

УДК 621.565.2

Исследование процессов тепломассообмена при пленочном обтекании ледовых поверхностей с фазовым переходом на границе раздела

Д-р техн. наук Г. Ю. ГОНЧАРОВА^{1,2}
В. П. ПЫТЧЕНКО², С. С. БОРЗОВ², Г. В. БОРЩЕВ^{1,2}

¹МГТУ им. Н. Э. Баумана

²ВНИИХИ — филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН

E-mail: razorleaf.619@gmail.com

Представлены результаты исследования процесса пленочного обтекания ледовых поверхностей в аккумуляторах холода с фазовым переходом на границе раздела. Экспериментальные исследования проведены для льдоаккумулятора с плоскими змеевиками и его единичной секции. Эксперименты проводились на трех температурных уровнях охлаждаемой воды: 20, 40 и 60 °С в диапазоне объемных плотностей орошения от $0,1 \cdot 10^{-4}$ м²/с до $1,5 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Установлено, что при указанных параметрах удельная тепловая нагрузка, отводимая в льдоаккумуляторе с пленочным механизмом теплообмена, достигает 320 000 Вт/м². Это значение в среднем на порядок превосходит аналогичные значения для современных пластинчатых теплообменных аппаратов ведущих производителей (Alfa Laval, Funke, Ридан), и более, чем на два порядка выше, чем в аккумуляторах с плавлением льда в большом объеме. В указанном диапазоне значения коэффициента теплоотдачи, приведенного к поверхности теплообменного аппарата, достигали ~22 000 Вт/(м²·К), что значительно превышает аналогичный показатель льдоаккумуляторов объемного плавления (300–500 Вт/(м²·К)). Показано, что в отличие от теплообменных аппаратов с фиксированной теплопередающей поверхностью при пленочном обтекании начальный градиент температур между охлаждаемой водой и ледовой поверхностью опосредованно (через число Рейнольдса стекающей пленки) влияет на коэффициент теплоотдачи. Обобщение результатов показало перспективность применения льдоаккумуляторов с пленочным механизмом тепломассообмена для объектов пищевой промышленности с неравномерным распределением тепловой нагрузки и для поддержания температуры охлаждаемых продуктов. Кроме этого, они могут эффективно применяться в системах с импульсным характером тепловыделений (охлаждение лазеров и др.), а также в качестве суточных накопителей в совокупности с «зелеными» системами энергоснабжения, использующими энергию солнца и ветра.

Ключевые слова: пленочное течение, фазовый переход, лед, плотность орошения, коэффициент теплоотдачи, льдоаккумулятор, пиковые нагрузки, интенсификация тепломассообмена, объемное плавление.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 12.08.2021, принята к печати 11.10.2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-3-11

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Гончарова Г. Ю., Пытченко В. П., Борзов С. С., Борщев Г. В. Исследование процессов тепломассообмена при пленочном обтекании ледовых поверхностей с фазовым переходом на границе раздела // Вестник Международной академии холода. 2021. № 4. С. 3–11. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-3-11

Heat and mass transfer during film flow around ice surfaces with a phase transition at the interface

D. Sc. G. Yu. GONCHAROVA^{1,2}, V. P. PYTCHENKO², S. S. BORZOV²,
G. V. BORSCHEV^{1,2}

¹Bauman Moscow State Technical University

²VNIKHИ — Branch of V. M. Gorbatov Research Center for Food Systems of Russian Academy of Science

E-mail: razorleaf.619@gmail.com

The article presents the results of a study of a film flow process around ice surfaces in ice banks with a phase transition at the interface. Experimental studies were carried out for an ice bank with flat coils and its single section. The experiments were carried out at three temperature levels of cooled water: 20, 40, and 60 °C in the range of volumetric irrigation densities from $0.1 \cdot 10^{-4}$ м²/s to $1.5 \cdot 10^{-4}$ м²/s. It has been established that, at the specified parameters, the output specific

heat load of the ice bank with a film heat exchange mechanism reaches up to 320 000 W/m². On average, this value is an order of magnitude higher than similar values for modern plate heat exchangers from leading manufacturers (Alfa Laval, Funke, and Ridan), and more than two orders of magnitude higher than in ice banks with ice melting in a large volume. In the specified range, the values of the heat transfer coefficient, reduced to the surface of the heat exchanger, reached ~ 22.000 W/(m²·K), which significantly exceeds the analogous value for volumetric melting ice banks (300–500 W/(m²·K)). It is shown that in heat exchangers with a film flow, the initial temperature gradient between the cooled water and the ice surface affects the heat transfer coefficient indirectly (through the Reynolds number of the falling film), in contrast to heat exchangers with a fixed heat transfer surface. The generalization of the results showed the prospects of using ice banks with a film heat and mass transfer mechanism for food industry objects with an uneven distribution of heat load and for maintaining the temperature of refrigerated products. In addition, they can be effectively used in systems with a pulsed nature of heat release (cooling lasers, etc.), as well as daily storage devices in conjunction with «green» power supply systems using solar and wind energy.

Keywords: film flow, phase transition, ice, irrigation density, heat transfer coefficient, ice bank, peak loads, intensification of heat and mass transfer, volumetric melting.

Article info:

Received 12/08/2021, accepted 11/10/2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-3-11

Article in Russian

For citation:

Goncharova G. Yu., Pytchenko V. P., Borzov S. S., Borshev G. V. Heat and mass transfer during film flow around ice surfaces with a phase transition at the interface. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 4. p. 3–11. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-3-11

Введение

В пищевой промышленности качество продукции во многом определяется своевременностью и эффективностью проведения процессов ее охлаждения. В связи с этим, совершенствование теплообменной аппаратуры — всегда актуальное направление развития пищевой отрасли. Особое место занимают объекты с явно выраженной неравномерностью распределения тепловой нагрузки, как в течение суток, так и в масштабе года. Для этих систем энергетически эффективно и экономически выгодно использование аккумуляторов холода и, в частности, льдоаккумуляторов [1]–[3]. В качестве рабочего тела, благодаря своей доступности и наибольшей теплоте плавления (335 кДж/кг), абсолютным лидером является водный лед. Использование аккумулированного льдом холода позволяет, с одной стороны, существенно снижать установленную суммарную холодопроизводительность машинного парка, а с другой — способствует экономии электроэнергии за счет использования ночного тарифа во время аккумуляции холода. Накопленный холод используется в дневное время в период пиковых нагрузок, вместо или, частично заменяя работу холодильной установки, в то время как намораживание льда происходит в ночные часы при более низком тарифе на электроэнергию [4]. Однако широкому распространению льдоаккумуляторов до настоящего времени препятствовала низкая интенсивность теплоотдачи при плавлении льда в объеме жидкости. Переход от плавления льда в большом объеме к пленочному обтеканию поверхности льда — новый подход, открывающий принципиально новые возможности использования льдоаккумуляторов в результате интенсификации теплосъема и возможности сопряжения темпа плавления льда с величиной действующей тепловой нагрузки. Это особенно актуально при явно выраженном пиковом характере тепловых нагрузок и позволит в несколько раз снизить установлен-

ную мощность холодильного оборудования, что особенно важно в процессах охлаждения жидкой пищевой продукции. В частности, молоко после дойки необходимо в течение двух часов охладить до температурного уровня (4±2) °С, согласно ГОСТ 31449–2013. Обеспечивать отвод требуемой тепловой нагрузки только с помощью чиллеров (генераторов ледяной воды) нерационально, а применение комбинированных систем с льдоаккумуляцией имеет большие перспективы [5]–[6]. Комбинированные системы с льдоаккумуляцией актуальны также и для охлаждения ликеро-водочной продукции, где требования по температурам не менее жесткие [7].

Основы тепломассообмена и гидродинамики в жидких пленках были заложены П. Л. Капицей, С. С. Кутателадзе, В. Г. Левичем [8]. В дальнейшем значительный вклад в исследование процессов и аппаратов с использованием пленочного механизма теплообмена внесли Тананайко Ю. М., Семилет З. В., Риферт В. Г., Товарас Н. В. [9]–[11]. Характерно, что у различных исследователей даже при обтекании твердых поверхностей без фазового перехода на границе раздела обнаруживались значительные расхождения в результатах. В основном эти различия обусловлены многофакторностью задачи и особенностями проведения экспериментов.

Изучению процессов пленочного обтекания твердых поверхностей различных конфигураций посвящено значительное число научных работ [11]–[13]. По физической природе стекающая пленка — это активная среда, «накачиваемая» энергией за счет гравитационных сил и всегда покрытая волнами: синусоидальными, переходящими в трехмерное беспорядочное движение, а затем — в ударные волны, покрытые сетью вторичных мелких капиллярных волн, дополнительно интенсифицирующих процессы в пленочном слое. Поэтому теплоотдача к стекающей пленке должна быть существенно выше по сравнению с процессами, протекающими в большом объеме

или в полностью заполненных каналах. Очевидно, что аналитическое описание процессов пленочного обтекания ледовых поверхностей с фазовым переходом на границе раздела фаз чрезвычайно сложно. Однако и экспериментальные исследования таких процессов были найдены только в работе [14]. Представленные в ней результаты позволяют предположить, что переход к пленочному теплосъему в льдоаккумуляторах позволит значительно интенсифицировать процесс теплообмена по сравнению с традиционными аккумуляторами холода с объемным плавлением льда [15].

Цель экспериментальных исследований

Целью проводимых экспериментов являлось исследование процессов тепломассообмена при пленочном обтекании ледовых структур с фазовым переходом на границе раздела для создания теплообменных аппаратов нового поколения с высокой интенсивностью теплоотвода, сопрягаемой с графиком действующей тепловой нагрузки.

Объекты и методы исследований

Для проведения экспериментальных исследований был спроектирован и создан многофункциональный экспериментальный стенд и опытный образец пленочного теплообменного аппарата (ПТА), позволяющий исследовать процессы тепломассообмена, как при пленочном, так и объемном плавлении льда в широком диапазоне плотностей орошения и температур подаваемой на охлаждение жидкости.

ПТА был изготовлен из медных трубок и состоял из трех соединенных параллельно вертикальных змее-

виковых секций (по три горизонтальные трубки в секции). Длина теплообменного участка трубки составляла ~520 мм с внешним диаметром 16 мм без учета намораживаемого льда. Аппарат подключался к холодильной установке и размещался в прозрачной емкости для возможности визуального наблюдения за процессами намораживания и плавления. Подача охлаждаемой воды производилась через коллектор с форсунками. Коллектор располагался над центральной секцией аппарата и обеспечивал равномерное распыление воды над секциями теплообменника. Для минимизации уноса охлаждаемой воды на продольных стенках емкости установлены отбойники, возвращающие воду к центру горизонтальных участков змеевиковых секций. Оценка толщины намораживаемого льда производилась с помощью специально изготовленных скоб, а суммарное количество намороженного льда оценивалось разностным методом по объемам воды, залитой в начале опыта, и слитой после окончания намораживания при достижении толщины льда 18 мм на трубках секций.

Схема и внешний вид стенда представлены на рис. 1 и 2.

Исследования проводились в два этапа. Для более точного определения характеристик тепломассообмена при пленочном обтекании на первом этапе эксперименты проводились на единичной секции ПТА (рис. 3, а). В этом случае термодпары устанавливались непосредственно над каждой трубкой и сливе с нее, а с целью минимизации эффекта свободного пролета воды над секцией был установлен щелевой распределитель (поз. 1). На втором этапе определялась интенсивность теплосъема теплообменного аппарата в целом (рис. 3, б), которая была несколь-

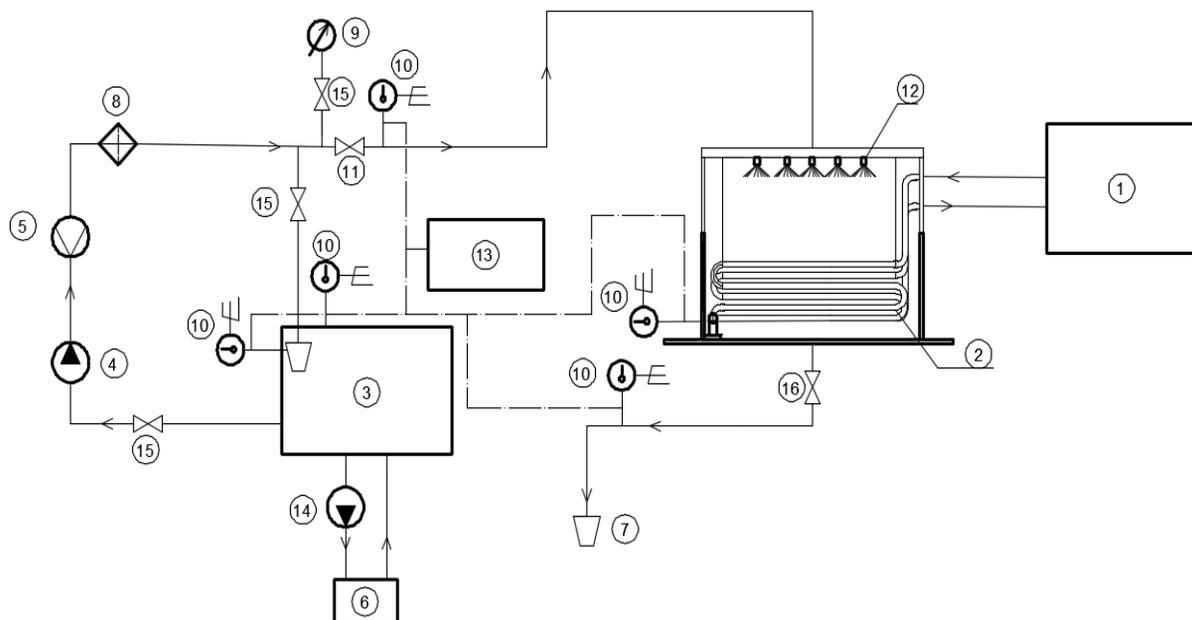


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — компрессорно-конденсаторный блок; 2 — льдоаккумулятор; 3 — бак накопитель; 4 — насос с частотным преобразователем; 5 — ротаметр; 6 — нагреватель; 7 — мерная емкость; 8 — фильтр; 9 — манометр; 10 — термометр электронный; 11 — регулирующий вентиль; 12 — форсуночный распылитель; 13 — регистратор; 14 — погружной насос; 15 — запорный вентиль; 16 — сливной вентиль

Fig. 1. Experimental unit: 1 — compressor-condensing unit; 2 — ice bank; 3 — accumulator tank; 4 — variable speed pump; 5 — rotameter; 6 — heater; 7 — gauging tank; 8 — filter; 9 — manometer; 10 — electronic thermometer; 11 — regulating valve; 12 — spray atomizer; 13 — recorder; 14 — immersion pump; 15 — shut-off valve; 16 — drain valve

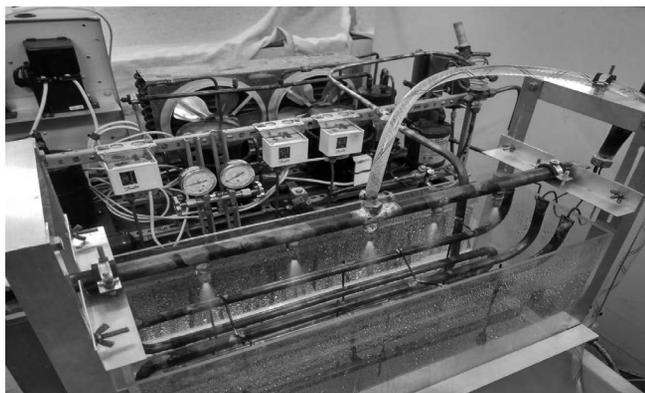


Рис. 2. Внешний вид опытного теплообменного аппарата
Fig. 2. Experimental heat-exchanger

ко ниже в силу влияния свободного пролета воды и эффекта смешения в нижней зоне аппарата.

Эксперименты по исследованию пленочного механизма тепломассообмена на единичной секции проводились в соответствии с методом покоординатного спуска: для фиксированного расхода проводились эксперименты на трех температурных уровнях подаваемой воды (20, 40 и 60 °С), далее расход менялся. С целью повышения достоверности и воспроизводимости получаемых данных для каждой пары значений расхода и температуры проведено по 7 экспериментов.

На основании полученных результатов были:

- построены графики изменения температуры охлаждаемой воды в процессе разрядки аккумулятора для всех исследованных режимов обтекания для единичной секции и для ПТА с объемным и пленочным плавлением в целом;

- рассчитаны значения удельного теплосъема для единичной секции и пленочного ПТА в целом, в зависимости от объемной плотности орошения, и проведено сравнение по данному показателю с современными пластинчатыми теплообменниками;

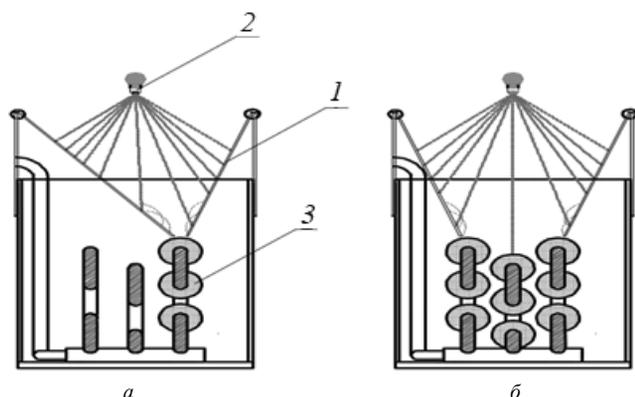


Рис. 3. Распределение потоков при исследовании:
а — на одной секции; б — теплообменного аппарата в целом;
1 — щелевой распределитель; 2 — форсунки;
3 — секция с намороженным льдом

Fig. 3. Flow distribution during the experiment:
а — within one section; б — of the whole heat-exchanger;
1 — slot-type distributor; 2 — atomizers;
3 — section with constructed ice

- рассчитаны значения коэффициента теплоотдачи, приведенного к единице теплопередающей поверхности аппарата.

Последовательность проведения экспериментов

Перед началом проведения экспериментов была проведена настройка работы форсунок и выбрана высота их расположения для обеспечения равномерного распыления воды на секции.

Процесс зарядки аккумулятора.

Емкость со змеевиками заполнялась водой до определенной отметки, определяющей количество воды в начале опыта. Включалась холодильная установка и производилось намораживание льда. В процессе намораживания в баке-накопителе проводился нагрев воды, используемой для имитации производственного потока. После намораживания необходимой толщины льда холодильную установку отключали и оценивали общее количество намороженной массы.

Процесс разрядки аккумулятора с объемным плавлением.

В льдоаккумулятор через форсунки подавалась охлаждаемая вода. Расход воды на подаче соответствовал расходу на сливе из аппарата, чтобы уровень воды в емкости оставался неизменным.

Процесс разрядки аккумулятора с пленочным плавлением.

Перед разрядкой весь объем воды из емкости сливался в нижний бак, и охлаждаемая вода распылялась из форсунок непосредственно на трубки со льдом при полностью открытом сливном вентиле.

Процесс изменения температуры воды на входе и выходе аппарата, а также после контакта со льдом, намороженным на каждой трубке змеевика (при испытаниях единичной секции), фиксировался с использованием регистратора. Расход воды контролировался по показаниям ротаметра на входе в форсуночный коллектор.

Методика обработки результатов

Процесс плавления льда при пленочном режиме обтекания характеризуется высокой степенью нестационарности. В связи с этим, при определении основных характеристик, процесс разрядки аккумулятора разбивался на элементарные отрезки по времени, в течение которых режимные параметры считались неизменными и равными средним значениям за период. В дальнейшем, на основе полученных данных, были определены интегральные характеристики ПТА.

Тепловая нагрузка определялась по тепловому балансу элементарного отрезка времени. Количество теплоты, отводимой за элементарный период времени, определялось по соотношению:

$$\frac{m_{в_i} c_{p_i} (t_{вх_i} - t_{вых_i})}{\Delta\tau} = \frac{r \cdot m_{пл_i} + m_{пл_i} c_{p_i} (t_{вых_i} - t_0)}{\Delta\tau} \quad (1)$$

где $m_{в_i}$ — масса воды, поступившей на охлаждение в льдоаккумулятор, за элементарный отрезок времени, кг; $\Delta\tau$ — элементарный отрезок времени, с; r — скрытая теплота



Рис. 4. График изменения температуры охлажденной воды на выходе из ПТА для пленочного и объемного плавления
 Fig. 4. The changes of the cooled water temperature at the film-type heat exchanger outlet for film and volumetric melting

фазового перехода льда, $r=335 \text{ кДж/кг}$; $m_{пл}$ — масса расплавленного льда на трубках льдоаккумулятора за элементарный отрезок времени, кг; t_0 — температура плавления льда, $t_0=0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тепловая нагрузка, отводимая отдельной трубкой при испытании секции ПТА, определялась по показаниям датчиков температуры, установленных в потоках поступающей и стекающей на нее воды.

Определение коэффициента теплоотдачи, приведенного к единице площади теплообменного аппарата, производилось на элементарном отрезке времени по следующему соотношению:

$$\alpha_{пр} = \frac{Q_i}{(t_{в_i} - t_л)F}, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)} \quad (2)$$

где Q_i — тепловая нагрузка, Вт; $t_{в_i}$ — осредненная температура воды, омывающей ледовую поверхность отдельной трубки за элементарный отрезок времени, $^\circ\text{C}$; $t_л$ — температура плавления льда, $0 \text{ }^\circ\text{C}$; F — площадь поверхности отдельной трубки ПТА, м^2 .

Согласно определению, объемная плотность орошения для каждого значения расхода находилась по следующему соотношению:

$$\Gamma_v = \frac{G}{\rho \cdot \Pi \cdot 2}, \text{ м}^2/\text{с} \quad (3)$$

где G — массовый расход воды, кг/с; ρ — плотность воды, кг/м³; Π — периметр активного орошения, м.

Результаты проведенных экспериментов

На рис. 4 представлен график температуры для ПТА в пленочном и объемном режимах плавления для температуры подаваемой воды $40 \text{ }^\circ\text{C}$, характерной для объектов молочной промышленности.

Можно видеть, что температура воды на выходе из ПТА при пленочном орошении существенно ниже, чем при объемном плавлении льда. Это объясняется существенно большей интенсивностью теплоотвода при плёночном обтекании и отсутствием эффекта смешения воды, подаваемой на охлаждение и находящейся в емкости. Данный график не в полной мере отражают преимущества пленочного обтекания с фазовым переходом,

так как при форсуночном распылении часть воды не падает на ледовую поверхность (свободный пролет) и температура воды на выходе из аппарата представляет собой температуру смешения обеих составляющих и выше минимально возможной.

На рис. 5, 6 представлены полученные зависимости температур и тепловой нагрузки от времени для нескольких исследованных режимов.

Для прецизионного определения теплоты, отводимой каждой из 3-х трубок секции ПТА, под каждой из них было установлено по 2 датчика, позволяющих при обработке результатов рассчитывать вклад отдельной трубки в общую тепловую нагрузку секции.

Как видно из представленных графиков, тепловая нагрузка, снимаемая одной секцией, достигает $25\,000 \text{ Вт}$, что более, чем на порядок превышает количества теплоты, отводимой аналогичной секцией в оросительном режиме без фазового перехода и в режиме с объемным плавлением. Необходимо отметить, что повышение температуры входящей воды не приводит к соответствующему росту температуры на выходе, как это происходит в объёмном аккумуляторе в результате перемешивания слоев, а позволяет поддерживать требуемый уровень охлаждения за счет возрастания интенсивности теплосъема в пленочном режиме орошения. Особенностью пленочного теплообменного аппарата является последовательное перераспределение нагрузки от верхней трубки к нижней (рис. 7), тем самым обеспечивается поддержание необходимой интенсивности теплоотвода, вплоть до минимальных значений оставшейся площади теплообменной поверхности льда.

Иными словами, при малом расходе для охлаждения воды до уровня $3\text{--}5 \text{ }^\circ\text{C}$ достаточно поверхности одной трубки со льдом, и по мере плавления льда на ней тепловая нагрузка смещается ниже, к следующей трубке. Важным параметром для пленочного льдоаккумулятора является плотность орошения Γ_v — отношение объемного расхода к периметру орошаемой поверхности, с учетом растекания на одну или две стороны. В отличие от всех других теплообменных аппаратов, реализация пленочного режима плавления при высоких значениях Γ_v позволяет использовать аккумулированный льдом холод с ин-

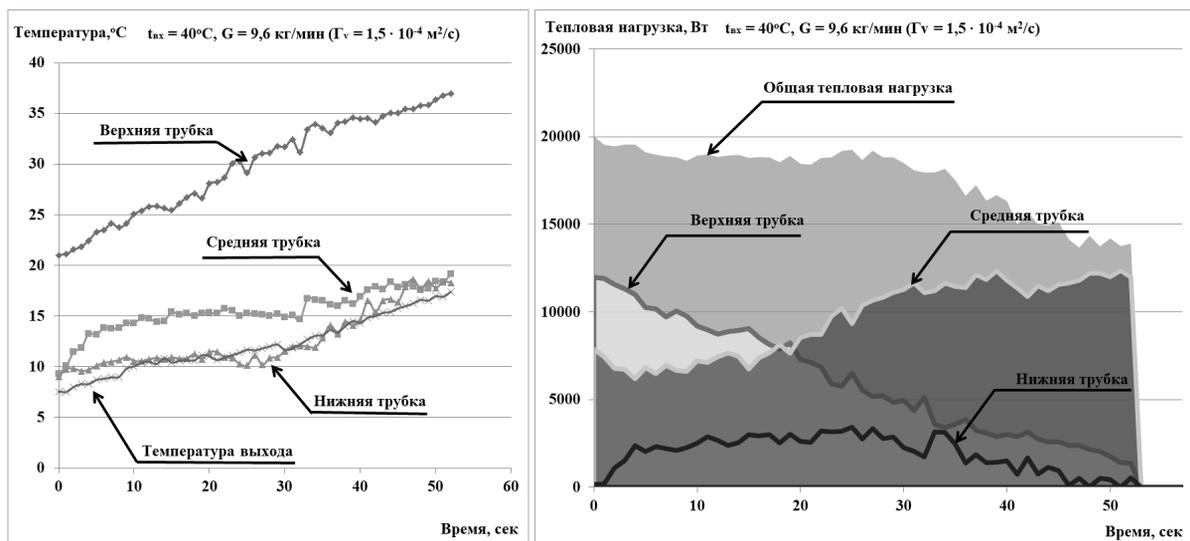


Рис. 5. График изменения температуры охлаждаемой воды и тепловой нагрузки аппарата при исследовании единичной секции ПТА
 Fig. 5. The changes of the cooled water temperature and the heat load of the unit when analyzing single section of film-type heat exchanger

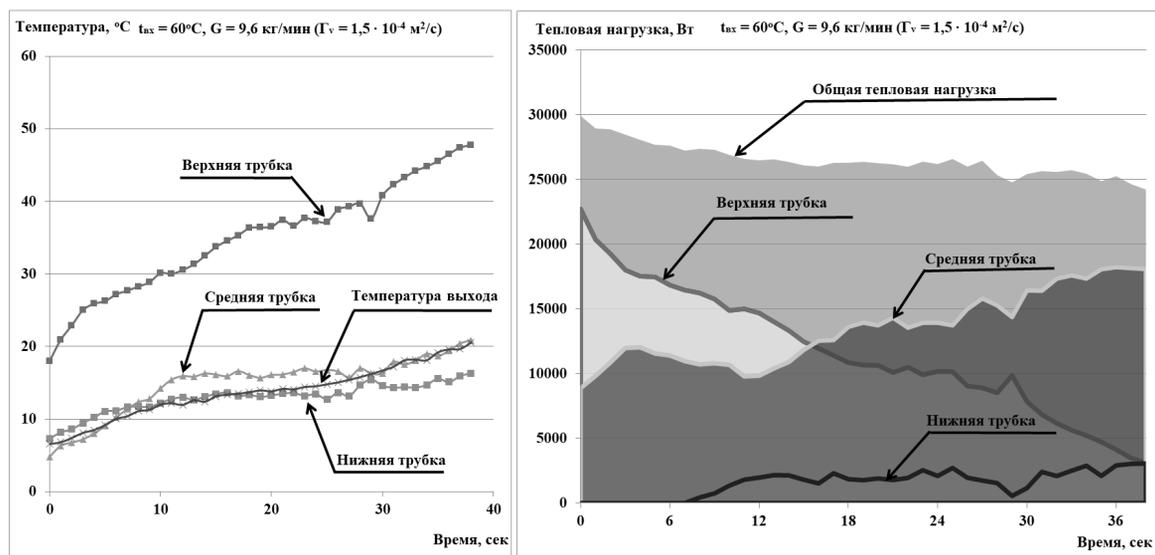


Рис. 6. График изменения температуры охлаждаемой воды и тепловой нагрузки аппарата при исследовании единичной секции ПТА
 Fig. 6. The changes of the cooled water temperature and the heat load of the unit when analyzing single section of film-type heat exchanger

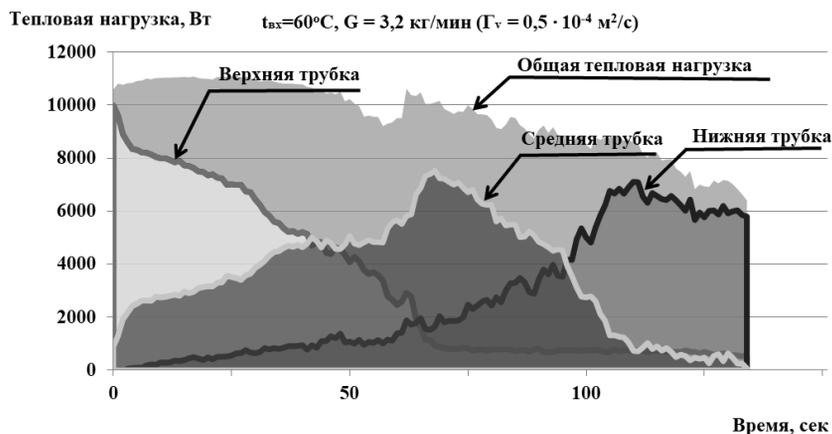


Рис. 7. График изменения тепловой нагрузки аппарата при исследовании единичной секции ПТА
 Fig. 7. The changes of the heat load of the unit when analyzing single section of film-type heat exchanger

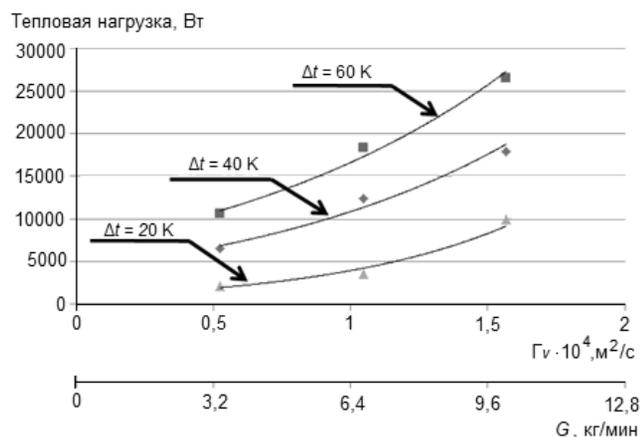


Рис. 8. Зависимость тепловой нагрузки от объемной плотности орошения для единичной секции ПТА

Fig. 8. Dependency of the heat load on the volumetric irrigation density for single section of film-type heat exchanger

тенсивностью, определяемой действующей тепловой нагрузкой, а не располагаемой теплообменной поверхностью.

По результатам проведенных исследований, для единичной секции теплообменника получены зависимости отводимой тепловой нагрузки от плотности орошения и от температурного градиента Δt между льдом, намороженным на трубках льдоаккумулятора, и подаваемой на охлаждение водой (рис. 8).

Можно видеть, что в оптимальном теплообменном аппарате, состоящем из 3-х секций, при отсутствии эффекта свободного пролета распыляемой жидкости отводимая тепловая нагрузка может достигать 75 000 Вт, что в расчете на один квадратный метр теплообменной поверхности трубок льдоаккумулятора (удельная тепловая нагрузка) при температуре подаваемой воды 60 градусов и расходе 9,6 кг/мин составляет 320 000 Вт/м². Это значение в среднем на порядок превосходит аналогичные значения для современных пластинчатых теплообменных аппаратов ведущих производителей (Alfa Laval, Funke, Ридан), которые по данным, полученным из открытых источников, находятся в диапазоне от 12 000 до 65 000 Вт/м².

Одним из важнейших показателей эффективности теплообменного аппарата является коэффициент теплоотдачи. Для льдоаккумуляторов определение коэффициента теплоотдачи представляет собой сложно математически формализуемую задачу в силу следующих причин:

- площадь поверхности теплообмена непрерывно нелинейно изменяется в процессе плавления льда;
- расход подаваемой жидкости (и величина G_v) увеличивается по мере обтекания ледовой поверхности вследствие фазового перехода на границе раздела.

Поэтому значение коэффициента теплоотдачи представлено в виде приведенного к поверхности теплообме-

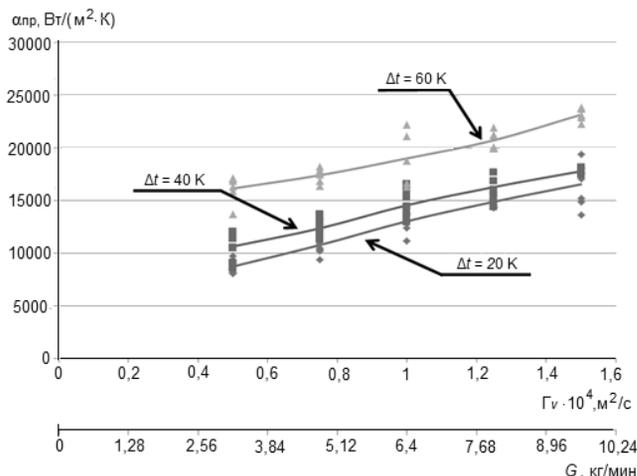


Рис. 9. Зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи от плотности орошения

Fig. 9. Dependency of the reduced heat transfer coefficient on the irrigation density

на трубки. На рис. 9 показана зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи от плотности орошения в процессе плавления льда.

В отличие от теплообменных аппаратов с фиксированной теплопередающей поверхностью, в льдоаккумуляторе с пленочным обтеканием орошаемой поверхности начальный градиент температур опосредованно (через число Рейнольдса стекающей пленки) влияет на коэффициент теплоотдачи. При больших Δt между льдом и водой выше интенсивность плавления, образующихся волновых процессов в стекающей пленке, и, соответственно, выше число Re. Как видно из полученных графиков, интенсивность теплообмена в пленочном льдоаккумуляторе более, чем на порядок, выше чем в объемном — в аккумуляторах с плавлением в объеме жидкости коэффициент теплоотдачи не превышает 300~500 Вт/(м²·К)

Заключение

Экспериментально доказано преимущество пленочного льдоаккумулятора, по сравнению с объемным. В связи с этим:

- получена экспериментальная зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи для пленочного льдоаккумулятора от плотности орошения;
- в исследуемом диапазоне значения коэффициента теплоотдачи достигают ~22 000 Вт/(м²·К), приведенные к поверхности теплообменного аппарата.
- удельная тепловая в исследованном интервале режимных параметров может нагрузка ПТА достигать 320 000 Вт/м², что значительно превышает аналогичную величину для пластинчатых теплообменников, составляющую по данным открытых источников от 12 000 до 65 000 Вт/м².

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00120.

Литература

References

1. *Chi-Chun Lo, Shang-Ho.* Ice storage Air-Conditioning system simulation with dynamic electricity pricing: A Demand response study // *Energies*. 2016. No 9. P. 113. doi: 10.3390/en9020113
2. *Бабакин Б. С., Кузьмина И. А., Бабакин С. Б. и др.* Применение аккумуляторов холода при приемке молока на предприятии ОАО «Бишкексут» // *Переработка молока*. 2020. № 8 (250). С. 86–87
3. *Бабакин Б. С., Воронин М. И., Сучков А. Н., Айтикеев Р. Б.* Исследование тепловой нагрузки в промышленных аккумуляторах холода // *Казахстан-Холод 2019, Алматы, 20–21 февраля 2019 г. Алматы: АТУ, 2019. С. 26–28.*
4. *Коришунов, А. Б., Коришунов Б. П.* Аккумуляционные установки для охлаждения молока на фермах // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2019. № 3 (35). С. 114–117.
5. *Victor Torres-Toledo et al.* Performance characterization of a small milk cooling system with ice storage for PV applications // *International Journal of Refrigeration*. 2015. Vol. 60. pp. 81–91.
6. *Rodrigo A. Jordan et al.* Modeling and testing of an ice bank for milk cooling after milking // *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*. 2018. Vol. 38. No.4. pp. 510–517. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n4 p510-517/2018>
7. *Каушар М.* Охлаждение пива на заводах. // *Пиво и напитки*. 2004. № 4. С. 28–30.
8. *Капица П. Л., Капица С. П.* Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1949. Т. 19, № 2. С. 105–120.
9. *Воронцов Е. Г., Тананайко Ю. М.* Теплообмен в жидкостных пленках. Киев. Техника, 1972. 196 С.
10. *Семилет З. В.* Оросительные теплообменники химических производств. Киев. Mashgiz, 1961. 112 С.
11. *Риферт В. Г., Андреев Б. В.* Обобщение данных по конвективному теплообмену и кипению в пленке, стекающей по горизонтальной трубе. Рига. Кипение и конденсация, 1981. С. 24–31.
12. *Павленко А. Н., Печеркин Н. И., Володин О. А.* Теплообмен и кризисные явления при кипении в пленках смесей фреонов, стекающих по оребренной трубе // *Теплофизика и аэромеханика*. 2012. Т. 19. № 2.
13. *Hani H. Sait, Hussain A., Selim M. A.* Experimental Investigation on Freezing of Water Falling Film on Vertical Bank of Cold Horizontal Tube. // *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2012. Vol. 4.
14. *Гончарова Г. Ю., Виноградов В. Н., Елуфимова С. М.* Определение характеристик пленочных течений с плавлением поверхности в системах с льдоаккумуляцией // *Системы хладоснабжения с аккумуляторами холода: сборник научных трудов НПО «Агрохолодпром»*. 1988. С. 3–14.
15. Исследовать влияние тепломассообменных процессов на микроструктуру, физико-химические, биохимические и микробиологические показатели сырья и продукции животного и растительного происхождения в охлажденном, замороженном и размороженном состоянии при холодильной обработке, хранении и транспортировании с целью ресурсосбережения и сохранения качества: отчет о НИР (промежуточ.)/ ВНИХИ — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН; рук. Творогова А. А.; исполн. Дибирсулаев М. А., Корешков В. Н, Грызунов А. А., и др. Москва, 2020. 208 с.
1. *Chi-Chun Lo, Shang-Ho.* Ice storage Air-Conditioning system simulation with dynamic electricity pricing: A Demand response study // *Energies*. 2016. No 9. P. 113. doi: 10.3390/en9020113
2. *Babakin B. S., Kuzmina I. A., Babakin S. B. et al.* Application of ice banks during receiving of milk at the enterprise OJSC «Bishkeksut». *Processing of milk*. 2020. No. 8 (250). P. 86–87. (in Russian)
3. *Babakin B. S., Voronin M. I., Suchkov A. N., Aitikeev R. B.* Research of thermal load in industrial ice banks. *Kazakhstan-Cold 2019, Almaty, February 20–21, 2019. Almaty: ATU, 2019. P. 26–28. (in Russian)*
4. *Korshunov A. B., Korshunov B. P.* Cold storage units for cooling milk on farms. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Livestock Mechanization*. 2019. No. 3 (35). P. 114–117. (in Russian)
5. *Victor Torres-Toledo et al.* Performance characterization of a small milk cooling system with ice storage for PV applications. *International Journal of Refrigeration*. 2015. Vol. 60. pp. 81–91.
6. *Rodrigo A. Jordan et al.* Modeling and testing of an ice bank for milk cooling after milking. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*. 2018. Vol. 38. No. 4. PP. 510–517. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n4 p510-517/2018>
7. *Kashpar M.* Cooling beer at factories. *Beer and drinks*. 2004. No. 4. P. 28–30. (in Russian)
8. *Kapitsa P. L., Kapitsa S. P.* Wave flow of thin layers of viscous fluid. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1949. vol. 19, No. 2. P. 105–120. (in Russian)
9. *Vorontsov E. G., Tananaiko Yu. M.* Heat transfer in liquid films. Kiev. Technique, 1972. 196 P. (in Russian)
10. *Semilet Z. V.* Irrigation heat exchangers for chemical production. Kiev. Mashgiz, 1961. 112 P. (in Russian)
11. *Rifert V. G., Andreev B. V.* Generalization of data on convective heat transfer and boiling in a film flowing down a horizontal pipe. Riga. Sat. Boiling and condensation, 1981, P. 24–31. (in Russian)
12. *Pavlenko A. N., Pecherkin N. I., Volodin O. A.* Heat transfer and crisis phenomena during boiling in films of freon mixtures flowing down a finned tube. *Thermophysics and aeromechanics*. 2012. vol. 19, no. 2. (in Russian)
13. *Hani H. Sait, Hussain A., Selim M. A.* Experimental Investigation on Freezing of Water Falling Film on Vertical Bank of Cold Horizontal Tube. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2012. Vol. 4.
14. *Goncharova G. Yu., V. N. Vinogradov, Elufimova SM,* Determination of the characteristics of film flows with surface melting in systems with ice production. *Refrigeration systems with ice banks: collection of scientific works of NPO Agroholodprom*. 1988. P. 3–14. (in Russian)
15. Investigate the effect of heat and mass transfer processes on the microstructure, physicochemical, biochemical and microbiological indicators of raw materials and products of animal and plant origin in a chilled, frozen and thawed state during refrigeration, storage and transportation in order to save resources and preserve quality: research report (intermediate.) / VNIHI — branch of the Federal Research Center of Food Systems named after VM Gorbatoev «RAS; hands. A. A. Tvorogova; executive Dibirsulaev M. A., Koreshkov V. N., Gryzunov A. A., et al. Moscow, 2020. 208 P. (in Russian)

Сведения об авторах**Гончарова Галина Юрьевна**

Д.т. н., профессор, кафедра «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва, Лефортовская наб., 1, galinagoncharova@mail.ru, ORCID 0000-0003-4270-819X, РИНЦ ID 678637, Scopus ID 57195304408

Пытченко Виктор Пантелеевич

Ведущий инженер лаборатории систем хладоснабжения, ВНИИХИ — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, 127422, Москва, ул. Костякова, 12, hladosnab@mail.ru, ORCID 0000-0002-5822-036, РИНЦ ID 670820, Scopus ID 57193809799

Борзов Сергей Сергеевич

М.н.с. лаборатории систем хладоснабжения, ВНИИХИ — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, 127422, Москва, ул. Костякова, 12, donsб@bk.ru, ORCID 0000-0003-4431-1815, РИНЦ ID 946064

Борщев Георгий Владимирович

М.н.с. лаборатории систем хладоснабжения, ВНИИХИ — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, 127422, Москва, ул. Костякова, 12, razorleaf.619@gmail.com, ORCID 0000-0002-8878-1571, РИНЦ ID 988853

Information about authors**Goncharova Galina Yu.**

D. Sc., Professor, Department of Refrigeration, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Lefortovskaya Emb., 1, galinagoncharova@mail.ru, ORCID 0000-0003-4270-819X, Autor ID 678637, Scopus ID 57195304408

Pytchenko Victor P.

Lead engineer of laboratory of refrigeration systems, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, 127422, Moscow, Kostyakova str., 12, hladosnab@mail.ru, ORCID 0000-0002-5822-036, Autor ID 670820, Scopus ID: 57193809799

Borzov Sergey S.

Junior scientist of laboratory of refrigeration systems, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, 127422, Moscow, Kostyakova str., 12, donsб@bk.ru, ORCID- 0000-0003-4431-1815, Autor ID 946064

Borshev Georgiy V.

Junior scientist of laboratory of refrigeration systems, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, 127422, Moscow, Kostyakova str., 12, razorleaf.619@gmail.com, ORCID 0000-0002-8878-1571, Autor ID 988853

АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ ЮГА РОССИИ**ВЫСТАВКИ ИНТЕРАГРОМАШ
АГРОТЕХНОЛОГИИ****02–04 марта 2022 года**

АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ ЮГА РОССИИ – это специализированный форум, направленный на демонстрацию сельскохозяйственной техники, оборудования и материалов для производства и переработки сельхозпродукции.

РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ «ИНТЕРАГРОМАШ»:

- Сельскохозяйственная техника и запчасти
- Автоматизация

РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ «АГРОТЕХНОЛОГИИ»:

- Растениеводство
- Оборудование для хранения и переработки сельхозпродукции
- Животноводство
- Оборудование для животноводства
- Услуги для АПК

Организатор:

КВЦ «ДонЭкспоцентр»
тел.: (863) 268-77-68

Место проведения:

КВЦ «ДонЭкспоцентр»
г. Ростов-на-Дону, пр. М. Нагибина, 30

Руководитель проекта – Жадан Ольга

тел.: 8-863-268-77-86
моб: 8-918-544-41-20

e-mail: master@donexpocentre.ru

<http://www.interagromash.net/index.html>