

Теоретическое обоснование процесса охлаждения молока набором замороженных шаров

Семенов Евгений Владимирович

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского
(Первый казачий университет)»
Адрес: 109004, город Москва, Земляной Вал, д. 73
E-mail: sem-post@mail.ru*

Бабакин Борис Сергеевич

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»
Адрес: 125080, город Москва, Волоколамское шоссе, д. 11
E-mail: holod@mgupp.ru*

Сучков Александр Николаевич

*Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности (ВНИИХИ) – филиал
ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН
Адрес: 127422, город Москва, ул. Костякова, д. 12
E-mail: alexandr-truba@yandex.ru*

Воронин Михаил Ильич

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»
Адрес: 125080, город Москва, Волоколамское шоссе, д. 11
E-mail: aspirantpp@yandex.ru*

Бабакин Сергей Борисович

*Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности (ВНИИХИ) – филиал
ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН
Адрес: 127422, город Москва, ул. Костякова, д. 12
E-mail: holod@mgupp.ru*

В перерабатывающих производствах агропромышленного комплекса охлаждение сырьевых ресурсов, в том числе и сырого молока, способствует сохранению их биологических свойств, предотвращает размножение в продуктах вредной микрофлоры. Анализ с точки зрения эффективности экономики специализирующихся на производстве сырого молока фермерских хозяйств выявляет, как одно из энергозатратных звеньев технологического потока этого производства, именно холодильное оборудование. Практическая эксплуатация данного вида оборудования в настоящее время, безусловно, снижает возможности конкуренции фермерских хозяйств с другими производителями и в проводимой Правительством Российской Федерации политики продовольственного импортозамещения в современных сложных рыночных условиях. Поэтому сейчас и на перспективу необходимо ориентировать усилия научно-технического персонала исследовательских и проектных организаций в направлении научного поиска и разработке техники и технологии снижающего удельные затраты холодильного оборудования как для фермерских хозяйств, так и в целом для промышленности страны. В статье авторами, как одно из альтернативных технико-технологических решений проблемы охлаждения данного вида сырья, предлагается использовать в качестве аккумуляторов холода набор тел с развитой поверхностью, а именно, с помощью замороженного до эвтектических температур холодоаккумулирующего вещества, находящегося в шарообразных капсулах. При этом снижаются тепловые потери за счет интенсификации теплообмена в результате контакта между обрабатываемой жидкостной средой и холодоаккумулирующим веществом; упрощается аппаратное оформление системы охлаждения; создается возможность работы охлаждающей системы как в периодическом, так и в непрерывном (проточном) режимах; в холодное время года, а также в ночные часы, в условиях

льготной тарификации электроэнергии, установка может эффективно аккумулировать холод. Предложенный для охлаждения молока способ снижения температуры обрабатываемой жидкостью может быть использован на частных молочных фермах с небольшим содержанием поголовья крупнорогатого скота.

Ключевые слова: охлаждение, замораживание, аккумулятор холода, снижение энергозатрат, теплообмен, хладоноситель, сырое молоко, микрофлора

Введение

В технологических процессах перерабатывающих производств агропромышленного комплекса (АПК), других производствах важным направлением в области сохранения качественных показателей обрабатываемого сырья служат научно обоснованные техника и технология быстрого охлаждения жидкостной среды на базе энергосберегающей холодильной техники (Бабакин, Воронин, Семенов, Белозеров, Бабакин, 2018; Белозёров, Бабакин, Макаров, 2011; Виноградов, Тяжелникова, Виноградова, Есенбеков, 2014; Виноградов, Шакуров, Тяжелникова, Виноградова, Есенбеков, 2015; Коровин, Квашенников, Козловцев, 2013; Коровин, Квашенников, Козловцев, Шахов, 2015; Мишуров, 2011; Тихомиров, Андрюхина, Скоркин, 2018; Amin, Bruno, Belusko, 2014; Dutil, Rousse, Salah, Lassue, Zalewski, 2011; Eames, Adref, 2002; Ismail, Henríquez, da Silva, 2003).

Однако, хотя в перерабатывающих производствах АПК охлаждение продовольственных ресурсов и является одним из основных среди других процессов этого комплекса, кинетика быстрого охлаждения продовольственного сырья разработана все еще недостаточно.

Особенно остро данная проблема стоит перед производителями молочной продукции как в целом перед молочной отраслью промышленности, так, в частности, и перед фермерским хозяйством, так как для сохранения качества молока после дойки нужно быстро понизить его температуру, до того, как в нем начнет расти бактериальная обсемененность.

Поэтому в настоящее время одним из инновационных направлений совершенствования техники и технологии ускоренного снижения температуры жидкостной среды, в частности, сырого молока, является применение автономных (переносных) состоящих из набора заполненных холодоаккумулирующим веществом расположенных в крупноячейстой кассете тел шарообразной формы аккумуляторов холода.

Литературный обзор

В большинстве рассмотренных работ представлена первичная холодильная обработка молока на фермах за счет использования энергоёмких холодильных установок, требующих квалифицированного обслуживания (Герасимова, 2009; Иванов, 2012; Коршунов, 2012; Коршунов, Учеваткин, Марьяхин, Коршунов, 2013; Коршунов, Иванов, 2014; Коршунов, Учеваткин, Марьяхин, Коршунов, Иванов, 2016; Коршунов, Коршунов, Иванов, 2018; Коршунов, Коршунов, 2019; Морозов, Шилин, Герасимова, Кривогузов, 2019а, Морозов, Шилин, Герасимова, Кривогузов, 2019б; Попова, 2018; Самарин, Шилин, Герасимова, 2010; Самарин, Шилин, Шилин, 2015; Черенцов, Капустин, 2017; Шилин, Герасимова, 2016; Эглит, Кириллов, Брусенцев, 2012).

Авторами статьи проблема охлаждения жидкостной среды замороженными до эвтектических температур шарами сформулирована и решена в рамках классической линейной краевой задачи для уравнения теплопроводности. Однако, хотя и решена собственно задача об охлаждении хладоносителя в емкости с герметичными элементами, содержащими холодоаккумулирующее вещество, тем не менее не получила освещения проблема использования теплоты для реализации целевого технологического процесса, не разработана и не исследована количественно проблема обеззараживания сырья биологического происхождения на основе этой концепции. Следует отметить, что в настоящее время для реализации процедуры охлаждения различных жидкостных сред на базе аккумуляторов холода с замороженными телами и развитыми поверхностями в качестве субъектов этого процесса выступают: собственно обрабатываемая холодом среда, хладоноситель (обычно – вода) и аккумулятор холода (выполненный в виде скопления замороженных шаров).

При применении предлагаемой технологии:

- интенсифицируется теплообмен в результате контакта между обрабатываемой жидкостной средой и холодоаккумулирующим веществом;

- упрощается аппаратное оформление системы охлаждения;
- предусматривается возможность работы охлаждающей системы как в периодическом, так и в непрерывном (проточном) режимах с простым управлением по расходу целевого продукта до тех пор, пока не закончится фазовый переход холодоаккумулирующего вещества;
- в холодное время года и в ночные часы установка может эффективно использоваться для аккумуляции холода и др.

Проведению процесса охлаждения сырого молока, полученного после дойки на частных молочных фермах с небольшим содержанием поголовья крупнорогатого скота (КРС), а также для частного сектора, содержащего КРС, по предложенной упрощенной схеме должно предшествовать физико-математическое обоснование и количественное моделирование этого процесса.

На основе полученных ранее расчетных зависимостей по теплообмену между набором замороженных, заполненных теплоемким холодоаккумулирующим веществом шаров и выполняющего роль хладоносителя для охлаждения сырого молока, в области реальных значений параметров процесса охлаждения и обеззараживания обрабатываемой холодом жидкостной субстанции (Бабакин, Воронин, Семенов, Белозеров, Бабакин, 2018) далее проведено количественное моделирование этого процесса.

Теоретическое обоснование

Предполагается, что в определенной емкости при температуре 34°C содержится обогащенное мезофлорой сырое молоко. Поскольку данный, относящийся по характеру к среднему, температурный режим развивается в условиях ускоренного развития и размножения молочнокислых бактерий, то сырое молоко, с целью снижения способности микрофлоры размножаться в нем, также стремятся возможно быстро охладить. Что позволит увеличить время бактерицидной фазы, достаточной для транспортировки молока на последующую обработку.

При постановке задачи предполагается, что в некоторый заполненный жидкостью рабочий объем (емкость) погружена крупночешуйчатая кассета с замороженными шарами.

Формализуя задачу математически, полагают, что шары статистически равномерно распределены в данной жидкостной системе, причем в качестве модели процесса теплопередачи от жидкости к шарам выбирают изолированный шар радиусом R . К этому шару из прилегающего к нему объема жидкости ($R < r < \xi$) (где r – радиальная координата, 2ξ – расстояние между центрами шаров) в условиях радиальной симметрии подается теплота от жидкости.

Исследование

В принятых допущениях в качестве исходного, описывающего кинетику распределения температуры в жидкости, соотношения выбирают отнесенное к сферическим координатам, с началом координат в центре шара, уравнение нестационарной теплопроводности (Лыков, 1967):

$$\partial t / \partial \tau = a (\partial^2 t / \partial r^2 + 2 \partial t / \partial r / r) \quad (R < r < \xi), \quad (1)$$

где t – температура, τ – время, $a = \lambda / (c\rho)$, a – коэффициент температуропроводности жидкости, r – радиальная координата; λ , c – соответственно, коэффициент теплопроводности и удельной теплоемкости; ρ – плотность жидкости.

Начальное условие:

$$t(r, 0) = t_c = \text{const} \quad (R < r < 2\xi - R), \quad (2)$$

При количественном анализе процесса теплообмена между жидкостью и шарами ограничиваются расчетом поля температуры по половине расстояния между центрами шаров, принимая вместо (2):

$$t(r, 0) = t_c = \text{const} \quad (R < r < \xi), \quad (3)$$

что в условиях симметричности задачи приводит к граничному условию для температуры жидкости между центрами шаров в процессе теплопроводности

$$\partial t(\xi, \tau) / \partial r = 0 \quad (0 < \tau < \infty), \quad (4)$$

соответствующее условию максимума температуры посередине между шарами в процессе тепловой обработки жидкости.

Имея в виду, что поток теплоты развивается от жидкости к шару, в качестве граничного условия на поверхности шара выбирают (Лыков, 1967):

$$\partial t(R, \tau) / \partial r + H[t(R, \tau) - t_k] = 0 \quad (0 < \tau < \infty), \quad (5)$$

где $H = \alpha / \lambda$, α – коэффициент теплоотдачи от шара к жидкости, t_k – криоскопическая температура шара.

То есть, согласно (3)-(5), имеют задачу с граничными условиями третьего рода для дифференциального уравнения теплопроводности (1). Общее решение поставленной задачи выражается в форме (Лыков, 1967):

$$t(r, \tau) = t_k - \sum_{i=1}^n C_i \psi(k_i, r) \exp(-ak_i^2 \tau), \quad n \rightarrow \infty, \quad (6)$$

где r – текущая радиальная координата;

$$\psi(k_i, r) = \sin k_i r + \varphi(x_i) \cos k_i r;$$

$$\varphi(x) = (x - \operatorname{tg} x) / (1 + x \operatorname{tg} x);$$

$$k_i = x_i / \xi;$$

k_i – i -ое собственное значение краевой задачи, $i = 1, 2, \dots, n$;

$$[k + H \cdot \varphi(x)] / R - \varphi(x) / R^2 + \{[H - k \cdot \varphi(x)] / R - 1 / R^2\} \cdot \operatorname{tg}(kR) = 0$$

– характеристическое уравнение;

x_i – i -й корень характеристического уравнения;

$$C_i = \Delta t \cdot \int_R^\xi \psi(k_i, r) r dr / C_{i0}, \quad \Delta t = t_c - t_k,$$

$$C_{i0} = \|\psi(k_i, r)\|^2 = \int_R^\xi \psi(k_i, r)^2 dr$$

– квадрат нормы

собственной функции (Будак и др., 1956).

Зависимость (6), с сохранением в частичной сумме ряда девяти слагаемых, полагают в основу численного моделирования процесса охлаждения заданного объема жидкости скоплением замороженных шаров.

Результаты

В качестве параметров объекта исследования – процесса холодильной обработки сырого молока – принимались данные по воде: плотность $\rho = 10^3$ кг/м³, теплоемкость $c = 4,17 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), теплопроводность $\lambda = 0,63$ Вт/(м·К), температуропроводность $a = 1,51 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Охлаждающими элементами среды объемом 4×10^{-3} м³ служили заполненные льдом 2 шара наружным диаметром $d_n = 0,075$ м, толщиной оболочки $\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ м, массой $M = 0,21$ кг, коэф-

фициентом теплопроводности оболочки $\lambda = 0,4$ Вт/(м·К), удельной теплотой плавления льда $\sigma = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг (Михеев, Михеева, 1973).

Помимо этого, в качестве исходных использовались данные по зависимости счетного содержания микрофлоры в сыром молоке от времени, а также полученные теоретическим путем зависимости (5), (6) по распределению температуры в хладоносителе с заданными исходными температурой t_c окружающей среды и криоскопической температурой t_k охлаждающей среды (скопления шаров) (Рисунок 1) (при этом, как следует из данных Рисунок 1, согласно расчету, температура хладоносителя на пробной установке за время 10 минут понизилась на семь градусов – с 33 до 26°C).

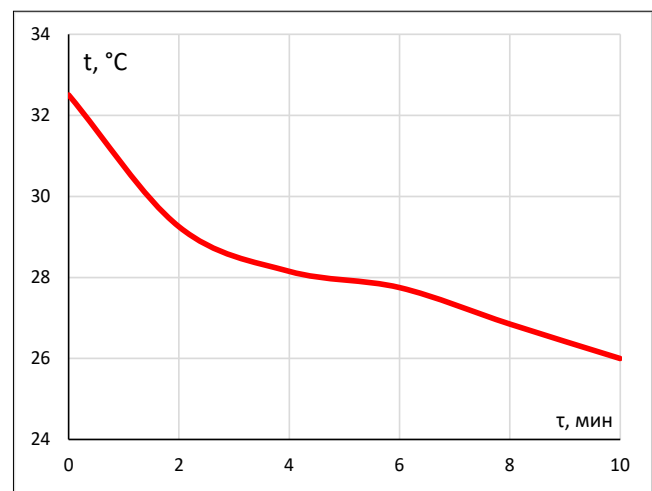


Рисунок 1. Зависимость температуры t хладоносителя от времени τ проведения процесса охлаждения при объемной концентрации 9,9% шаров в емкости.

Дополнительно полагают известными найденные на основе опытов, при температурах начала t_1 и окончания t_2 процесса охлаждения, количества N_1 и N_2 бактериальной обсемененности в молоке (см⁻³).

Тогда, приближенно, зависимость количества N частиц микрофлоры в сыром молоке от текущей температуры t хладоносителя может быть определена исходя из уравнения:

$$N(t) = N_1 \exp [\beta \cdot (t_1 - t)], \quad (7)$$

где $N_1 = N(t_1)$,

$$\beta = \frac{1}{t_1 - t_2} \cdot \ln(k), \quad k = N(t_2) / N(t_1), \quad (8)$$

Как видно, для того, чтобы входящую в (7) температуру t связать с соответствующим ей значением времени τ хладоносителя (молока), нужно зависящее неявным образом время τ для установки с шарами (Рисунок 1) выразить через его текущую температуру t , для чего требуется, с учетом (6), разрешить уравнение

$$\Phi(t, \tau) = t - t(\tau) = 0 \quad (9)$$

относительно времени τ .

Числовые расчеты по формулам (6)-(9) выполняли на базе системы Mathcad.

На Рисунке 2 приведены результаты проведенных на пластинчатом охладителе наблюдений по тренду счетного содержания бактерий в сыром молоке для разных сортов продукта в первые часы после дойки (Коршунов, Иванов, 2014), числовые параметры которых полагались в основу количественного моделирования процесса на установке с шарами.

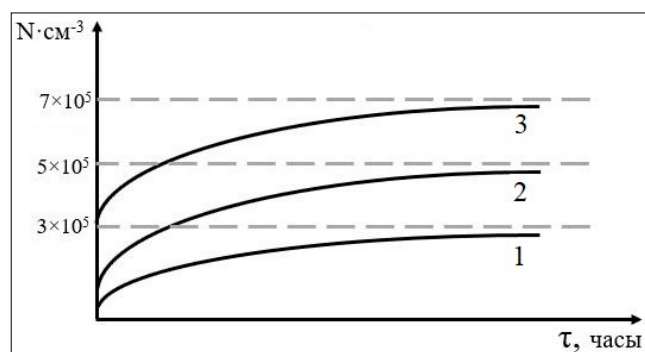


Рисунок 2. Динамика развития бактерий в сыром молоке в первые часы после его дойки при охлаждении в резервуаре: 1 – высший сорт, 2 – первый сорт, 3 – третий сорт.

Отраженные графиками Рисунков 3 и 4 результаты вычислений выявляют согласие полученных результатов количественного анализа исследуемого процесса с физическим смыслом задачи и данными Рисунка 2. А именно, из визуализации графиков Рисунков 3 и 4 следует, что, несмотря на снижение температуры обработки сырого молока на 7°C , процесс размножения бактерий в молоке не прекращался, причем он ускоряется сильнее, когда сортность продукта растет (Рисунок 4). При этом, хотя относительное счетное содержание бактерий примерно одинаково по сортам молока, но количество бактерий согласно расчету, например, по молоку второго сорта, к десятой

минуте возрастет на незначительную величину – с 5×10^5 до $5,4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$.

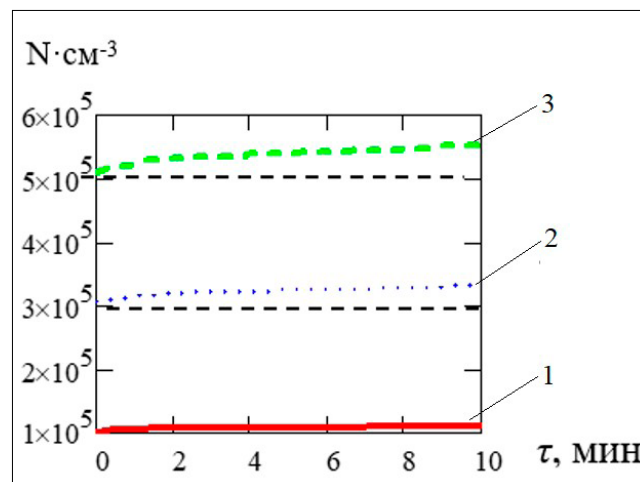


Рисунок 3. Динамика развития бактерий в сыром молоке в первые 10 минут после дойки при непосредственном охлаждении в термостате с замороженными шарами: 1 – высший сорт, 2 – первый сорт, 3 – третий сорт.

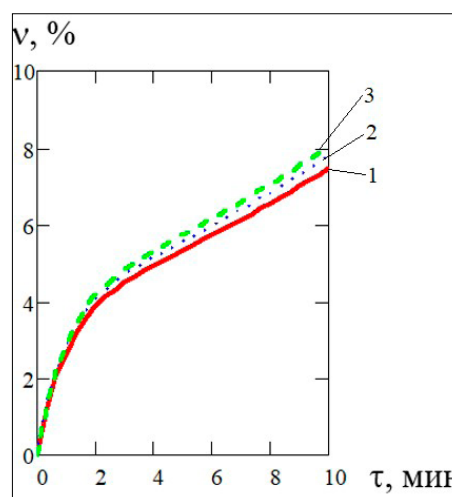


Рисунок 4. Зависимости относительного v (в процентах) роста развития бактерий в сыром молоке от времени τ при охлаждении в термостате с замороженными шарами.

Выводы

На базе сформулированной в рамках линейной теории теплопроводности краевой задачи для включающей жидкость и скопление, как аккумуляторов холода, замороженных эвтектическим раствором шаров гетерогенной жидкостной

системы получена зависимость по распределению температуры жидкости во времени и пространстве.

На примере расчета протекания процесса охлаждения и обеззараживания сырого молока предлагается аналитический аппарат для решения задачи по охлаждению хладоносителя, и проводится численное моделирование по прогнозированию динамики размножения бактерий в охлаждаемом продукте (молоке).

Литература

- Бабакин Б.С., Воронин М.И., Семенов Е.В., Белозеров Г.А., Бабакин С.Б. Количественный анализ процесса охлаждения хладоносителя с применением замороженных развитых поверхностей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 4. С. 16-19.
- Белозеров Г.А., Бабакин Б.С., Макаров Б.А. Математическое моделирование продолжительности процесса замораживания и плавления эвтектического раствора в аккумуляторах холода // Известия Калининградского государственного технического университета 2011. № 23. С. 141-147.
- Виноградов В.В., Тяжелникова И.Л., Виноградова Е.П., Есенбеков В.С. Теоретический анализ возможности управления условиями затвердевания в непрерывнолитом слитке // Металлы. 2014. № 4. С. 17-22.
- Виноградов В.В., Шакуров А.Г., Тяжелникова 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.
- Герасимова О.А. Использование естественного холода для охлаждения молока на пастбищах // Материалы Международной научно-практической конференции «Сельское хозяйство: проблемы и перспективы». Великие Луки: РИО ВГСХА, 2009. С. 214-217.
- Иванов Ю.А. Качество молока и эффективность его производства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2012. № 2. С. 22-24.
- Коровин Г.С., Квашенников В.И., Козловцев А.П. Энергосберегающий метод охлаждения молочной продукции // Известия ОГАУ. 2013. № 3. С. 97-99.
- 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.
- Коршунов А.Б. Контроль и регулирование параметров системы охлаждения молока с аккумуляторами естественного холода // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2012. № 2. С. 80-83.
- Коршунов А.Б., Коршунов Б.П. Аккумуляционные установки для охлаждения молока на фермах // Вестник ВНИИМЖ. 2019. № 3. С. 114-117.
- Коршунов А.Б., Иванов В.В. Технологические схемы энергосберегающих систем для охлаждения молока на фермах // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 4(9). С. 233-236.
- Коршунов Б.П., Учеваткин А.И., Марьяхин Ф.Г., Коршунов А.Б., Иванов В.В. Энергосберегающая система охлаждения молока с использованием комбинированных водолеяных аккумуляторов // Вестник ВНИИМЖ. 2016. № 3. С. 152-157.
- Коршунов Б.П., Учеваткин А.И., Марьяхин Ф.Г., Коршунов А.Б. Энергосберегающее оборудование для аккумуляции холода и эффективного использования энергии льда. // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 2. Часть 1. С. 132-138.
- Коршунов А.Б., Коршунов Б.П., Иванов А.В. Энергосберегающий модуль к системе охлаждения молока на фермах // Вестник ВНИИМЖ. 2018. № 3. С. 119-122.
- Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
- Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: «Энергия», 1973. 344 с.
- Мишууров Н.П. Совершенствование инженерно-технического обеспечения молочных ферм на основе комплексной энергетической оценки. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. 120 с.
- Морозов В.В., Шилин В.А., Герасимова О.А., Кривогузов Д.Ю. Охлаждение молока – в результатах исследований // Вестник ВНИИМЖ. 2019а. № 3. С. 79-83.
- Морозов В.В., Шилин В.А., Герасимова О.А., Кривогузов Д.Ю. Охлаждение молока – в результатах исследований // Вестник НГИЭИ. 2019б. № 3. С. 29-40.
- Попова М.И. Обоснование и разработка льдоаккумулятора природного холода годовой потребности и способа его использования на молочно-товарных фермах: Автореферат. дис. канд. техн. наук. Оренбург, 2018. 21 с.
- Самарин Г.Н., Шилин В.А., Герасимова О.А. Установка для первичного охлаждения молока на пастбищных комплексах // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2010. № 2. С. 8-9.
- Самарин Г.Н., Шилин В.А., Шилин Е.В. Особенности альтернативных методов обработки молока для малых производств // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования:

- Сборник научных трудов. СПб: СПб ГАУ, 2015. С. 583-587.
- Тихомиров И.А., Андрухина О.Л., Скоркин А.В. Ресурсосберегающие технологии производства высококачественного молока // Вестник ВНИИМЖ. 2018. № 4. С. 92-99.
- Чернецов Д.А., Капустин В.П. Исследование комбинированной системы охлаждения коровьего молока // Вестник ВНИИМЖ. 2017. № 4. С. 169-174.
- Шилин В.А., Герасимова О.А. Совершенствование первичной обработки молока на пастбищах // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 1. С. 19-26.
- Эглит А.Я., Кириллов В.В., Брусенцев А.А. Проблемы холодоснабжения молокозаводов // Холодильная техника. 2012. № 12. С. 26-27.
- Amin N.A.M., Bruno F., Belusko M. Effective thermal conductivity for melting in PCM encapsulated in a sphere // Applied Energy. 2014. No. 122. P. 280-287.
- Dutil Y., Rousse D.R., Salah N.B., Lassue S., Zalewski L. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. No. 15. P. 112-130.
- Eames I.W., Adref K.T. Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems // Applied Thermal Engineering. 2002. No. 22. P. 733-745.
- Ismail K.A.R., Henríquez J.R., da Silva T.M. A parametric study on ice formation inside a spherical capsule // International Journal of Thermal Sciences. 2003. No. 42. P. 881-887.

Scientific and Technical Substantiation of the Process of Cooling Milk with a Set of Frozen Balls

Evgeniy V. Semenov

*Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky
73, Zemlyanoy Val, Moscow, 109004, Russian Federation
E-mail: sem-post@mail.ru*

Boris S. Babakin

*Moscow State University of Food Production
11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation
E-mail: holod@mgupp.ru*

Aleksandr N. Suchkov

*All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry-Branch of V.M. Gorbatov Research Center for Food Systems, Russian Academy of Science
12, Kostyikova str., Moscow, 127422, Russian Federation
E-mail: alexandr-truba@yandex.ru*

Mikhail I. Voronin

*Moscow State University of Food Production
11 Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russian Federation
E-mail: aspirantpp@yandex.ru*

Sergey B. Babakin

*All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry-Branch of V.M. Gorbatov Research Center for Food Systems, Russian Academy of Science
12, Kostyikova str., Moscow, 127422, Russian Federation
E-mail: holod@mgupp.ru*

In the processing industries of the agro-industrial complex, the cooling of raw materials, including raw milk, helps to preserve their biological properties, prevents the propagation of harmful microflora in products. According to the economic efficiency of farms specializing in the production of raw milk the analysis depicts refrigeration equipment as one of the energy-consuming links in the technological flow of the production. Nowadays the usage of this type of equipment certainly reduces the competition of farms with other manufactures and the policy of food import substitution pursued by the Government of the Russian Federation in modern challenging market conditions. Therefore, now and in the future the efforts of scientific and technical personnel of research and design organizations should be focused on scientific search and development of engineering and technology reducing the unit costs of refrigeration equipment for farms and the country's industry as a whole. According to this article, a set of items with a developable surface, definitely using a cold storage substance which is frozen to the eutectic temperatures, located in spherical capsules as one of the alternative technical and technological solutions to the problem of cooling this type of raw material was proposed by the authors. In this case, heat losses are reduced due to the intensification of heat transfer as a result of contact of the processed liquid medium and the cold storage substance; the design of cooling system is simplified; the opportunity for periodic and continuous cooling system operation is created; in cold season and at night during the preferential electricity tariff the usage of the proposed invention can effectively accumulate cold. The method for lowering the temperature of a cold-processed liquid proposed for cooling milk can be widely used on private dairy farms with a small amount of cattle.

Keywords: cooling, freezing, cold accumulator, energy cost reduction, heat transfer, coolant, raw milk, microflora

References

- Babakin B.S., Voronin M.I., Semenov E.V., Belozero G.A., Babakin S.B. Kolichestvennyy analiz protsessa okhlazhdeniya khladonositelya s primeneniem zamorozhennykh razvitykh poverkhnostey [Quantitative analysis of the cooling the coolant using frozen developed surfaces]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie [Chemical and Petroleum Engineering]*, 2018, no. 4, pp. 16-19.
- Belozero G.A., Babakin B.S., Makarov B.A. Matematicheskoe modelirovanie prodolzhitel'nosti protsessa zamorazhivaniya i plavlениya ehvtekticheskogo rastvora v akkumulyatorakh kholoda [Mathematical modeling of the duration of the freezing and melting process of a eutectic solution in cold accumulators]. *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Kaliningrad State Technical University]*, 2011, no. 23, pp. 141-147.
- Vinogradov V.V., Tyazhelnikova I.L., Vinogradova E.P., Esenbekov V.S. Teoreticheskiy analiz vozmozhnosti upravleniya usloviyami zatverdevaniya v nepreryvnom litom slitke [Theoretical analysis of the possibility of controlling the solidification conditions in a continuous material]. *Metally [Metals]*, 2014, no. 4, pp. 17-22.
- Vinogradov V.V., Shakurov A.G., Tyazhelnikova I.L., Vinogradova E.P., Esenbekov V.S. Matematicheskoe modelirovanie okhlazhdeniya shlakovogo raspava sistemoy metallicheskiykh sharov [Mathematical modeling of slag melt cooling using a system of metal balls]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Applied Physics]*, 2015, vol. 8, no. 12, pp. 21-25.
- Gerasimova O. A. Ispol'zovanie estestvennogo kholoda dlya okhlazhdeniya moloka na pastbishchakh [The usage of natural cold for milk cooling in pastures]. In *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Selskoe khozyaystvo: problemy i perspektivy» [Proceedings of the International scientific-practical conference "Agriculture: problems and prospects"]*. Velikie Luki: RIO VGSKHA, 2009, pp. 214-217.
- Ivanov Yu.A. Kachestvo moloka i ehffektivnost ego proizvodstva [Milk quality and production efficiency]. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii [Agricultural machinery and technology]*, 2012, no. 2, pp. 22-24.
- Korovin G.S., Kvashennikov V.I., Kozlovtssev A.P. Ehnergoberegayushchiy metod okhlazhdeniya molochnoy produktsii [Energy-saving method for cooling dairy products]. *Izvestiya OGAU [News of the Orenburg State Agrarian University]*, 2013, no. 3, pp. 97-99.
- Korovin G.S., Kvashennikov V.I., Kozlovtssev A.P., Shakhov V.A. Ehnergoberegayushchaya tekhnologiya zagotovki estestvennogo l'da na molochnykh fermakh [Energy-saving technology for the preparation of natural ice on dairy farms]. *Nauchnoe obozrenie [Scientific Review]*, 2015, no. 4, pp. 17-22.
- Korshunov A.B. Kontrol i regulirovanie parametrov sistemy okhlazhdeniya moloka s akkumulyatorami estestvennogo kholoda [Monitoring and regulation of the milk cooling system using accumulators of natural cold]. *Vestnik FGOU VPO MGAU [Bulletin of the Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"]*, 2012, no. 2, pp. 80-83.
- Korshunov A.B., Korshunov B.P. Akkumulyatsionnye ustanovki dlya okhlazhdeniya moloka na fermakh [Storage units for milk cooling on farms]. *Vestnik VNIIMZH [Bulletin of All-Union Research Institute for Animal Husbandry]*, 2019, no. 3, pp. 114-117.
- Korshunov A.B., Ivanov V.V. Tekhnologicheskie skhemy ehnergoberegayushchikh sistem dlya okhlazhdeniya moloka na fermakh [Energy-saving equipment for cold accumulating and efficient usage of ice energy]. *Innovatsii v selskom khozyaystve [Alternative energy and ecology]*, 2014, no. 4(9), pp. 233-236.
- Korshunov B.P., Uchevatkin A.I., Maryakhin F.G., Korshunov A.B., Ivanov V.V. Ehnergoberegayushchaya sistema okhlazhdeniya moloka s ispol'zovaniem kombinirovannykh vodoledyanykh akkumulyatorov [Energy-saving milk cooling system using combined ice-water batteries]. *Vestnik VNIIMZH [Bulletin of All-Union Research Institute for Animal Husbandry]*, 2016, no. 3, pp. 152-157.
- Korshunov B.P., Uchevatkin A.I., Maryakhin F.G., Korshunov A.B. Ehnergoberegayushchee oborudovanie dlya akkumulyatsii kholoda i ehffektivnogo ispol'zovaniya ehnergii l'da [Energy-saving equipment for cold accumulating and efficient usage of ice energy]. *Alternativnaya ehnergetika i ehkologiya [Alternative energy and ecology]*, 2013, no. 2(1), pp. 132-138.
- Korshunov A.B., Korshunov B.P., Ivanov A.V. Ehnergoberegayushchiy modul k sisteme okhlazhdeniya moloka na fermakh [Energy-saving module for farm milk cooling system]. *Vestnik VNIIMZH [Bulletin of All-Union Research Institute for Animal Husbandry]*, 2018, no. 3, pp. 119-122.
- Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967. 599 p.

- Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Heat Transfer Basics]. Moscow: Ehnergiya, 1973. 344 p.
- Mishurov N.P. *Sovershenstvovanie inzhenerno-tekhnicheskogo obespecheniya molochnykh ferm na osnove kompleksnoy ehnergeticheskoy otsenki* [Improving the engineering and technical support of dairy farms based on a comprehensive energy assessment]. Moscow: FGBNU Rosinformagrotekh, 2011. 120 p.
- Morozov V.V., Shilin V.A., Gerasimova O.A., Krivoguzov D.Yu. *Okhlazhdenie moloka – v rezultatakh issledovaniy* [Milk cooling – in research results]. *Vestnik VNIIMZH [Bulletin of All-Union Research Institute for Animal Husbandry]*, 2019a, no. 3, pp. 79-83.
- Morozov V.V., Shilin V.A., Gerasimova O.A., Krivoguzov D.YU. *Okhlazhdenie moloka – v rezultatakh issledovaniy* [Milk cooling – in research results]. *Vestnik NGIEHI [Bulletin of NGIEHI]*, 2019b, no. 3, pp. 29-40.
- Popova M.I. *Obosnovanie i razrabotka ldoakkumulyatora prirodnogo kholoda godovoy potrebnosti i sposoba ego ispolzovaniya na molochno-tovarnykh fermakh: avtoreferat dis. kand. tekhn. nauk* [Substantiation and development of an ice accumulator of natural cold of annual demand and the method of its use on dairy farms. Abstract of Ph.D. (Technology) thesis]. Orenburg, 2018. 21 p.
- Samarin G.N., Shilin V.A., Gerasimova O.A. *Ustanovka dlya pervichnogo okhlazhdeniya moloka na pastbishchnykh kompleksakh* [Installation for milk primary cooling in pasture complexes]. *Mekhanizatsiya i ehlektrifikatsiya selskogo khozyaystva [Mechanization and electrification of agriculture]*, 2010, no. 2, pp. 8-9.
- Samarin G.N., Shilin V.A., Shilin E.V. *Osobennosti alternativnykh metodov obrabotki moloka dlya malykh proizvodstv* [Alternative methods of processing milk for small industries]. In *Nauchnoe obespechenie razvitiya APK v usloviyakh reformirovaniya: Sbornik nauchnykh trudov* [Scientific support for the development of agriculture in the context of reform: Proceedings]. Saint-Petersburg: SPb GAU, 2015, pp. 583-587.
- Tikhomirov I.A., Andryukhina O.L., Skorkin A.V. *Resursosberegayushchie tekhnologii proizvodstva vysokokachestvennogo moloka* [Resource-saving technologies for the production of high-quality milk]. *Vestnik VNIIMZH [Bulletin of All-Union Research Institute for Animal Husbandry]*, 2018, no. 4, pp. 92-99.
- Chernetsov D.A., Kapustin V.P. *Issledovanie kombinirovannoy sistemy okhlazhdeniya korovego moloka* [The study of the combined cooling system of cow's milk]. *Vestnik VNIIMZH [Bulletin of All-Union Research Institute for Animal Husbandry]*, 2017, no. 4, pp. 169-174.
- Shilin V.A., Gerasimova O.A. *Sovershenstvovanie pervichnoy obrabotki moloka na pastbishchakh* [Improving the primary processing of milk on pastures]. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Velikiye Luki State Agricultural Academy]*, 2016, no. 1, pp. 19-26.
- Ehglit A.Ya., Kirillov V.V., Brusentsev A.A. *Problemy kholodosnabzheniya molokozavodov* [Problems of dairy refrigeration]. *Kholodilnaya tekhnika [Kholodilnaya tekhnika]*, 2012, no. 12, pp. 26-27.
- Amin N.A.M., Bruno F., Belusko M. *Effective thermal conductivity for melting in PCM encapsulated in a sphere*. *Applied Energy*, 2014, no. 122, pp. 280-287.
- Dutil Y., Rousse D.R., Salah N.B., Lassue S., Zalewski L. *A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, no. 15, pp. 112-130.
- Eames I.W., Adref K.T. *Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems*. *Applied Thermal Engineering*, 2002, no. 22, pp. 733-745.
- Ismail K.A.R., Henríquez J.R., da Silva T.M. *A parametric study on ice formation inside a spherical capsule*. *International Journal of Thermal Sciences*, 2003, no. 42, pp. 881-887.