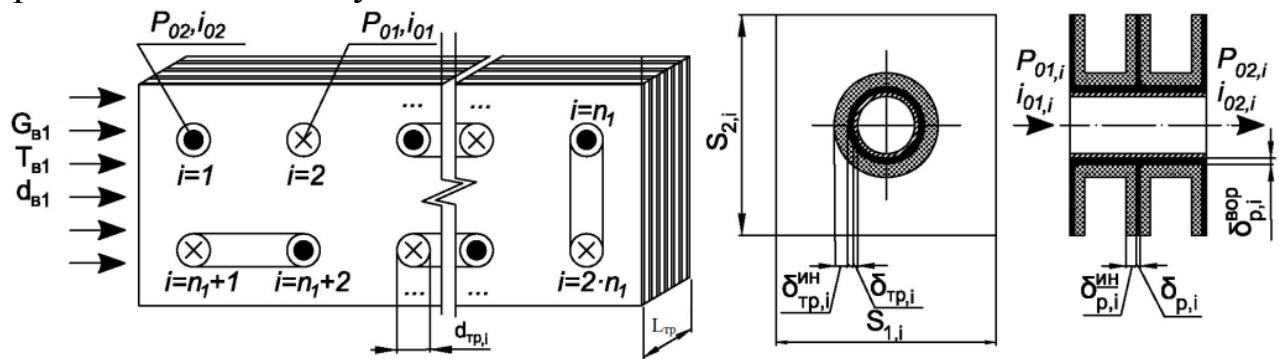


Рисунок 4. Схема разбиения секции воздухоохладителя на расчетные элементы и принцип их нумерации

На вход аппарата с числом рядов трубок по глубине n_1 и числом секций $n_{\text{секц}}$ поступает воздух с заданными температурно-влажностными параметрами. В качестве исходных данных для каждого расчетного элемента задаются: шаг ребер на отдельной трубке и их толщина: $S_{p,i}$, м, $\delta_{p,i}$, м; продольная и поперечная длина ребер: $S_{1,i}$, м; $S_{2,i}$, м; внешний диаметр и толщина стенки трубок: $d_{mp,i}$, м, $\delta_{mp,i}$, м.

При математическом моделировании процесса охлаждения влажного воздуха в воздухоохладителе автором приняты следующие допущения:

- температура $T_{\text{в1}}^{\text{BO}}$, К, и абсолютное влагосодержание воздуха $d_{\text{в1}}^{\text{BO}}$, кг/кг, на входе в воздухоохладитель остаются постоянными;
- для каждого расчетного элемента толщины слоя инея на ребре $\delta_{p,i}^{\text{ин}}$, м, и воротнике ребра (трубке) $\delta_{mp,i}^{\text{ин}}$ принимаются распределенными равномерно по всей поверхности расчетного элемента и вычисляются на основе локальных значений температур и влажности по зависимости (9);
- модель не учитывает тепловую инерцию воздухоохладителя;
- для каждого расчетного элемента вычисляются значения локальных усредненных коэффициентов теплоотдачи воздуха $\alpha_{\text{в},i}$, Вт/(м²·К), и холодильного агента $\alpha_{0,i}$, Вт/(м²·К), в соответствии с положением

элемента, сужением растущим слоем инея проходного сечения воздушного канала, давлением кипения $P_{0,i}^{cp}$, Па, качеством пара хладагента $\chi_{0,i}$ и величиной удельного теплового потока $q_{tr,i}$, Вт/м²;

- контактное термическое сопротивление «воротник ребра – трубка» принимается постоянной величиной $R_{конт}$, (м²·К)/Вт;

- рост толщины слоя инея приводит к увеличению площади теплопередающей поверхности и уменьшению проходного сечения теплообменного ядра со стороны воздуха, росту аэродинамического сопротивления аппарата ΔP_e^{BO} и снижению объемного расхода воздуха V_e ;

- гидравлическое сопротивление канала $\Delta P_{гидр,i}$, приводит к соответствующей депрессии температуры кипения хладагента $T_{депр,0}$, К;

Удельный тепловой поток через наружную несущую поверхность расчетного элемента рассчитывается на основе теплового баланса:

$$q_{mp,i}^{нар} = \frac{\left[T_{e,i}^{cp} - T_{0,i}^{cp} \right]}{\frac{1}{\alpha_{e,i}^{нрив}} \cdot \frac{d_{mp,i}}{d_{mp,i}^{воп}} + \frac{d_{mp,i}}{2 \cdot \lambda_{p,i}} \ln \left(\frac{d_{mp,i}^{воп}}{d_{mp,i}} \right) + R_{конт} + \frac{d_{mp,i}}{2 \cdot \lambda_{mp,i}} \ln \left(\frac{d_{mp,i}}{d_{mp,i}^{вн}} \right) + \frac{1}{\alpha_{0,i}} \cdot \frac{d_{mp,i}}{d_{mp,i}^{вн}}}}, \quad (11)$$

где: $T_{e,i}^{cp}$ и $T_{0,i}^{cp}$ – средние по элементу температуры воздуха и холодильного агента, К; $d_{mp,i}^{воп}$, $d_{mp,i}$, $d_{mp,i}^{вн}$ – диаметр воротников ребер, внешний и внутренний диаметры трубок, м; $\lambda_{p,i}$ и $\lambda_{mp,i}$ – теплопроводность ребер и трубок, Вт/(м²·К); $\alpha_{e,i}^{нрив}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), учитывающий тепловое сопротивление слоя из инея на ребре $\delta_{p,i}^{ин}$ / $\lambda_{p,i}^{ин}$ и воротниках ребер $\delta_{mp,i}^{ин}$, термический КПД ребра $E_{p,i}$ и изменение площади теплопередающей поверхности по мере роста инея.

Прирост удельной массы инея на ребре за период времени Δt (для расчета массы слоя инея на межреберной поверхности трубок было использовано схожее соотношение):

$$dm_{p,i}^{ин} = \Delta \tau \cdot q_{p,i}^{очн} \cdot \frac{f_{p,i}^{очн}}{f_{p,i}} \cdot \frac{\xi_{p,i}^{ин} - 1}{\xi_{p,i}^{ин} \cdot L}. \quad (12)$$

Холодопроизводительность воздухоохладителя:

$$Q_0^{BO} = G_e \cdot \left(Cp_e \cdot [T_{e1} - T_{e2}] + L \cdot [d_{e1} - d_{e2}] \right) = G_0 \cdot [h_{02} - h_{01}]. \quad (13)$$

В пятой главе приводится сопоставление результатов расчетов по разработанной автором модели охлаждения влажного воздуха в воздухоохладителе с полученными экспериментальными данными.

Анализ экспериментальных данных для опытов в «сухих» условиях показал, что с понижением температуры кипения от минус 20 до минус 30 °С имеет место снижение коэффициента теплопередачи k

на 30÷35% и температурного напора θ_{ln} на 25÷30% (Рисунок 5). Причиной этого является снижение объемной производительности холодильного компрессора $V_{комп}$ на 26%, уменьшение массовой скорости хладагента M_0 в 2 раза и, как следствие, снижение коэффициента теплоотдачи холодильного агента α_0 на 45%.

Таким образом, при проектировании воздухоохладителей важным параметром является обеспечение рациональной массовой скорости холодильного агента (особенно при намеренном уменьшении температурных напоров с целью снижения естественной убыли продуктов) за счет подбора количества и длины змеевиков с учетом объемной производительности применяемого холодильного компрессора.

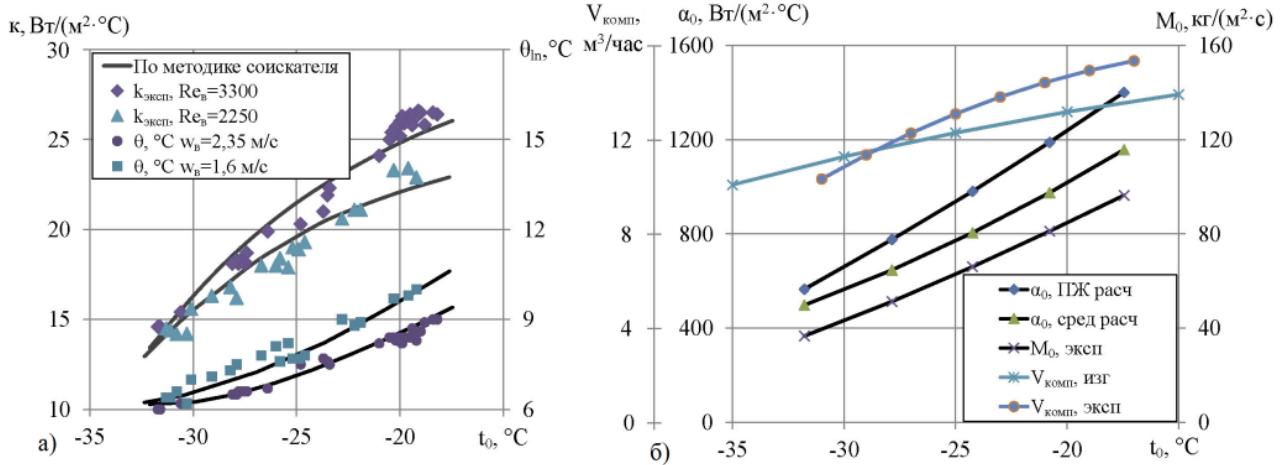


Рисунок 5. Влияние температуры кипения холодильного агента t_0 на: а) коэффициент теплопередачи k , температурный напор θ_{ln} ; б) коэффициент теплоотдачи хладагента α_0 , массовую скорость хладагента M_0 и объемную производительность холодильного компрессора $V_{комп}$

На Рисунке 6 (а - в) представлено сравнение экспериментальных данных (точки), полученных автором, и результатов расчетов (кривые) при помощи разработанной методики по влиянию температурно-влажностных условий на динамику снижения холодопроизводительности, объемного расхода воздуха и коэффициента теплопередачи в воздухоохладителе, работающем в условиях инеообразования. Снижение холодопроизводительности аппарата по мере роста инеевого слоя достигает 18 %. С ростом толщины слоя инея коэффициент теплопередачи k снижается на 30-40%. Доля термического сопротивления слоя инея на поверхности исследуемого аппарата в коэффициенте теплопередачи достигает 25%. Коэффициент теплоотдачи воздуха α_e при этом меняется незначительно и может даже увеличиваться на 1-4% за счет уменьшения проходного сечения канала слоем инея. Кроме того, снижение теплового потока q и температуры кипения холодильного агента t_0 приводит к снижению коэффициента теплоотдачи холодильного агента α_0 на 11-12%.

Результаты вычислений коэффициента теплопередачи, температуры и влажности воздуха на выходе из аппарата, массы инея на теплообменной поверхности воздухоохладителя, по представленной автором методике расчета воздухоохладителей согласуются с экспериментальными данными с погрешностью, не превышающей 15 %.

Сравнение результатов расчетов усредненной толщины слоя инея на поверхности трубок в четырех зонах воздухоохладителя (вход в аппарат (зона перегрева хладагента 1-2 ряд трубок), середина аппарата (ряд 3-4 и ряд 4-5), выход из аппарата (6-7 ряд)) с экспериментальными данными для эксперимента 6 (Таблица 2) представлено на Рисунке 6, г.

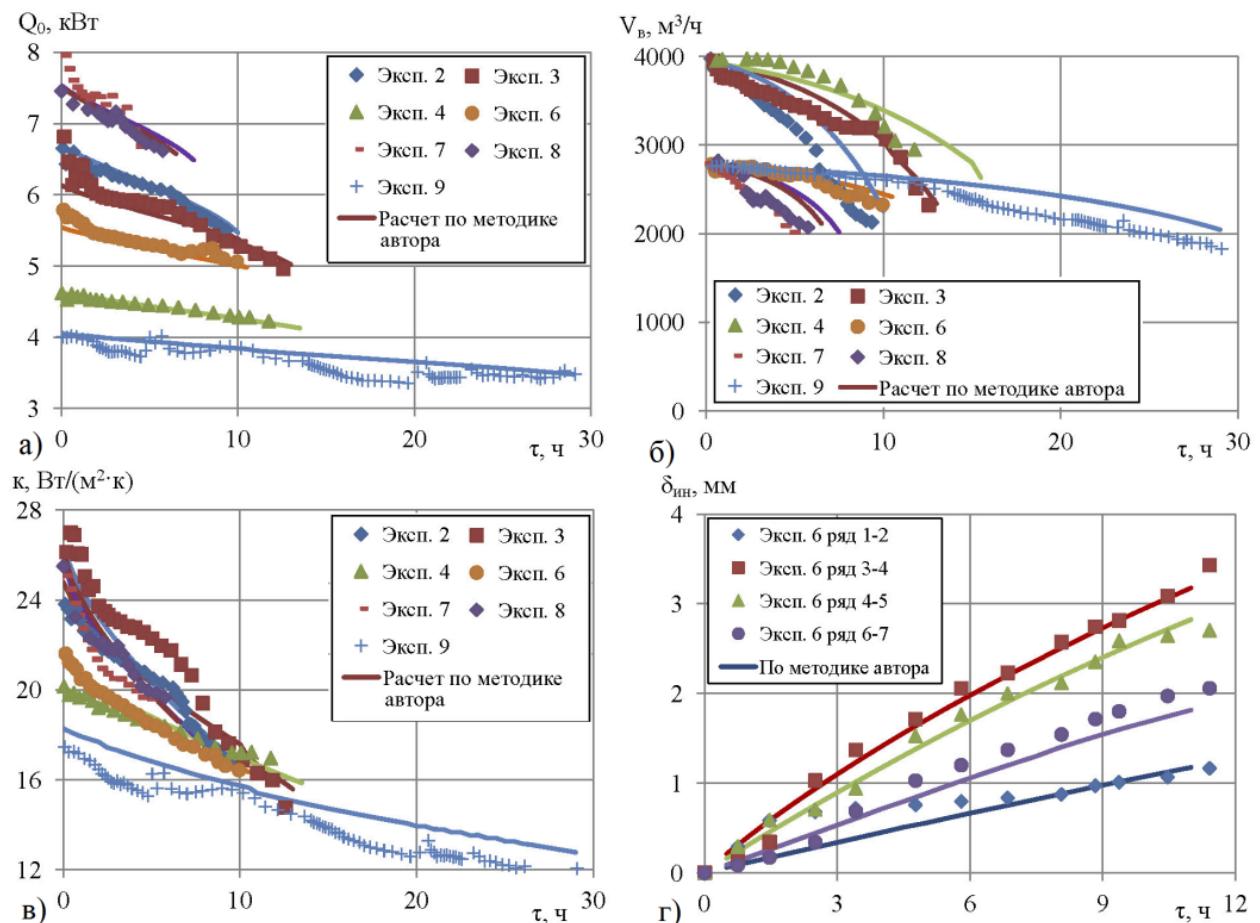


Рисунок 6. Зависимость а) холодопроизводительности Q_0 ; б) объемного расхода воздуха V_b ; в) коэффициента теплопередачи k ; г) толщины инея δ_{in} от продолжительности непрерывной работы аппарата τ : результаты расчетов по методике автора, экспериментальные данные

Толщина инея, образующегося на трубках, была на 15-25% больше, чем на соответствующих ребрах. Установлено, что относительная влажность воздуха менее 90 % на входе в аппарат способствует наиболее интенсивному росту инея в последних рядах аппарата. В связи с этим конструирование многоконтурных воздухоохладителей с переменным шагом ребер (во втором контуре по

ходу воздуха для камер хранения продуктов нецелесообразно). В воздухоохладителях морозильных камер, где поступающий на вход аппарата воздух пересыщен влагой, наиболее интенсивное образование инея происходит в первых рядах аппарата. Это связано с тем, что поверхность аппарата выступает в качестве центров кристаллизации, способствуя переходу воздуха в равновесное состояние (даже без отвода теплоты десублимации паров).

Основные выводы

1. Выполнена систематизация существующих экспериментальных исследований процесса инеообразования на охлаждаемых поверхностях, в том числе на поверхностях теплообменного оборудования в соответствии с температурно-влажностными условиями проведения опытов.

2. Разработана математическая модель роста слоя инея на охлаждаемой поверхности при вынужденной конвекции влажного воздуха с температурой от минус 20 до плюс 10°C, учитывающая полученное автором новое эмпирическое соотношение зависимости коэффициента теплопроводности инея от локальной температуры слоя. Погрешность расчетов толщины слоя инея и плотности теплового потока по представленной модели не превышает 15%.

3. На основе математической модели роста слоя инея проведен анализ влияния температуры, относительной влажности и коэффициента теплоотдачи воздуха на интенсивность роста толщины слоя инея и интенсивность снижения удельного теплового потока.

4. Разработан экспериментальный стенд и выполнены исследования технических характеристик воздухоохладителя, работающего при температурах воздуха от минус 6 до минус 20 °C, относительной влажности воздуха от 40 до 100 %, а также различных расходно-напорных характеристиках вентилятора. Установлено, что:

- в «сухих» условиях работы воздухоохладителя понижение температуры кипения холодильного агента от минус 20 до минус 30 °C приводит к уменьшению коэффициента теплопередачи на 30÷35%. Причиной этого является снижение массовой скорости холодильного агента в каналах теплообменника в 2 раза и соответствующее уменьшение его коэффициента теплоотдачи на 45%;

- процесс инеообразования в исследуемом аппарате приводит к увеличению общего термического сопротивления на 30%, росту аэродинамического сопротивления аппарата более чем в 2 раза, а также снижению холодопроизводительности на 15%;

- с понижением температуры воздуха на входе в воздухоохладитель от минус 6 до минус 20 °С интенсивность роста массы и толщины слоя инея на поверхности аппарата снижается более чем в 3 раза.

5. На основе проведенных исследований разработана (патент на изобретение РФ №2691895) технология периодического удаления инея с поверхности воздухоохладителя при помощи гранулированных частиц льда.

6. Разработаны математическая модель процесса охлаждения влажного воздуха в воздухоохладителях с учетом образования инея и компьютерная программа расчета технических характеристик аппаратов, обеспечивающие прогнозирование динамики изменения холодопроизводительности, объемного расхода воздуха, температурного напора и коэффициентов теплопередачи с погрешностью, не превышающей 15 %. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617452.

7. Разработана уточненная методика расчета технических характеристик воздухоохладителей, сравнение результатов вычислений по которой с экспериментальными данными подтверждает адекватность предложенной математической модели и компьютерной программы расчета. Методика внедрена на производственном предприятии ООО «Терма» г. Фрязино и используется при выполнении конструкторских и поверочных расчетов теплообменников.

Публикации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ:

1.Маринюк Б. Т., Королев И. А. Теплопроводность инеевого криосадка как фактор, определяющий теплопередачу в камерных приборах охлаждения // Холодильная техника. 2017. № 7. С. 37-41. (0,31 п.л./0,16 п.л.)

2.Маринюк Б. Т., Королев И. А. Особенности формирования и динамики роста инея на теплообменных поверхностях криогенного оборудования // Холодильная техника. 2017. № 11. С. 38-41. (0,25 п.л./0,13 п.л.)

3.Маринюк Б. Т., Королев И. А. Расчет и анализ динамики роста толщины слоя водного инея на охлаждаемой поверхности // Холодильная техника. 2016. № 11. С. 38–43. (0,38 п.л./0,19 п.л.)

4.Пат. 2691895 Российская Федерация, МПК F25B 47/00, F25D 21/06, F28F 17/00. Низкотемпературный воздухоохладитель с системой удаления инея / Б. Т. Маринюк, И. А. Королев, заяв.4.09.2018; опубл.18.06.2019 Бюл. № 17.

5.Свидетельство о регистрации ПрЭВМ 2019617452, Российская Федерация. Программа расчета технических характеристик воздухоохладителей, работающих в условиях инеевыпадения / И. А. Королев, заявл.29.04.2019; опубл.07.06.2019.