

Аккумулятивное льда в условиях естественного холода для систем охлаждения пищевых продуктов

Г. Ю. ГОНЧАРОВА^{1,2}, В. П. ПЫТЧЕНКО², С. С. БОРЗОВ², Г. В. БОРЩЕВ²

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5/1, Москва, 105005, Российская Федерация

²Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, ул. Костякова, 12, Москва, 127422, Российская Федерация

Резюме. На объектах пищевой промышленности, со значительной степенью неравномерности тепловой нагрузки целесообразно использовать технологию льдоаккумуляции. Для повышения энергоэффективности процесса зарядки льдоаккумуляторов применяют комбинированные системы с использованием естественного холода. Цель исследования – изучение процесса намораживания льда на трубчатой поверхности различной конфигурации при помощи мелкодисперсного орошения при температуре окружающего воздуха минус 5 °С, минус 10 °С, минус 15 °С и минус 20 °С, а также определение оптимальных режимных параметров. Намораживание льда осуществляли на коаксиальном и плоскостоемковом макетных образцах в условиях естественного холода зимой 2022–2023 гг. в г. Москве, а также в серии экспериментов в климатической камере при поддержании фиксированных отрицательных температур. При температуре окружающего воздуха минус 5 °С в условиях естественного холода масса намораживаемого льда составила 0,8 кг/м² теплообменной поверхности за 1 ч, минус 10 °С – 5,63 кг/м², минус 15 °С – 9,03 кг/м². В климатической камере при оптимальной продолжительности цикла орошения ($\tau_{\text{орошения}}$) и паузы между циклами орошения ($\tau_{\text{паузы}}$), а также температуре окружающей среды в диапазоне от минус 10 до минус 20 °С на 1 м² теплообменной поверхности аппарата за 1 ч намораживалось от 6 до 12,3 кг льда. На коаксиальном теплообменном аппарате в идентичных условиях его было больше, чем на плоскостоемковом. При этом с увеличением длительности намораживания с 1 до 4 ч преимущество коаксиальной конфигурации возрастает с 15 % до 165 % благодаря более интенсивному увеличению площади намороженного массива и меньшему количеству «мёртвых» зон при орошении.

Ключевые слова: аккумулятивное холода, оптимизационная задача, орошение, естественный холод, зарядка льдоаккумулятора, теплообмен.

Сведения об авторах: Г. Ю. Гончарова, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией; В. П. Пытченко, ведущий инженер; С. С. Борзов, младший научный сотрудник; Г. В. Борщев, младший научный сотрудник (e-mail: razorleaf.619@gmail.com)

Для цитирования: Аккумулятивное льда в условиях естественного холода для систем охлаждения пищевых продуктов / Г. Ю. Гончарова, В. П. Пытченко, С. С. Борзов и др. // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38. № 9. С. 95–100. doi: 10.53859/02352451_2024_38_9_95

Ice storage under natural cold conditions for food refrigeration systems

G. Yu. Goncharova^{1,2}, V. P. Pytchenko², S. S. Borzov², G. V. Borschev²

¹Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul., 5/1, Moscow, 105005, Russian Federation

²All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry - branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Science, ul. Kostyakova, 12, Moscow, 127422, Russian Federation

Abstract. At food industry facilities with a significant degree of uneven heat load, it is advisable to use ice accumulation technology. To improve the energy efficiency of the ice accumulator charging process, combined systems using natural cold are used. The research aimed to study the process of ice freezing on a tubular surface of various configurations using fine-dispersed irrigation at an ambient temperature of minus 5, minus 10, minus 15 and minus 20 degrees Celsius, as well as to determine the optimal operating parameters. Ice accumulation was carried out on coaxial and flat-coil prototypes under natural cold conditions in the winter of 2022–2023 in Moscow, as well as in a series of experiments in a climatic chamber while maintaining fixed negative temperatures. At an ambient temperature of minus 5 degrees Celsius under natural cold conditions, the mass of accumulated ice was 0.8 kg/m² of heat exchange surface in 1 hour, at minus 10 degrees Celsius – 5.63 kg/m², at minus 15 degrees Celsius – 9.03 kg/m². In the climatic chamber, with the optimal duration of the irrigation cycle ($\tau_{\text{irrigation}}$) and the pause between irrigation cycles (τ_{pause}), as well as the ambient temperature in the range from minus 10 to minus 20 degrees Celsius, from 6 to 12.3 kg of ice was frozen per 1 m² of the heat exchange surface of the apparatus in 1 hour. On the coaxial heat exchange apparatus under identical conditions, it was more than on the flat-coil one. In this case, with an increase in the freezing duration from 1 to 4 hours, the advantage of the coaxial configuration increases from 15% to 165% due to a more intensive increase in the area of the frozen mass and a smaller number of “dead” zones during irrigation.

Keywords: cold accumulation; optimisation problem; irrigation; natural cold; ice accumulator charging; heat-and-mass transfer.

Author Details: G. Yu. Goncharova, D. Sc. (Tech.), prof., head of laboratory; V. P. Pytchenko, leading engineer; S. S. Borzov, junior research fellow; G. V. Borschev, junior research fellow (e-mail: razorleaf.619@gmail.com)

For citation: Goncharova GYu, Pytchenko VP, Borzov SS, et al. [Ice storage under natural cold conditions for food refrigeration systems]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2024;38(9):95–100. Russian. doi: 10.53859/02352451_2024_38_9_95

Важнейшая задача холодильной отрасли – рационализация систем хладоснабжения. Это особенно актуально для объектов пищевой промышленности с неравномерным распределением тепловой нагрузки, как в течение суток, так и по сезонам. К их числу относятся предприятия молочной, пивоваренной, ликеро-водочной промышленности, сельского хозяйства и др. Для подобных объектов наиболее рационально использование льдоаккумуляторов (ЛА). Применение систем с технологией льдоаккумуляции позволяет уменьшить установленную мощность парка холодильных машин, а также обеспечить равномерное распределение нагрузки на сеть энергоснабжения [1, 2]. При этом на процесс зарядки – намораживание льда

на теплообменной поверхности аппарата – тратится наибольшее количество электроэнергии.

В центральной России среднесуточная температура воздуха на протяжении трёх и более месяцев опускается ниже минус 5 °С, что позволяет проводить намораживание льда на теплообменной поверхности. Значительно больший экономический эффект может оказать использование естественного холода для зарядки ЛА в северных регионах и арктической зоне РФ, где температура воздуха опускается ниже минус 10 °С более пяти месяцев в году (рис. 1) [3].

На сегодняшний день в открытых литературных источниках представлены патенты, описывающие процесс зарядки ЛА с возможностью использования

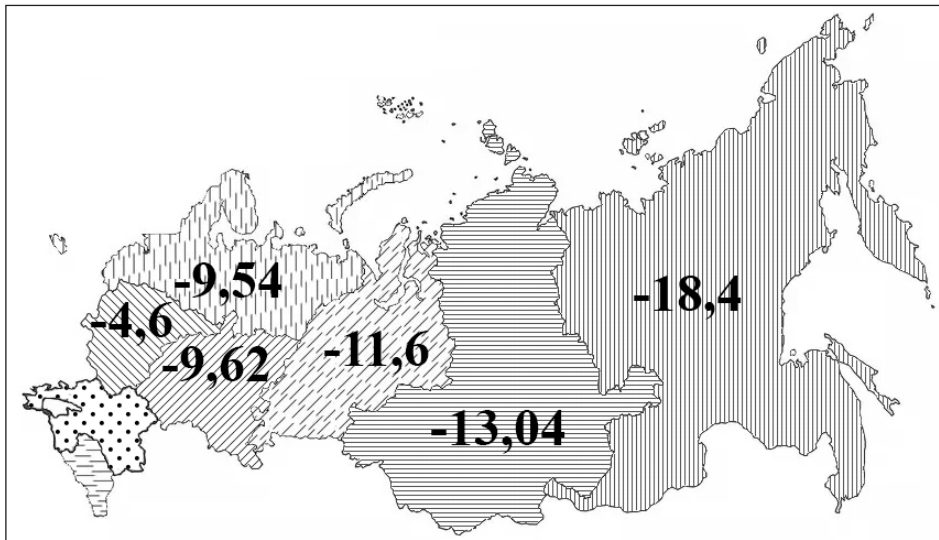


Рис. 1. Средние температуры воздуха за 5 месячный период (с ноября по март) для федеральных округов РФ, кроме Южного и Северо-Кавказского [4], °С: □ – Северо-Западный, ▨ – Центральный, ▤ – Южный, ▥ – Северо-Кавказский, ▧ – Приволжский, ▩ – Уральский, ▪ – Сибирский, ▫ – Дальневосточный.

естественного холода. Например, предложен способ повышения энергоэффективности намораживания льда на теплообменной поверхности секций ЛА путем установки над кожухом льдоаккумулятора воздушного охладителя с циркулирующим в нём хладагентом (рис. 2) [5]. Согласно расчетам, проведенным авторами патента, применение такой схемы для молокозавода с холодильной установкой с максимальной холодопроизводительностью 300 кВт и пиковым энергопотреблением 100 кВт позволит за два зимних месяца при температуре воздуха ниже минус 10 °С уменьшить длительность работы холодильной установки на 50 %. К недостаткам такого технического решения относится необходимость монтажа вспомогательной гидравлической линии и дополнительной теплообменной секции.

В другом патенте [6] представлен башенный цилиндрический льдоаккумулятор с коаксиальным многосекционным змеевиковым испарителем. Его особенность – вертикально установленные внутри бака полые

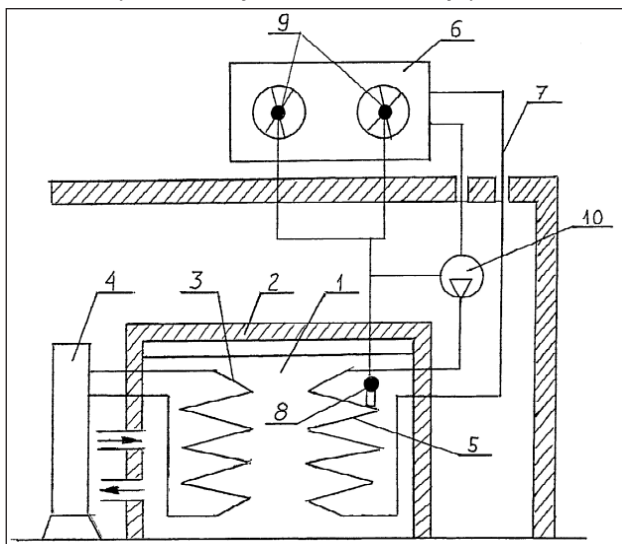


Рис. 2. Схематичное изображение ЛА: 1 – льдоаккумулятор, 2 – теплоизолированная ёмкость, 3 – основная теплообменная секция, 4 – холодильная установка, 5 – дополнительная теплообменная секция, 6 – воздушный охладитель хладагента, 7 – замкнутый гидравлический контур, 8 – датчик контроля толщины льда, 9 – вентилятор, 10 – насос.

трубки, имеющие заслонки на дне и крыше аппарата. На верхнем торце каждой из таких трубок установлен вытяжной вентилятор. В период с отрицательными температурами заслонки открывают и прокачивают холодный воздух, что приводит к намораживанию льда на поверхности трубок внутри аппарата. Согласно расчетам авторов, использование такого устройства позволяет снизить энергетические затраты на 20...50 % в зависимости от температуры окружающей среды. Однако полые трубки дополнительной теплообменной секции занимают значительный полезный объём ЛА. Основной не-

достаток представленного технического решения – сложность конструкции, а также низкая интенсивность теплопередачи при прокачивании холодного воздуха через трубки.

Еще один подход предусматривает применение в качестве источников холода для зарядки ЛА термосифонов [7, 8, 9]. Его преимущества заключаются в длительном сроке службы (25...30 лет), а также экологической безопасности. К недостаткам системы льдоаккумуляции на основе термосифонов также можно отнести усложнение конструкции ЛА.

В целом, к ключевым недостаткам перечисленных способов использования естественного холода в ЛА можно отнести следующие:

- повышение капитальных затрат, связанное с установкой дополнительного оборудования (насосы, теплообменники, вентиляторы и др.), и снижение энергетической эффективности аппарата из-за использования промежуточного хладагента;

- необходимость внесения конструктивных изменений в существующие ЛА для реализации комбинированных режимов зарядки;

- снижение полезного объёма в баке ЛА в связи с необходимостью установки дополнительных теплообменных секций;

- сложность регулирования теплообменного контура, использующего естественный холод, при изменении температуры наружного воздуха.

Альтернативный подход к зарядке ЛА в условиях естественного холода предусматривает ее проведение путем периодического мелкодисперсного распыления воды над поверхностью труб с использованием оросительных устройств. Такой подход более рационален для коаксиальной вертикально ориентированной конструкции ЛА [10, 11]. При его реализации на теплообменной поверхности аппарата происходит нарастание льда и образование развитой поверхности в виде ледяных stalactites, что также служит позитивным фактором для последующего плавления льда.

Цель исследования – изучение процесса намораживания льда на трубчатой поверхности ЛА путём орошения в условиях естественного холода и определение оптимальных режимных параметров в зависимости от температурных условий.

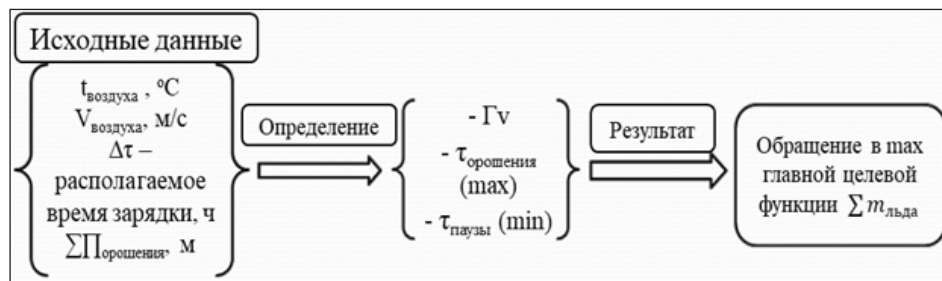


Рис. 3. Постановка оптимизационной задачи.

Для ее достижения решали следующие задачи:

экспериментальные исследования и обработка их результатов на двух макетных образцах ЛА с различной геометрической конфигурацией;

разработка алгоритмов намораживания льда и определение оптимальных режимных параметров, позволяющих намораживать его максимальные количества в различных температурных условиях.

Условия, материалы и методы. В ЛА, работающем с использованием искусственного холода, наиболее рационально намораживание льда на поверхности труб или панелей с циркулирующим внутри них кипящим хладагентом или хладоносителем. Для аккумуляции льда в естественных условиях целесообразно намораживать лёд мелкодисперсным распылением воды над поверхностью труб, обеспечивая распыление по всему суммарному периметру активной зоны орошения ($\Sigma P_{\text{орошения}}$) с минимизацией эффекта свободного пролёта. В условиях естественного холода конечный результат – масса намороженного льда – зависит от следующих параметров: объёмной плотности орошения, которая представляет собой отношение объёмного расхода воды, отнесённого к величине обтекаемого периметра с учётом растекания по обеим сторонам ($\Gamma_v, \text{м}^2/\text{с}$), продолжительности цикла орошения ($\tau_{\text{орошения}}, \text{с}$), продолжительности паузы между циклами орошения ($\tau_{\text{паузы}}, \text{с}$), располагаемого времени зарядки ($\Delta t, \text{ч}$), температуры окружающего воздуха ($t_{\text{воздуха}}, ^\circ\text{C}$) и скорости воздуха ($V_{\text{воздуха}}, \text{м/с}$).

Для определения оптимальных значений перечисленных параметров была сформулирована оптимизационная задача (обратная задача исследования операций): для совокупности исходных данных ($t_{\text{воздуха}}, \text{располагаемый интервал времени } \Delta t \text{ для зарядки аккумулятора, который определяется графиком загрузки объекта, суммарный периметр орошения } \Sigma P_{\text{орошения}}$) необходимо определить комплекс решений (режимных параметров процесса намораживания), реализация которых обращает в максимум значение главной целевой функции – массы намораживаемого льда в располагаемый интервал времени (рис. 3).

Для проведения исследований во Всероссийском научно-исследовательском институте холодильной промышленности – филиале ФГБНУ «ФНЦ пищевых си-

стем им. В.М. Горбатова» РАН были разработаны и изготовлены макетные образцы теплообменных аппаратов с коаксиальным и плоскозмеевиковым расположением медных труб. Использование отоженной меди в качестве материала для макета было обусловлено одним из самых высоких

значений ее теплопроводности и гибкостью, необходимой при изготовлении коаксиальных конструкций. Внешний диаметр труб составлял 12,7 мм, внешняя площадь трубчатой поверхности – 0,2 м² (рис. 4)

На первом этапе экспериментальные исследования проводили на стенде (рис. 5), расположенном на открытом воздухе в условиях зимы 2022–2023 гг. в г. Москве. Для орошения поверхности теплообмена над макетными образцами были установлены полноконусные устройства (форсунки) с радиусом распыла до 1 м и рабочим давлением, согласно паспорту изделия $0,3 \pm 0,05$ МПа. Такое расположение форсунок позволило обеспечить последовательное обтекание расположенных одна под другой труб и минимизацию уноса распыляемой воды. Для предотвращения замерзания воды в форсунках их обогревали гибкими ТЭНами. Подачу и отключение воды осуществляли с использованием соленоидного клапана Raifil SV-2W-15 прямого действия. Цикличность его срабатывания регулировали с помощью реле времени ROBITON CY-02 с заранее заданной частотой. Воду подавали через гибкие теплоизолированные шланги, подключенные к системе подачи воды, которые были установлены над теплообменными аппаратами. Для предотвращения замерзания воды шланги ее подачи были теплоизолированы. Измерение температуры окружающей среды осуществляли платиновыми датчиками Pt100 модели ЧЭПТ 19-2, подключенными к термометрам сопротивления ТЦМ 9410/М1Н. Скорость потоков воздуха определяли анемометром АП1-1, массу намороженного льда – взвешиванием на весах M-ER 326AFU LCD с вычетом массы макетного образца. Исследования в

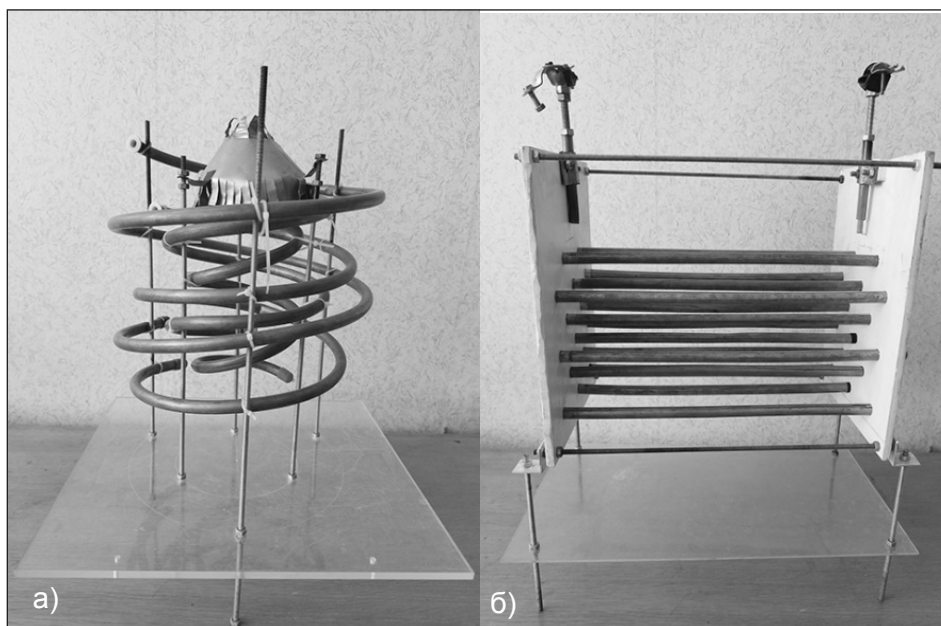


Рис. 4. Макетные образцы теплообменных аппаратов: а) коаксиальный, б) плоскозмеевиковый.

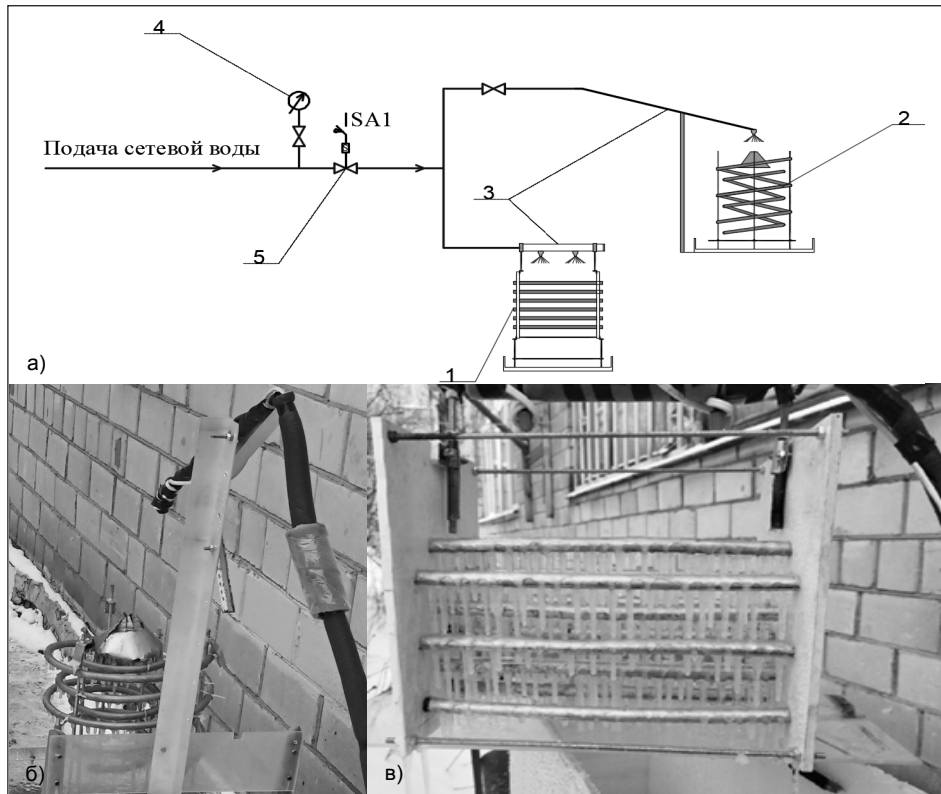


Рис. 5. Стенд для проведения исследований на открытом воздухе: а) принципиальная схема (1 – плоскозмеевиковый макетный ЛА, 2 – коаксиальный макетный ЛА, 3 – система подачи воды с форсунками и ТЭНами, 4 – манометр, 5 – соленоидный клапан), б) коаксиальный макет с замороженным льдом, в) плоскозмеевиковый макет с замороженным льдом.

условиях климатической камеры проводили при фиксированной скорости потоков воздуха 1 м/с. В условиях естественного холода скорость ветра была переменной и составляла $1 \pm 0,5$ м/с. Влияние этого параметра на интенсивность намораживания ледовых структур на поверхности теплообменных аппаратов в рамках текущего этапа работы не оценивали. Температура подаваемой на орошение воды составляла $7 \pm 1,5$ °С.

После того, как температура воздуха превысила уровень минус 5 °С эксперименты проводили в холодильной камере с имитацией условий естественного холода (рис. 6).

Продолжительность экспериментальных исследований для фиксированных значений температур минус 5, минус 10 и минус 15 °С в условиях естественного холода и минус 10, минус 15 и минус 20 °С в холодильной камере составляла 1, 2, 3 и 4 ч. В условиях естественного холода не проводили эксперименты

задачей было уменьшение длительности $t_{\text{паузы}}$ с шагом 7 с. Исследования этого этапа также состояли из серий по 5 экспериментов для каждого шага значений $t_{\text{паузы}}$ и $t_{\text{орошения}}$. При отсутствии прироста массы льда опыты прекращали. После нахождения оптимальных значений $t_{\text{орошения}}$ и $t_{\text{паузы}}$, проводили серии из 5 экспериментов с продолжительностью 1, 2, 3 и 4 ч. В рамках отдельной части программы исследований проводили серии из 5 экспериментов при фиксированных значениях $t_{\text{орошения}} = 10$ с и $t_{\text{паузы}} = 120$ с в холодильной камере. Всего было проведено более 240 экспериментов.

Оценку неопределенности экспериментальных данных проводили согласно ГОСТ 34100.3-2017. Ее расчет предусматривает оценку неопределенности по типу А, учитывающую отклонения статистического характера, и по типу В, учитывающую отклонения систематического характера (приборная погрешность). Для каждого из исследованных режимов проводили оценку расширенной неопределенности измерений при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Результаты и обсуждение.

В условиях естественного холода при соблюдении оптимальных режимных параметров $t_{\text{орошения}}$ и $t_{\text{паузы}}$ для температур минус 10 и минус 15 °С и переменном ветре за 1 ч работы было наморожено соответственно 5,63 и 9,03 кг льда на 1 м² теплообменной поверхности. При минус 5 °С масса намораживаемого льда составила 0,80 кг/м². Малое количество льда, на-

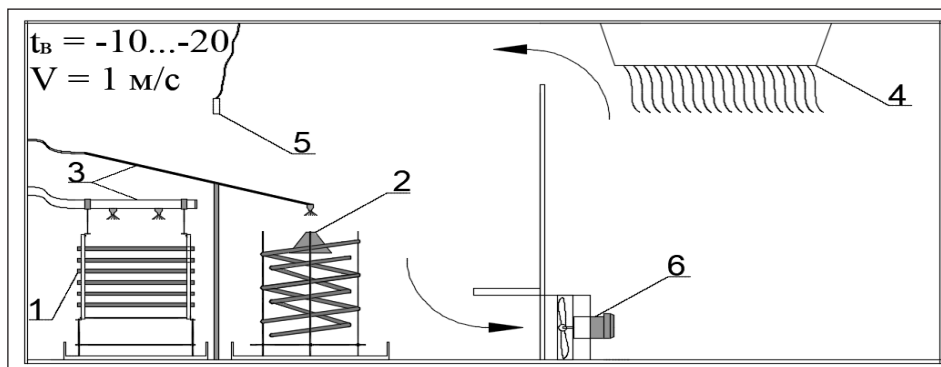


Рис. 6. Принципиальная схема стенда для исследования намораживания льда в холодильной камере: 1 – плоскозмеевиковый макет ЛА, 2 – коаксиальный макет ЛА, 3 – система подачи воды с форсунками и ТЭНами, 4 – воздухоохладитель, 5 – датчик температуры воздуха в камере, 6 – вентилятор.

Таблица 1. Обобщение результатов экспериментальных исследований

Температура воздуха, °C	Удельная масса намораживаемого льда в час, кг/м ²			
	естественный холод		холодильная камера	
	оптимальные параметры $\tau_{\text{орошения}}$ и $\tau_{\text{паузы}}$	намораживание вне оптимума $\tau_{\text{орошения}}$ и $\tau_{\text{паузы}}$	оптимальные параметры $\tau_{\text{орошения}}$ и $\tau_{\text{паузы}}$	намораживание вне оптимума $\tau_{\text{орошения}}$ и $\tau_{\text{паузы}}$
- 10	5,63 ± 0,42*	до 5,12 ± 0,49	6,00 ± 0,57	до 5,93 ± 0,64
- 15	9,03 ± 0,82	до 8,20 ± 0,76	9,45 ± 1,13	до 8,83 ± 0,75
- 20	-	-	12,3 ± 1,12	до 12,00 ± 1,35

*масса намораживаемого льда ± расширенная неопределенность намораживаемой массы льда.

мораживаемого при температурах воздуха выше минус 10 °C, обусловлено тем, что $\tau_{\text{паузы}}$ должна быть не менее 60 с, а $\tau_{\text{орошения}}$ не более 1 с, что соответствует массе подаваемой воды 0,01 кг за один распыл, поскольку при иных режимных параметрах образование льда не происходило. В связи со слабым намораживанием льда при температуре минус 5 °C дальнейшие исследования на этом температурном уровне не проводили. Необходимо также отметить, что в случае порывов ветра более 1 м/с во время циклов орошения, наблюдался снос значительной части распыляемой воды, что негативно влияло на процесс намораживания льда. Таким образом, учитывая климатические особенности различных регионов РФ, важное дальнейшее направление исследований – определение рациональной дисперсности распыляемой на поверхность теплообменных аппаратов воды при различных скоростях потоков воздуха. При соблюдении оптимальных параметров $\tau_{\text{орошения}}$ и $\tau_{\text{паузы}}$ в холодильной камере при температуре окружающего воздуха минус 20 °C за 1 ч на теплообменной поверхности было наморозено до 12,3 кг льда на 1 м². При температуре окружающей среды минус 10 °C и минус 15 °C величина этого показателя составляла 6 и 9,45 кг на 1 м² (табл. 1).

После обобщения результатов всех экспериментов была предложена номограмма (рис. 7), позволяющая выбирать максимальное значение времени орошения ($\tau_{\text{орошения}}$) и минимальное значение времени паузы ($\tau_{\text{паузы}}$), при которых за установленный период времени будет наморозена максимальная масса льда для каждого конкретного значения температуры окружающего воздуха. Для выбора оптимальных параметров с ее использованием от точки на оси абсцисс, соответствующей температуре окружающего воздуха, необходимо провести перпендикуляр до пересечения с нижней кривой, определяющей максимальное значение периода орошения, и на правой оси ординат найти соответствующее значение $\tau_{\text{орошения}}$. Значение, полученное при пересечении перпендикуляра с верхней кривой, соответствует минимальному значению временной паузы $\tau_{\text{паузы}}$ и определяется пересечением с левой осью ординат. В представленном при-

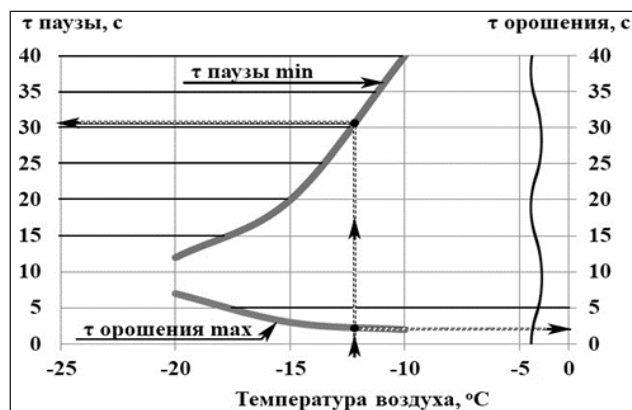


Рис. 7. Номограмма определения оптимальных значений длительности орошения $\tau_{\text{орошения}}$ и длительности паузы $\tau_{\text{паузы}}$.

мере $\tau_{\text{орошения}}$ составляет 2 с, $\tau_{\text{паузы}}$ – 31 с. При превышении рекомендованного значения $\tau_{\text{орошения}}$ часть распыляемой воды не будет успевать намораживаться на поверхности труб, а при недостаточно продолжительной паузе – будет смываться уже сформированный лёд. При слишком длительных паузах количество циклов распыления уменьшится, что также приведёт к уменьшению конечной массы намороженного льда.

Для оценки эффективности намораживания на различных конфигурациях макетов теплообменных аппаратов были проведены серии экспериментов в климатической камере. Подобное сравнение наиболее информативно, поскольку в таких условиях минимизировано влияние динамически изменяющейся скорости потоков воздуха, наблюдаемой в условиях естественного холода. Для сравнения были выбраны фиксированные значения $\tau_{\text{орошения}} = 10$ с и $\tau_{\text{паузы}} = 120$ с в диапазоне температур от минус 10 до минус 20 °C. Это обеспечило возможность оценки прироста массы льда на двух геометрических конфигурациях макетов теплообменных аппаратов в идентичных условиях (рис. 8).

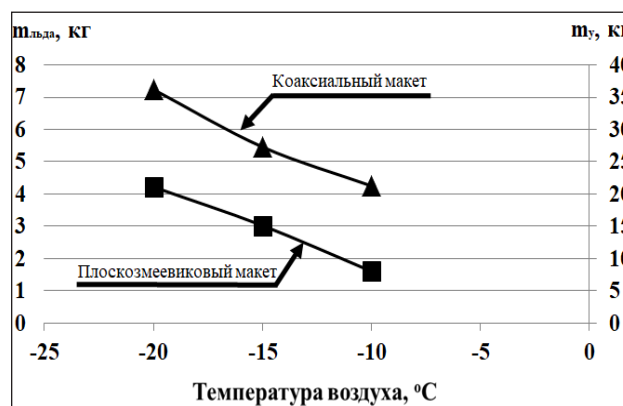


Рис. 8. Зависимость массы намораживаемого льда на поверхности труб и в пересчете на удельную теплообменную поверхность макетов за 4 ч в режиме $\tau_{\text{орошения}} = 10$ с, $\tau_{\text{паузы}} = 120$ с.

На макете с коаксиальной конфигурацией теплообменного аппарата за идентичный промежуток времени намораживается большая масса льда. Различия по величине этого показателя между конфигурациями для исследованных режимов в течение первого часа достигали 15...25 %. За 4 ч разница между массой льда, намороженной аппаратами с коаксиальной и плоскозмеевиковой конфигурацией, при $t_{\text{воздуха}}$ минус 10 °C достигала 165 %, при минус 15 – 115 % и при минус 20 °C – 60 % для исследованных режимов $\tau_{\text{орошения}}$ и $\tau_{\text{паузы}}$. С одной стороны, это обусловлено наличием на макете с плоскозмеевиковой конфигурацией «мертвых зон» (части поверхности с недостаточным орошением), с другой – при увеличении площади ледовой поверхности минимизируется эффект свободного пролёта. При коаксиальной геометрии «мертвая зона» также существует, однако в аппаратах вертикальной конфигурации для решения этой проблемы в центральной части устанавливают конический отбойник.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности разработки комбинированных пленочных льдоаккумуляторов с возможностью использования естественного холода. Учитывая климатические особенности северных регионов Российской Федерации, целесообразно провести дальнейшее изучение намораживания льда в условиях естественного холода до минус 35... минус 40 °С.

Выводы. Эффективность намораживания льда в условиях естественного холода в значительной степени зависит от сочетания режимных параметров орошения: $t_{\text{орошения}}$ и $t_{\text{паузы}}$. Использование естественного холода для намораживания в ЛА рационально с температуры минус 10 °С. В результате обобщения полученных данных построена номограмма для определения оптимальных режимных параметров намораживания $t_{\text{орошения}}$ и $t_{\text{паузы}}$ в зависимости от температуры окружающей среды.

При понижении температуры эффективность намораживания льда возрастает не только от уменьшения температурного уровня, но и от сокращения длительности $t_{\text{паузы}}$ и увеличения продолжительности периодов орошения $t_{\text{орошения}}$.

Литература.

1. Asgharian H., Baniasadi E. *Experimental and numerical analyses of a cooling energy storage system using spherical capsules* // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 149. P. 909–923. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.116.
2. Modeling and testing of an ice bank for milk cooling after milking / R. A. Jordan, L. A. Cortez, Jr. V. Silveira, et al. // *Engenharia Agricola*. 2018. Vol. 38. P. 510–517. doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n4p510-517/2018.
3. Анисимов О. А., Кокорев В. А. Климат в арктической зоне России: анализ современных изменений и модельные проекции на XXI век // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2016. № 1. С. 61–70.
4. Температура воздуха в России: среднесуточные и среднегодовые показатели. // *РИА НОВОСТИ*. 2021. URL: <https://ria.ru/20220430/temperatura-1786352938.html> (дата обращения 28.04.2024).
5. Льдоаккумулятор для производства ледяной воды / В. И. Велюханов, Г. В. Гусева, О. А. Коваленко и др. // *Патент РФ № 2484396*, 10.06.2013.
6. Гусев М. Р., Захаров Н. С. Установка для производства ледяной воды и аккумуляирования холода // *Патент РФ № 2287749*, 20.11.2006.
7. Козловцев А. П., Квашенников В. И., Шахов В. А. Предпосылки использования комбинированного аккумулятора природного холода на основе фазовопереходных теплообменников // *Достижения науки и техники АПК*. 2017. Т. 31. № 7. С. 66–68.
8. Секционный аккумулятор природного холода для охлаждения молока на фермах / С. П. Козловцева, М. М. Константинов, В. И. Квашенников и др. // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2016. № 4. С. 43–46. doi: 10.12737/21789.
9. Козловцев А. П. Результаты экспериментального исследования тепломассообменных процессов при использовании естественного холода // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2017. № 65. С. 96–99.
10. Performance of an ice bank with falling film flow around a melting surface / G. Y. Goncharova, I. A. Korolev, V. P. Pytchenko, et al. // *Russian Engineering Research*. 2023. Vol. 43. No. 11. P. 1386–1392. doi: 10.3103/s1068798x23110114.
11. Интенсификация тепломассообмена в процессе разрядки льдоаккумуляторов / Г. Ю. Гончарова, В. П. Пытченко, С. С. Борзов и др. // *Молочная промышленность*. 2022. № 10. С. 18–21. doi: 10.31515/1019-8946-2022-10-18-21.

References.

1. Asgharian H, Baniasadi E. *Experimental and numerical analyses of a cooling energy storage system using spherical capsules*. *Applied Thermal Engineering*. 2019;149:909-23. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.116.
2. Jordan RA, Cortez LA, Silveira V, et al. Modeling and testing of an ice bank for milk cooling after milking. *Engenharia Agricola*. 2018;38:510-7. doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n4p510-517/2018.
3. Anisimov OA, Kokorev VA. [Climate in the arctic zone of Russia: Analysis of current changes and modeling trends for the 21st century]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2016;(1):61-70. Russian.
4. Ria [Internet]. Moscow: MIA "Rossiya segodnya"; 2014-2024. [Air temperature in Russia: average daily and annual averages]; 2022 Aug 30 [cited 2024 April 28]; [about 8 screens]. Available from: <https://ria.ru/20220430/temperatura-1786352938.html>. Russian.
5. Velyukhanov VI, Guseva GV, Kovalenko OA, et al. L'doakkumulyator dlya proizvodstva ledyanoi vody [Ice accumulator for production of ice water]. *Russian Federation patent RU2484396*. 2013 Jun 10. Russian.
6. Gusev MR, Zakharov NS. Ustanovka dlya proizvodstva ledyanoi vody i akkumulirovaniya kholoda [Installation for the production of ice water and cold storage]. *Russian Federation patent RU2287749*. 2006 Nov 20. Russian.
7. Kozlovtssev AP, Kvashennikov VI, Shahov VA. [Preconditions for using a combined accumulator of natural cold based on phase-transfer heat exchangers]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2017;31(7):66-8. Russian.
8. Kozlovtsseva SP, Konstantinov MM, Kvashennikov VI, et al. [Sectional natural cold accumulator for cooling milk on farms]. *Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*. 2016;(4):43-6. Russian. doi: 10.12737/21789.
9. Kozlovtssev AP. [Results of experimental studies of heat-and-mass exchange processes when using natural cold]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017;(65):96-9. Russian.
10. Goncharova GY, Korolev IA, Pytchenko VP. Performance of an ice bank with falling film flow around a melting surface. *Russian Engineering Research*. 2023;43(11):1386-92. doi: 10.3103/s1068798x23110114.
11. Goncharova GY, Pytchenko VP, Borzov SS, et al. [Intensification of heat and mass transfer during ice bank discharge]. *Molochnaya promyshlennost'*. 2022;(10):18-21. Russian. doi: 10.31515/1019-8946-2022-10-18-21.

Поступила в редакцию 01.07.2024 После доработки 30.08.2024 Принята к публикации 25.09.2024

Коаксиальная конфигурация теплообменного аппарата более предпочтительна с точки зрения намораживания льда путем орошения поверхности. В исследованных условиях масса льда, намороженная на макете коаксиальной конфигурации за 4 ч была больше, чем на плоскозмеевиковом, при $t_{\text{воздуха}}$ минус 10 °С на 165 %.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась за счет средств бюджета института и выполнена на основе государственного задания федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» Российской академии наук FGUS-2022-0014. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.