

УДК 621.58

Теоретическое обоснование процесса охлаждения жидкости замороженными телами с развитой поверхностью

Д-р техн. наук **Б. С. БАБАКИН**¹, канд. техн. наук **М. И. ВОРОНИН**²

Московский государственный университет пищевых производств

Д-р техн. наук **Е. В. СЕМЕНОВ**³

Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского

Канд. техн. наук **С. Б. БАБАКИН**¹, канд. техн. наук **А. Г. БЕЛОЗЕРОВ**⁴,

А. Н. СУЧКОВ⁵

ВНИИХИ — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН

¹holod@mgupp.ru, ²aspirantpp@yandex.ru, ³sem-post@mail.ru,

⁴a.belozerov@fnfps.ru, ⁵alexandr-truba@yandex.ru

Рассматривается проблема охлаждения жидкостной системы с помощью скопления в ней замороженных шаров, которая формулируется и решается в рамках классической линейной краевой задачи для уравнения стационарного конвективного теплопереноса. В области реальных значений параметров процесса, по предмету исследования, полученное решение используется при реализации численного эксперимента по моделированию протекания процесса охлаждения потока жидкости (хладоносителем) системой шаров, заполненных эвтектическим раствором. Расчетным путем, на основе таких факторов как температура, объемная концентрация шаров в двухфазной жидкостной системе, период обработки жидкости холодом и др. обоснована эффективность использования предложенного способа для охлаждения жидкости. В области реальных значений параметров рассматриваемого процесса, оценка проведенного количественного анализа выявляет согласие полученных результатов расчета процесса охлаждения жидкости с физическим смыслом исследуемого явления.

Ключевые слова: жидкостная система, скопление шаров, поток, теплопередача, краевая задача, эвтектический раствор.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 11.01.2019, принята к печати 09.04.2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-2-95-101

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования:

Бабакин Б. С., Воронин М. И., Семенов Е. В., Бабакин С. Б., Белозеров А. Г., Сучков А. Н. Теоретическое обоснование процесса охлаждения жидкости замороженными телами с развитой поверхностью // Вестник Международной академии холода. 2019. № 2. С. 98–101.

Substantiation of liquid cooling by introducing the frozen balls with developed surface

D. Sc. **B. S. BABAKIN**¹, Ph. D. **M. I. VORONIN**²

Moscow State University of Food Production

D. Sc. **E. V. SEMENOV**³

Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky

Ph. D. **S. B. BABAKIN**¹, Ph. D. **A. G. BELOZEROV**⁴, **A. N. SUCHKOV**⁵

All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V. M. Gorbатов Research Center for Food Systems of Russian Academy of Science

¹holod@mgupp.ru, ²aspirantpp@yandex.ru, ³sem-post@mail.ru, ⁴a.belozerov@fnfps.ru, ⁵alexandr-truba@yandex.ru

The problem of cooling a liquid system by introducing the cluster of frozen balls is formulated and solved within the framework of classical linear boundary value problem for the equation of a stationary convective heat transfer. In the area of actual values of the process parameters for the object of the study the solution obtained is used as the basis for numerical experiment in modelling cooling liquid flow by a system balls. Calculated on the basis of the factors such as temperature, volumetric concentration of balls in a two-phase liquid system, the period of liquid processing by cold and other parameters, the efficiency of the proposed method for liquid cooling is substantiated. In area of actual values of the process parameters in question the results of quantitative analysis demonstrate the obtained results of calculations for liquid cooling process to fit the physical meaning of the phenomenon investigated.

Keywords: liquid system, cluster of balloons, flow, heat transfer, boundary value problem, eutectic solution.

Article info:

Received 11/01/2019, accepted 09/04/2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-2-95-101

Article in Russian

For citation:Babakin B. S., Voronin M. I., Semenov E. V., Babakin S. B., Belozеров A. G., Suchkov A. N. Substantiation of liquid cooling by introducing the frozen balls with developed surface. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2019. No 2. p. 95–101.**Введение**

Одним из направлений интенсификации производственных процессов, сохранения качественных показателей обрабатываемого сырья и готовой продукции путем их ускоренного охлаждения является использование энергоберегающего холодильного оборудования. Однако до сих пор процесс охлаждения жидкости является наименее изученной стадией обработки ее холодом, а используемые для этой цели технические средства отвечают современным требованиям в недостаточной степени. В настоящее время одним из перспективных направлений совершенствования техники и технологии ускоренного снижения температуры жидкости можно отнести интродукцию в нее охлажденных до достаточно низких температур тел, в том числе, и шарообразной формы. Данный технологический способ применяют, например, при охлаждении расплавов в металлургической промышленности. В свою очередь, результаты проведенных в пищевой отрасли промышленности исследований по охлаждению жидкости замороженными шарами показали преимущества этого способа перед другими способами подготовки воды, обеспечивая высокую интенсивность процесса, снижение энергозатрат.

Большое значение для интенсификации производственных процессов и сохранения качества сырья является возможно быстрое снижение температуры обрабатываемой жидкостной среды. Так, в перерабатывающих производствах и других отраслях народного хозяйства охлаждение сырья и готовой продукции биологического происхождения способствует сохранению их биологических свойств, предотвращает размножение микрофлоры в продукте [1–3].

В качестве одного из способов понижения температуры жидкостной среды используется способ, когда, жидкостную среду заполняют замороженными телами, обычно шарообразной формы [4–7].

Эту технологию целесообразно использовать в холодильной технике, если для охлаждения жидкости применять заполненные эвтектическим замороженным раствором шары.

Проведенными в последнее время сотрудниками МГУПП и МГУТУ им. К. Г. Разумовского теоретически и опытными исследованиями, на примере охлаждения воды в емкости с замороженными шарами, выявлены преимущества данного способа перед другими способами, обеспечивая высокую интенсивность процесса и снижение энергозатрат.

С целью ускорения реализации процесса теплопередачи, используя технологию обогащения рабочего объема с охлаждаемой жидкостью порцией замороженных тел, очевидно, данный процесс целесообразно проводить в режиме потока хладоносителя через емкость

с замороженными герметичными сферическими емкостями.

Однако нужно отметить отсутствие в рассматриваемой проблеме теоретически обоснованной расчетной методики по прогнозированию управлению процессом теплопереноса, в том числе, и в потоке, когда в гетерогенной жидкостной системе “вода — замороженные шары” развивается процесс охлаждения.

В данной работе, с целью обоснования интенсификации процесса теплообмена между замороженными шарами и охлаждаемой жидкостью, с позиций законов сохранения массы и энергии, приводятся результаты аналитического и численного исследования задачи об охлаждении движущегося, через заполненный замороженными шарами аккумулятор холода, потока хладоносителя.

Постановка задачи моделирования

Пусть в некоторую емкость с эвтектически замороженными шарами, в стационарном режиме, с невысокой расходной скоростью v_0 , поступает поток жидкости (например, вода) с целью ее охлаждения.

Условно, в рамках используемой в гидродинамике грунтовых вод терминологии, выбранную модель кинетики двухфазной жидкостной системы можно трактовать как фильтрационное течение жидкости сквозь образованную системой шаров пористую среду [8].

При этом предполагается, что шары (каждый объемом много меньше объема емкости), статистически равномерно распределены в ограниченном длиной h и радиусом R цилиндре, включающем жидкую среду (воду) и твердую (шары) фазы рабочем объеме данной емкости.

В дальнейшем, чтобы упростить количественный анализ процесса теплоотвода от жидкости к шарам, занятый жидкостью поровый объем (просветность) заменяют, с сохранением значения порозности [8], совокупностью цилиндрических, с осью z , параллельной оси емкости, трубок (капилляров), каждая длиной h и приведенным радиусом r_0 (рис. 1) [9].

Для выбранной геометрической модели жидкостного объема вводят обозначения: $d_{ш}$ — диаметр шара, B — поверхностная пористость (просветность) среды ($B < 1$), численно равная отношению объема пустот (пор) в среде к ее объему [9].

Тогда, учитывая, что объемная и поверхностная порозности количественно совпадают [9], исходя из определения порозности, приближенно, может быть записано соотношение [10] $\pi r_0^2 / B = \pi d_{ш}^2 / [4(1 - B)]$, откуда вытекает зависимость

$$r_0 = 0,5d[B/(1 - B)]^{1/2}, \quad (1)$$

здесь и ниже, по тексту, принято, $r_0 = r_0(d, B)$, $d = d_{ш}$ — диаметр шара.

Таким образом, проблема расчета поля температуры в хладоносителе сводится к количественному анализу теплового режима в жидкостном потоке внутри капилляра.

Решение задачи

В допущении осесимметричности характера протекания процесса передачи теплоты от жидкости к стенке канала количественное моделирование процесса проводят в связанной с данным каналом цилиндрической системе координат, в его меридиональном сечении гОz (рис. 1).

Для принятой, таким образом описывающей кинетику потока в рабочем объеме емкости, имитационной модели в качестве основного дифференциального уравнения по теплопередаче, выбирают, отнесенное к цилиндрическим координатам, уравнение стационарной конвективной теплопроводности [11]:

$$\frac{\partial(tu_z)}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right), \tag{2}$$

где r, z — радиальная и осевая координата, соответственно; t — температура воды; u_z — осевая скорость движения жидкости в капилляре; $a = \lambda / (c\rho)$, a — коэффициент температуропроводности воды; λ и c — коэффициент теплопроводности и удельной теплоемкости, соответственно; ρ — плотность воды.

С небольшой погрешностью, в реальных условиях, скорость u_z жидкости заменяют осредненным значением ее по поперечному сечению канала. Тогда уравнение (2) в упрощенном виде принимает форму

$$\frac{\partial t}{\partial z} = \beta \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right), \tag{3}$$

где β — удельное значение коэффициента температуропроводности в долях вычисляемой в соответствии с (4) осевой скорости u_z

$$\beta = a / u_z, \tag{4}$$

здесь $u_z = v_0 / B$; $v_0 = Q / S$ — расходная скорость жидкости в емкости (скорость фильтрации [9]), $S = \pi R^2$ — площадь поперечного сечения емкости.

Граничное условие по значению температуры на входе в канал

$$t(r, z) = t_0 \text{ при } 0 \leq r \leq r_0, z = 0, \tag{5}$$

где, для простоты, полагают $t_0 = \text{const}$.

Условие симметричности распределения температуры по радиусу канала

$$\partial t / \partial r = 0 \text{ при } r = 0, 0 < z \leq h. \tag{6}$$

Поскольку поток теплоты развивается от жидкости к стенке капилляра (рис. 1), в качестве граничного условия на поверхности данного канала выбирают [12]:

$$H[t(r_0, z) - t_k] - \partial t(r_0, z) / \partial r = 0 \text{ (} 0 < z \leq h \text{)}, \tag{7}$$

где $H = \alpha / \lambda$; α — коэффициент теплоотдачи от капилляра к жидкости; t_k — эвтектическая температура замороженного шара.

Таким образом, как видно, в рамках принятой терминологии в теории теплопередачи [12], согласно выра-

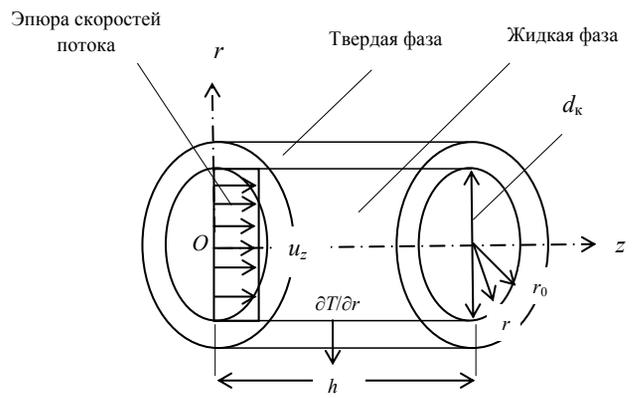


Рис. 1. Схема к расчету процесса охлаждения жидкости замороженными шарами

Fig. 1. Computational scheme of liquid cooling by frozen balls

жениям (5)–(7), получили задачу с граничными условиями третьего рода для дифференциального уравнения (3).

С точки зрения количественного анализа теплового режима в стационарном потоке жидкости внутри капилляра поставленная задача, при условии, что диаметр d_k капилляра много меньше длины h емкости, формально эквивалентна задаче о распределении температуры при неустановившемся режиме в неограниченном цилиндре, причем, в таком случае, роль времени t протекания процесса теплопередачи здесь играет осевая координата z .

Поэтому, адаптированное на краевую задачу (3)–(7), решение записывают в форме [12]:

$$\theta = 1 - \sum_{i=1}^n A_i J_0(v_i r / r_0) \cdot \exp(-v_i^2 \cdot \text{Fo}^*), \tag{8}$$

где θ — приведенная, удельная по разности температуры t_k шара и исходной t_0 температуры хладоносителя, текущая разность температуры $t(d, B, r, z)$ охлаждаемой жидкости и температуры t_0

$$\theta = \theta(d, B, r, z) = (t - t_0) / (t_k - t_0) > 0; \tag{9}$$

$$A_i = 2J_1(v_i) / \{v_i [J_0(v_i)^2 + J_1(v_i)^2]\}; \tag{10}$$

J_0, J_1 — функция Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно; v_n — положительные корни трансцендентного уравнения [12]:

$$J_0(v) / J_1(v) = v / \text{Bi}; \tag{11}$$

$$\text{Bi} = \text{Bi}(\alpha, d, B) = \alpha r_0 / \lambda \text{ — критерий Био}; \tag{12}$$

$$\text{Fo}^* = \text{Fo}^*(z, d, B) = \beta z / r_0^2 \text{ —} \tag{13}$$

модифицированный критерий Фурье, β определяется по уравнению (4), r_0 — по уравнению (1).

Численный эксперимент

Количественное моделирование исследуемого процесса проводилось на базе соотношений (8)–(13), с использованием среды Mathcad [13].

В качестве фиксированных, по всем вариантам расчета, значений параметров процесса принимали: $h = 0,5$; $D = 0,1$ — длина и диаметр емкости соответственно, м; плотность воды $\rho = 10^3$ кг/м³; коэффициент кинематической вязкости $\nu = 10^{-6}$ м²/с; эвтектическая температура

шара $t_k = -10$ °С; коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,58$ Вт/(м·К); коэффициент температуропроводности $a = 13,8 \cdot 10^{-8}$ м²/с [14]; диаметр шара $d = 0,04$ м. Расчет текущей температуры хладоносителя осуществлялся по двум вариантам производительности оборудования (по воде) $Q = 0,6$ л/мин; 1,2 л/мин и двум вариантам исходной температуры воды $t_0 = 40$ °С и $t_0 = 20$ °С. Порозность жидкостной системы полагают $B = 0,4$.

Количество шаров в емкости:

$$N = 1,5D^2h \times (1 - B)/d^3 = 1,5 \times 0,12 \times 0,5 \times 0,6/0,04^3 = 70 \text{ штук.}$$

Рассчитываемая по формуле $v_0 = 4Q/(\pi D^2)$ расходная скорость (скорость фильтрации) при расходе $Q = 0,6$ л/мин составила $v_0 = 4 \times 10^5 / (3,14 \times 0,1^2) = 1,27 \times 10^{-3}$ м/с; скорость жидкости $u_{01} = v_0/B = 1,27 \times 10^{-3}/0,4 = 3,18 \times 10^{-3}$ м/с, при $Q = 1,2$ л/мин — $u_{02} = 6,36 \times 10^{-3}$ м/с.

В соответствии с этим, согласно формуле (13), по каждому из вариантов расхода модифицированный критерий Фурье изменяется в области значений: $Fo^* (Q = 0,6 \text{ л/мин}) \in [0, 0,081]$; $Fo^* (Q = 1,2 \text{ л/мин}) \in [0, 0,041]$.

При этом, в качестве расчетной величины приведенной по радиусу r температуры θ внутри капилляра выбирают ее осредненное по площади поперечного сечения канала значение θ_{cp} , т. е., приближенно, принимают

$$\theta_{cp}(d, B, z) = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} \theta(d, m, r, z) r dr, \quad (14)$$

где $r_0 = r_0(d, B)$ вычисляют по (1), $\theta(d, B, r, z)$ — по (7) и (8).

В результате чего, в качестве расчетной на базе режимных параметров процесса осевой координаты z протекания процесса по температуре воды, выбрана зависимость

$$t(z) = t_0 + (t_k - t_0)\theta, \quad (15)$$

где, как и в дальнейшем, по умолчанию, величину θ рассчитывают на основе выражения (14).

При этом, поскольку из условия протекания процесса как стационарного явления, следует, что между кинематическими характеристиками этого процесса — временем τ и координаты z имеет место зависимость $z = u_0\tau$, то в целях удобства анализа результатов расчетов, наряду с (15), используют зависимость:

$$t(\tau) = t_0 + (t_k - t_0)\theta, \quad (16)$$

где $\tau = z/u_0$.

Предварительно, с целью оценки быстроты сходимости, особенно в области небольших значений критерия Fo^* , ряда (8), на пробном примере, при температуре $t_0 = 40$ °С, коэффициенте теплоотдачи [15] $\alpha = 500$ Вт/(м²·К) (рис. 2), были проведены вычисления на основе зависимости (14). Для чего, на базе определяемого по (12) значения параметра $Bi = \alpha r_0/\lambda = 500 \times 0,016/0,58 = 14$, находили последовательно, начиная с первой до шестой суммы, включительно, частичные суммы этого ряда.

Учитывая, что определение корней трансцендентного уравнения (11) при варьировании входящих в выражение критерия Bi параметров сопряжено с трудоемкими вычислениями, для расчета пользуются табличными данными по корням этого уравнения [12]. Для всех вариантов расчета небольшое различие по величине частичных сумм отмечается, лишь начиная с шестой

суммы (рис. 3). Поэтому в расчетах ограничиваются сохранением в решении (8) суммы из шести членов этого ряда.

По зависимостям (8)–(13), (15), (16), в области варьирования реальных значений параметров процесса охлаждения воды системой замороженных шаров, были получены, отраженные графиками рис. 4, 5, результаты расчета. Причем, визуальный анализ кривых рис. 3–5 выявляет, согласующуюся с физическим смыслом, зависимость от режимных параметров и переменных исследуемой задачи.

А именно, поскольку расчетное значение температуры хладоносителя вдоль по каналу понижается, то,

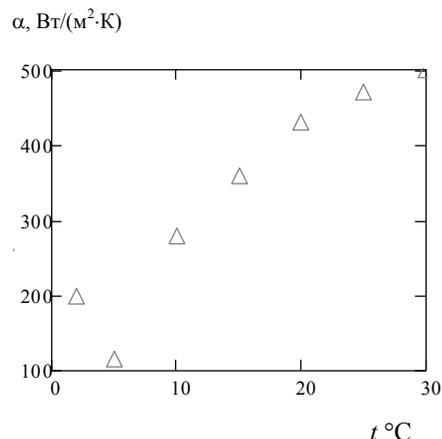


Рис. 2. Результаты опытных измерений коэффициента α теплоотдачи в зависимости от температуры t воды для системы «вода–лед» [15]

Fig. 2. The experimental results for the heat transfer coefficient α depending on the water temperature t for the water–ice system [15]

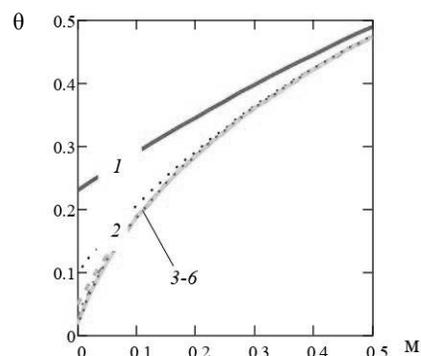


Рис. 3. Зависимости от осевой координаты z результатов расчета осредненной по радиусу удельной температуры θ охлаждаемой жидкости для частичных сумм ряда (8) ($Q = 10^{-5}$ м³/с; $d = 0,04$ м; $t_0 = 40$ °С; $B = 0,4$; $\alpha = 500$ Вт/(м²·К); $Bi = 14$: 1, 2, 3 — соответственно, число слагаемых от 1 до 3; 4–6 — число слагаемых от 4 до 6, соответственно)

Fig. 3. Dependencies of the calculation results for the averaged to radius specific temperature θ of the liquid being cooled for partial sums of series on axial coordinate z (8) ($Q = 10^{-5}$ м³/с; $d = 0,04$ м; $t_0 = 40$ °С; $B = 0,4$; $\alpha = 500$ Вт/(м²·К); $Bi = 14$: 1, 2, 3 — the number of summands is from 1 to 3; for 4–6 the number of summands is from 4 to 6)

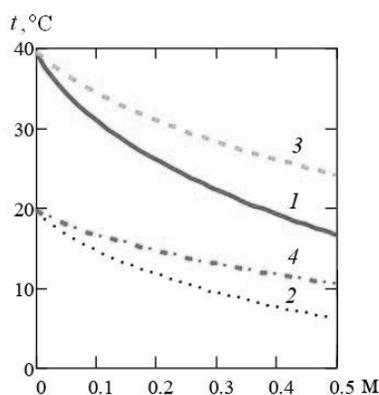


Рис. 4. Зависимости температуры t охлаждаемой жидкости по расстоянию z от входа в канал при различных значениях производительности Q , исходной температуры t_0 жидкости, критерия Bi и фиксированных значениях диаметра d шара, температуры t_k хладоносителя и пористости среды ($d=0,04$ м, $t_k=-10$ °С, $B=0,4$; $Q=10^{-5}$ м³/с):
 1 — $t_0=40$ °С, $Bi=14$; 2 — $t_0=20$ °С, $Bi=12,7$; $Q=2 \cdot 10^{-5}$ м³/с;
 3 — $t_0=40$ °С, $Bi=14$; 4 — $t_0=20$ °С, $Bi=12,7$

Fig. 4. Dependencies of the temperature of the liquid being cooled t on the distance from the channel inlet z for different values of effective capacity Q , initial temperature of the liquid t_0 , criteria Bi , and the fixed values of ball diameter d , cooling media temperature t_k , and porosity of the media ($d=0.04$ м, $t_k=-10$ °С, $B=0.4$; $Q=10^{-5}$ м³/с):
 1 — $t_0=40$ °С, $Bi=14$; 2 — $t_0=20$ °С, $Bi=12.7$; $Q=2 \cdot 10^{-5}$ м³/с;
 3 — $t_0=40$ °С, $Bi=14$; 4 — $t_0=20$ °С, $Bi=12.7$

исходя из данных рис. 3, удельная температура q охлаждаемой жидкости возрастает в том же направлении.

В свою очередь, из сравнительного анализа габиту-са графиков рисунков следует, что градиент по оси z (рис. 4) и по времени t (рис. 5) температуры жидкости, естественно, увеличивается в связи с ростом разности температур между герметичными шарами и охлаждаемой жидкостью (на рис. 4, 5 крутизна графика 1 больше крутизны графика 2).

Кроме того, согласно проведенному расчету, эффективность процесса охлаждения воды, как и должно быть, снижается вместе с увеличением расхода жидкости (например, на рис. 4 кривая 3 расположена выше кривой 1).

Однако нужно отметить, что, несмотря на качественное согласие полученных расчетных результатов с физическим смыслом развития исследуемого процесса, количественная оценка данного процесса нуждается в уточнении.

Известно, что во многих работах по теории теплопроводности граничное условие на поверхности раздела фаз полагается зафиксированным, тогда как в процессе теплообмена между фазами гетерогенной системы (например, между жидкостью и хладоносителем) температура фаз сближается по величине, как и в исследуемой задаче, интенсивность отдачи холода от шара к жидкости.

Поэтому представленные рис. 4, 5 результаты по темпу охлаждения жидкости, в действительности, имеют незначительное отличие по сравнению с реальными данными по скорости проведения процесса теплообмена.

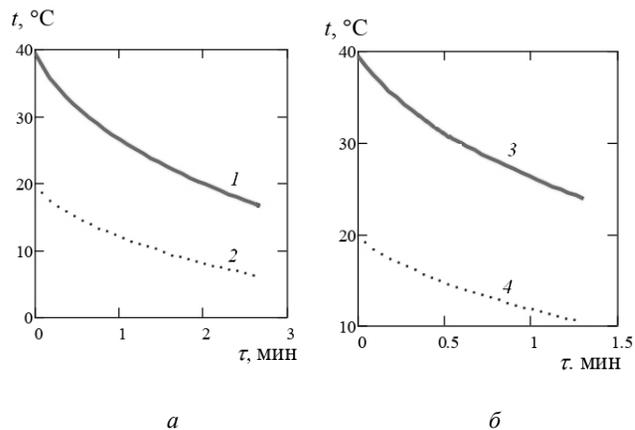


Рис. 5. Зависимости температуры t охлаждаемой жидкости от времени протекания процесса при различных значениях производительности Q , исходной температуры t_0 жидкости, критерия Bi и фиксированных значениях диаметра d шара, температуры t_k хладоносителя, пористости B среды ($d=0,04$ м, $t_k=-10$ °С, $B=0,4$):

a — $Q=10^{-5}$ м³/с: 1 — $t_0=40$ °С, $Bi=14$; 2 — $t_0=20$ °С, $Bi=10,6$;
 b — $Q=2 \cdot 10^{-5}$ м³/с: 3 — $t_0=40$ °С, $Bi=14$; 4 — $t_0=20$ °С, $Bi=10,6$

Fig. 5. Dependencies of the temperature of the liquid being cooled t on the flow time for differnt values of effective capacity Q , initial liquid temperature t_0 , criteria Bi , and the fixed values of ball diameter d , cooling media temperature t_k , porosity of the media B ($d=0.04$ м, $t_k=-10$ °С, $B=0.4$):
 a — $Q=10^{-5}$ м³/с:
 1 — $t_0=40$ °С, $Bi=14$; 2 — $t_0=20$ °С, $Bi=10.6$;
 b — $Q=2 \cdot 10^{-5}$ м³/с: 3 — $t_0=40$ °С, $Bi=14$; 4 — $t_0=20$ °С, $Bi=10.6$

Выводы

1. Для обоснования явления передачи теплоты в потоке от жидкостной среды к шарам с эвтектическим замороженным раствором инновационной технологии охлаждения данной среды используется аналитический аппарат по прогнозированию протекания этого процесса.

2. При количественном анализе поставленной задачи применяется гипотеза кинетики фильтрационного движения жидкости, когда занимаемый охлаждаемой жидкостью рабочий объем между шарами заменяется эквивалентным по объему скоплением цилиндрических капиллярных каналов. Что позволило, с точки зрения аналитического и численного исследования теплового режима в стационарном потоке жидкости внутри рабочей емкости, свести эту проблему к рассмотрению данного режима в изолированном капилляре.

3. Выбранные условия по размерам емкости и шаров, объемному содержанию шаров в емкости создали предпосылки реализовать количественное моделирование, рассматриваемого в работе процесса, исходя из расчетных зависимостей о распределении температуры при неустановившемся режиме в неограниченном цилиндре.

4. С целью оценки эффективности процесса охлаждения потока жидкости в емкости с замороженной твердой фазой и развитой поверхностью теплообмена, в области реальных значений параметров исследуемого явления, на основе полученных зависимостей по температуре в потоке проведено численное моделирование процесса охлаждения данной среды и выявлены режимные параметры по прогнозированию протекания этого процесса.

Литература

1. Коровин Г. С., Квашенников В. И., Козловцев А. П. Энергосберегающий метод охлаждения молочной продукции // Известия ОГАУ. 2013. № 3. С. 97–99.
2. Коровин Г. С., Квашенников В. И., Козловцев А. П., Шахов В. А. Энергосберегающая технология заготовки естественного льда на молочных фермах // Научное обозрение. 2015. № 4. С. 17–22.
3. Belozero G. A., Mednikova N. M., Pytchenko V. P. Investigation of heat exchange during movement in a horizontal tube of an aqueous propylene-glycol ice slurry // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. V. 53. No 3–4. P. 260–265.
4. Виноградов В. В., Тяжельникова И. Л., Виноградова Е. П., Есенбеков В. С. Теоретический анализ возможности управления условиями затвердевания в непрерывномлите слитке // Металлы. 2014. № 4. С. 17–22.
5. Виноградов В. В., Шакуров А. Г., Тяжельникова И. Л., Виноградова Е. П., Есенбеков В. С. Математическое моделирование охлаждения шлакового расплава системой металлических шаров // Журнал технической физики. 2015. Том 8. Вып. 12. С. 21–25.
6. Семенов Е. В., Бабакин Б. С., Воронин М. И., Белозеров А. Г., Бабакин С. Б. Математическое моделирование процесса охлаждения хладоносителя системой замороженных шаров // Вестник Международной академии холода. 2016. № 4. С. 74–79.
7. Quantitative analysis of the process of cooling a coolant using developed frozen surfaces. Babakin B. S., Voronin M. I. etc. // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. V. 54. No 3–4. P. 233–238.
8. Хэппель Д., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. Перевод с английского. М: Мир, 1976. 630 с.
9. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. — М.: Наука, 1977. 664 с.
10. Кот Ю. Д. Математические зависимости процесса центрифугирования утфелей. Сб. тр. ВНИИСП. Том XII. М.: Пищевая промышленность, 1964. С. 227–237.
11. Будаков Б. М., Самарский А. А., Тихонов А. Н. Сборник задач по математической физике. М.: ГИТТЛ, 1956. 683 с.
12. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
13. Кудрявцев Е. М. Mathcad 2000. М.: ДМК Пресс, 2001. 571 с.
14. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 204 с.
15. Бобков В. А. Производство и применение льда. М.: Пищевая пром-сть, 1977. 231 с.

Сведения об авторах

Бабакин Борис Сергеевич

д. т. н. профессор кафедры «Ресурсосберегающие процессы и технологии пищевых производств» Московского государственного университета пищевых производств, 125080, г. Москва, Волоколамское ш., 11, holod@mgupp.ru

Воронин Михаил Ильич

к. т. н., доцент кафедры «Ресурсосберегающие процессы и технологии пищевых производств» Московского государственного университета пищевых производств, 125080, г. Москва, Волоколамское ш., 11, aspirantpp@yandex.ru

References

1. Korovin, G. S., Kvashennikov V. I., Kozlovtssev A. P. energy Saving method of cooling dairy products. *News OGAU*. 2013. No. 3. P. 97–99. (in Russian)
2. Korovin G. S., Kvashennikov V. I., Kozlovtssev A. P., Shakhov V. A. Energy-Saving technology of natural ice harvesting on dairy farms. *Scientific review*. 2015. No. 4. P. 17–22. (in Russian)
3. Belozero G. A., Mednikova N. M., Pytchenko V. P. Investigation of heat exchange during movement in a horizontal tube of an aqueous propylene-glycol ice slurry. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. V. 53. No 3–4. P. 260–265.
4. Vinogradov V. V., Tyazhelnikova I. L., Vinogradova E. P., Esenbekov V. S. Theoretical analysis of the possibility of controlling the solidification conditions in a continuous ingot. *Metals*. 2014. No. 4. P. 17–22. (in Russian)
5. Vinogradov V. V., Shakurov A. G., Tyazhelnikova I. L., Vinogradova E. P., Esenbekov V. S. Mathematical modeling of slag melt cooling by metal balls system. *Journal of technical physics*. 2015. Volume 8. Issue. 12. P. 21–25. (in Russian)
6. Semenov E. V., Babakin B. S., Voronin M. I., Belozero A. G., Babakin S. B. Mathematical modeling of thermostating liquid cooling process by the system of frozen ballons. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2016. No 4. P. 74–79. (in Russian)
7. Quantitative analysis of the process of cooling a coolant using developed frozen surfaces. Babakin B. S., Voronin M. I. etc. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. V. 54. No 3–4. P. 233–238.
8. Happel, D., Brenner, G. Hydrodynamics at small Reynolds numbers. English translation. Moscow, 1976. 630 PP. (in Russian)
9. Polubarinova-Kochina, P. Y. Theory of ground water movement. Moscow: Science, 1977. 664 pp. (in Russian)
10. Cot J. D. Mathematical dependence of the centrifugation process, utpala. *Proceedings of VNIIMP*. Vol. XII. Moscow: Food industry, 1964. P. 227–237. (in Russian)
11. Budak B. M., Samarskiy A. A., Tikhonov A. N. Collection of problems in mathematical physics. Moscow, 1956. 683 p. (in Russian)
12. Lykov A. V. Theory of thermal conductivity. Moscow: High school, 1967. 599 pp. (in Russian)
13. Kudryavtsev E. M. Mathcad 2000. Moscow: DMK Press, 2001. 571 p. (in Russian)
14. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. Fundamentals of heat transfer. Moscow: Energy, 1973. 204 p. (in Russian)
15. Bobkov V. A. Production and application of ice. Moscow: Food industry, 1977. 231 p. (in Russian)

Information about authors

Babakin Boris Sergeevich

D. Sc., Professor of the Department of resource-saving processes and technologies of food production of Moscow State University of Food Production, Russia, 125080, Moscow, Volokolamskoe sh., 11, holod@mgupp.ru

Voronin Mikhail Ilyich

Ph. D., Associate Professor of the Department of resource-saving processes and technologies of food production of Moscow State University of Food Production, Russia, 125080, Moscow, Volokolamskoe sh., 11, aspirantpp@yandex.ru

Семенов Евгений Владимирович

д. т. н., профессор кафедры «Технологии продуктов из растительного сырья и парфюмерно-косметических изделий» Московского государственного университета технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), 109004, г. Москва, Земляной Вал, 73, sem-post@mail.ru

Бабакин Сергей Борисович

к. т. н., Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности (ВНИХИ) — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, 127422, г. Москва, ул. Костякова, д. 12, holod@mgupp.ru

Белозеров Антон Георгиевич

к. т. н., заместитель директора ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, 109316, Москва, ул. Талалихина, 26, a.belozеров@fncps.ru

Сучков Александр Николаевич

инженер, всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности (ВНИХИ) — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, 127422, г. Москва, ул. Костякова, д. 12, alexandr-truba@yandex.ru

Semenov Evgeni Vladimirovich

D. Sc., Professor of the Department of technologies of products from plant raw materials and perfumery and cosmetics of K. G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University), Russia, 109004, Moscow, Zemlyanoy Val, 73, sem-post@mail.ru

Babakin Sergey Borisovich

Ph. D., All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V. M. Gorbатов Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Russia, 127422, Moscow, Kostyakova str., 12, holod@mgupp.ru

Belozеров Anton Georgievich

Ph. D., Deputy Director of Federal State Budgetary Scientific Institution “V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences”, Russia, 109316, Moscow, Talalikhina str., 26, a.belozеров@fncps.ru

Suchkov Alexander Nikolaevich

Engineer, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V. M. Gorbатов Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Russia, 127422, Moscow, Kostyakova str., 12, alexandr-truba@yandex.ru



28 Международная агропромышленная выставка-ярмарка
АГРОФОРУМ-2019

**Выставка «АГРОФОРУМ» проводится
10–12 июля 2019 г.
Ярмарка региональных продуктов «АГРОФОРУМ»
17–25 августа 2019 г.**

Выставка «АГРОФОРУМ» – крупнейшая выставочная площадка России для демонстрации возможностей малых форм хозяйствования АПК, обмена опытом и обсуждения перспектив развития отрасли.

На выставке представлены почти все регионы России и порядка 20 стран с лучшими продовольственными товарами и достижениями местного сельского хозяйства.

ВЫСТАВКА. РАЗДЕЛЫ:

- ✓ Растениеводство сельскохозяйственных культур
- ✓ Средства защиты растений. Агрохимия
- ✓ Животноводство. Корма и комбикорма. Ветеринария
- ✓ Продукты питания.
Напитки (Кухня регионов «От поля до прилавка»)
- ✓ Услуги для АПК. Научное обеспечение. Управление

<http://agrorus.expoforum.ru/>

Организатор выставки-ярмарки:

Министерство сельского хозяйства РФ,
при официальной поддержке Правительств
Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Контакты:

Габучия Екатерина

Тел./факс: +7 (812) 240-40-40, доб.2235
E-mail: e.gabuchiya@expoforum.ru,

Место проведения:

КВЦ «Экспофорум»

Адрес дирекции:

Петербургское шоссе 64, корпус 1,
конгресс-центр, ЭКСПОФОРУМ