

УДК 641.528

УЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ В МАЛОГАБАРИТНОЙ ТОРГОВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ ВИТРИНЕ

М.И. Ботов¹, И.В. Малахов^{1,*}, И.Г. Кобылянский²

¹ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова»,
117997, Россия, г. Москва, Стремянный пер., 36

²ФГБОУ ВО «Мурманский государственный технический университет»,
183010, Россия, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13

*e-mail: kafedrates@mail.ru

Дата поступления в редакцию: 24.04.2016

Дата принятия в печать: 20.09.2016

Одним из факторов, сдерживающих производство замороженных полуфабрикатов высокой степени готовности, является высокая себестоимость, вызванная дополнительными операциями замораживания и регенерации. Дополнительные затраты энергии определяются условиями хранения. Эти затраты энергии трудно определить, так как отсутствуют специальные исследования по определению дополнительных утечек в холодильных аппаратах при открывании дверей. Данные потери энергии особенно значимы для малогабаритного холодильного оборудования, используемого в общественном питании и торговле. При значительном отношении площади дверцы к объему рабочей камеры, характерном для холодильных шкафов и витрин, потери при открывании дверей могут достигать 30 %. Такой режим работы вызывает повторно-переменный режим нагрева-охлаждения сохраняемой продукции. Пульсация температурных полей в рабочей камере, вызванная открыванием дверей, может отрицательно повлиять на качество сохраняемых полуфабрикатов. Рассмотрен вопрос о необходимости точного соблюдения режима хранения пищевых продуктов, показана необходимость учета температурных пульсаций в рабочем объеме аппарата при открывании дверцы. В работе приводятся экспериментальные данные, характеризующие периодичность открывания дверей. Предлагается методика учета возникающих температурных пульсаций, базирующаяся на результатах эксперимента, а также расчетный метод определения температуры в толще продукта. Приводятся данные экспериментальных исследований и результаты решения краевой задачи теплопроводности, описывающей температурное поле в объеме замороженного продукта в условиях хранения его в торговом холодильном оборудовании – холодильном шкафу-витрине. Полученное аналитическое решение дает возможность определить темп охлаждения (нагрева), наименьший удельный расход энергии для поддержания необходимого режима, а также выбрать оптимальное соотношение продолжительностей периодов работы и отключения холодильной машины. Предлагается техническое решение, позволяющее компенсировать потери холода при открывании дверей.

Энергоэффективность, режим хранения, рабочий объем, температурная пульсация

Введение

Достаточно высокими темпами развивается на предприятиях массового питания производство и потребление блюд в замороженном виде. Для производства полуфабрикатов используют индустриальную ресурсосберегающую и энергосберегающую технологию переработки пищевого сырья, базирующуюся на использовании поточно-механизированных и автоматизированных линий, в одинаковой степени удовлетворяющих основным требованиям как в общественном питании, так и в промышленности [1]. Произведенная в этих условиях кулинарная продукция нашла применение в школьных и других образовательных учреждениях, где для питания широко используются полуфабрикаты высокой степени готовности [2]. Для длительного сохранения произведенных полуфабрикатов, как правило, используются низкотемпературные холодильные ка-

меры, а на стадии комплектации кулинарных блюд и подготовки к регенерации низкотемпературные холодильные шкафы, в которых изделия находятся в замороженном состоянии [10].

Увеличение спроса на замороженную продукцию объясняется ее относительно высоким качеством, определяемым внедрением технологии шоковой заморозки произведенной кулинарной продукции и продолжительными сроками хранения. При этом остается актуальным вопрос снижения расхода электроэнергии, в первую очередь холодильного оборудования, используемого для хранения продукции. Производство замороженных или охлажденных полуфабрикатов, полуфабрикатов высокой степени готовности, а также замороженных или охлажденных блюд требует точного соблюдения режимов хранения и реализации. Последнее особенно важно при сохранении продукции в малогабаритном холо-

дильном оборудовании, используемом на предприятиях общественного питания и торговли на заключительном этапе реализации кулинарной продукции. Целью исследования является определение и разработка оптимальных режимов хранения, учитывающих пульсацию тепловых потоков.

Объекты и методы исследования

При хранении замороженных продуктов в холодильных шкафах характерны дополнительные трудноучитываемые потери холода через дверцу рабочей камеры в окружающую среду. Эти потери особенно велики в холодильном торгово-технологическом оборудовании, в котором отношение площади дверцы к объему рабочей камеры велико и в режиме хранения доля теплопотерь в общем энергетическом балансе аппарата может достигать 30 % [3, 4], изменение температуры хранения $\pm 5 \dots 8$ °C [4, 5, 6, 9].

При исследовании режимов работы торгового шкафа-витрины марки Z86 с распашными дверями при сохранении рыбопродуктов, выполненных авторами данной статьи [4], предложена методика оценки характера подмеса теплого воздуха, что позволяет производить корректировку теплового баланса холодильного шкафа по утечкам охлажденного воздуха при открывании дверцы.

Исследованиями определена закономерность утечек холодного воздуха из объема секции холодильного шкафа и подмес теплого воздуха при открывании дверцы. При вертикальном расположении дверцы холодильного шкафа при ее открывании покупателями мороженой продукции холодный воздух, имеющий большую плотность при температуре минус 18 °C и ниже, опускается через низ проема открытой двери и выходит наружу, а его место вверху холодильного шкафа заполняется теплым воздухом магазина.

При закрытых дверях холодильного шкафа массы теплого и холодного воздуха неодинаковы. Если теплый воздух с массой m_1 смешивается при откры-

той двери с массой холодного воздуха m_2 , тогда перед открытой дверью и внутри объема холодильного шкафа масса воздуха станет равной:

$$\frac{1}{2} * (m_1 + m_2 = \frac{1}{2} m_1 + \frac{1}{2} m_2).$$

Если при открывании двери холодильного шкафа каждый раз прибавляется теплый воздух массой m_3 , тогда общая масса составляет:

$$\frac{1}{2} * (\frac{1}{2} m_1 + \frac{1}{2} m_2 + m_3 = \frac{1}{4} m_1 + \frac{1}{4} m_2 + \frac{1}{2} m_3).$$

В работе использовали результаты исследования термометрии объема секции холодильного шкафа при изучении влияния частоты открывания-закрывания двери холодильного шкафа при соблюдении термических условий хранения продукта [4]. Эксперимент проводился при частотах открывания двери: 6; 10; 13; 15 и 18 ч⁻¹. В результате были определены частоты, определяющие условие полной замены холодного воздуха теплым как в отдельной секции, так и во всем объеме холодильного шкафа.

Масса теплого воздуха, вытесняющего холодный воздух из внутреннего объема секции холодильного шкафа, может быть определена по соотношению

$$m_1 \frac{1}{2^{n-1}} + m_1 + \frac{1}{2^{n-1}} * m_2 + \dots + \frac{1}{4} m_{n-1} + \frac{1}{2} m_2,$$

где n – количество последовательно выполняемых операций открывания двери, раз; $m_1, m_2, m_3, m_4, \dots, m_n$ – соответственно массы (кг) теплого поступающего в камеру воздуха.

На экспериментальной модели была исследована закономерность изменения температуры воздуха в секции рабочей камеры холодильного шкафа от продолжительности открывания дверей холодильных шкафов-витрин (рис. 1).

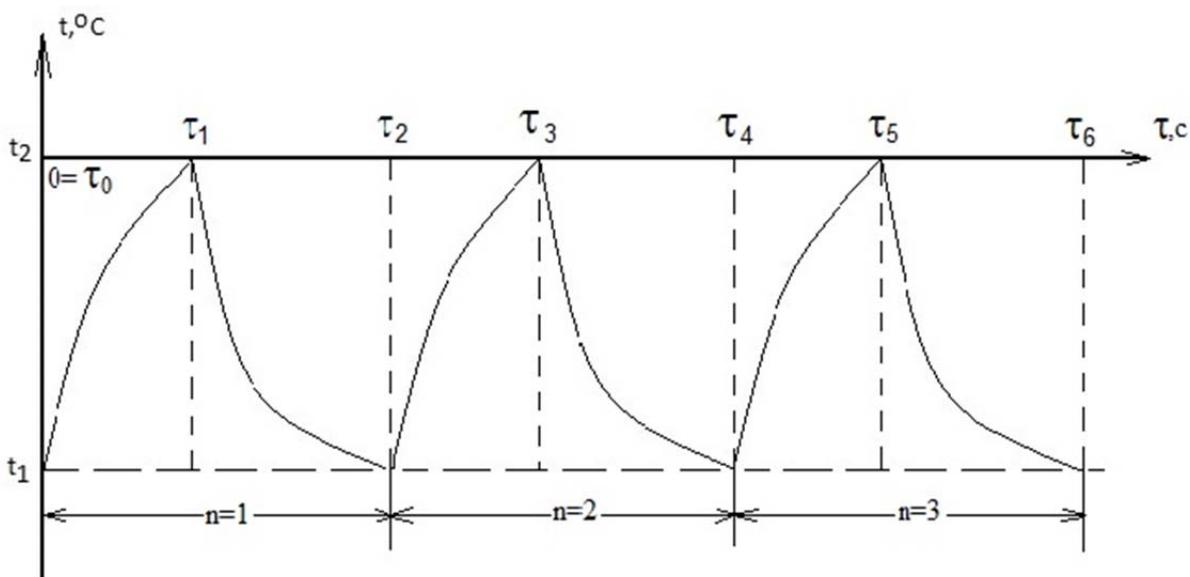


Рис. 1. Зависимость температуры воздуха от продолжительности открывания дверей холодильных шкафов-витрин

Для этого шкаф загружали контрольными пакетами, имитирующими продукт. При этом температурное поле на их поверхности, а также в секции холодильного шкафа измерялось хромель-копелевыми термопарами. Измерения проводились в стационарном режиме хранения. Общее время эксперимента составляло не менее 24 часов и включало не менее трех периодов оттаивания испарителя.

Целью эксперимента являлось определение стабильности температуры в центральном слое продукта при хранении при пульсирующем изменении температуры охлаждающего воздуха (рис. 1), что является основным требованием для обеспечения качества сохраняемой продукции.

При обработке результатов измерений для определения температуры в центре пакетов, имитирующих продукт, решалась следующая краевая задача теплопроводности.

Данные пакеты с достаточной степенью точности рассматривались как неограниченная пластина, так как отношение длины пакета к его толщине составляло не менее 10. Решалось одномерное уравнение теплопроводности для однородного и изотропного тела:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0, \quad 0 < x < R) \quad (1)$$

при равномерном начальном распределении температуры

$$T = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_m}{\pi m} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n \cos(\mu_n X) e^{-\mu_n^2 Fo} + \frac{A}{Pd_2 Fo_2}, \quad (5)$$

где

$$A = 1 + Pd_2 Fo_1 + e^{-Pd_2 Fo_2} - e^{-Pd_2 Fo_1} - e^{-Pd_2 (Fo_2 - Fo_1)} - \frac{Pd_2}{Pd_1} (1 - e^{-Pd_1 Fo_1});$$

$$A_m = \chi_1 \cos \frac{2\pi m Fo}{Fo_2} + \chi_2 \sin \frac{2\pi m Fo}{Fo_2};$$

$$A_n = \frac{2}{\mu_n} (-1)^{n+1} \quad \text{— начальная тепловая амплитуда;}$$

$$\mu_n = (2n - 1) \frac{\pi}{2}; \quad (6)$$

$$B_n = T_1 + \frac{1}{1 - e^{-\mu_n^2 Fo_2}} \cdot \left(T_2 e^{-\mu_n^2 Fo_2} (1 - e^{-\mu_n^2 Fo_1}) - T_1 (1 - e^{-\mu_n^2 (Fo_2 - Fo_1)}) + \frac{e^{-\mu_n^2 Fo_2}}{1 - \frac{Pd_2}{\mu_n^2}} \left(e^{Fo_1 (\mu_n^2 - Pd_1)} - e^{-Pd_2 Fo_1} - e^{-Pd_2 (Fo_2 - Fo_1) + \mu_n^2 Fo_2} \right) \right);$$

$$\chi_1 = \rho_1 (a_{13x} a_{13} + a_{24x} a_{24}) - \rho_2 (a_{13x} a_{24} - a_{24x} a_{13});$$

$$\chi_2 = \rho_2 (a_{13x} a_{13} + a_{24x} a_{24}) + \rho_1 (a_{13x} a_{24} - a_{24x} a_{13});$$

$$t(x, 0) = t_1 = const, \quad (2)$$

дискретном граничном условии

$$t(R, \tau) = \begin{cases} f_1(\tau) = t_2 + (t_1 - t_2) e^{-k_1 \tau} \\ (k_1 = const > 0) \\ f_2(\tau) = t_1 + (f_1(\tau_1) - t_1) e^{-k_2 (\tau - \tau_1)} \\ (k_2 = const > 0) \end{cases} \quad (3)$$

и условия симметрии

$$\frac{\partial t}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Решение симметричной задачи (1) – (4) является одновременно решением задачи нахождения температурного поля в неограниченной пластине толщиной R , когда одна поверхность ее имеет тепловую изоляцию (при $x = 0$ поток тепла отсутствует,

так как $\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0$), а противоположная поверхность $x = R$ поддерживается при температуре, описываемой условием (3).

Решение краевой задачи теплопроводности (1)–(4) получено методом интегрального преобразования Лапласа [7]. Распределение температурного поля в продукте имеет следующий безразмерный вид:

$$\rho_1 = \sin \frac{2\pi m F o_1}{F o_2} + \frac{1 - e^{-P d_1 F o_1}}{1 + \left(\frac{P d_2 F o_2}{2\pi m}\right)^2} \cdot \left(\frac{P d_2 F o_2}{2\pi m} \left(\cos \frac{2\pi m F o_1}{F o_2} - e^{-P d_2 F o_2 \left(1 - \frac{F o_1}{F o_2}\right)} \right) - \sin \frac{2\pi m F o_1}{F o_2} \right) -$$

$$- \frac{1}{1 + \left(\frac{P d_1 F o_2}{2\pi m}\right)^2} \left(e^{-P d_1 F o_1} \sin \frac{2\pi m F o_1}{F o_2} + \frac{P d_1 F o_2}{2\pi m} \left(1 - e^{-P d_1 F o_1} \cos \frac{2\pi m F o_1}{F o_2} \right) \right);$$

$$\rho_2 = 1 - \cos \frac{2\pi m F o_1}{F o_2} + \frac{1 - e^{-P d_1 F o_1}}{1 + \left(\frac{P d_2 F o_2}{2\pi m}\right)^2} \left(\cos \frac{2\pi m F o_1}{F o_2} - e^{-P d_2 F o_2 \left(1 - \frac{F o_1}{F o_2}\right)} + \frac{P d_2 F o_2}{2\pi m} \sin \frac{2\pi m F o_1}{F o_2} \right) -$$

$$- \frac{1}{1 + \left(\frac{P d_1 F o_2}{2\pi m}\right)^2} \left(1 - e^{-P d_1 F o_1} \cos \frac{2\pi m F o_1}{F o_2} + \frac{P d_1 F o_2}{2\pi m} \sin \frac{2\pi m F o_1}{F o_2} \right).$$

Для сокращения записи новых формул введены обозначения:

$$\sqrt{\frac{m\pi}{F o_2}} \rightarrow a; \text{ гиперболические тригонометрические функции, а также безразмерная координата заменены индексами:}$$

$$ch \rightarrow 1; sh \rightarrow 2; \cos \rightarrow 3; \sin \rightarrow 4; X \rightarrow x;$$

$$\text{например } ch\left(\sqrt{\frac{m\pi}{F o_2}} X\right) \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{m\pi}{F o_2}} X\right) = a_{13x};$$

$$sh \sqrt{\frac{m\pi}{F o_2}} \cdot \sin \sqrt{\frac{m\pi}{F o_2}} = a_{24}.$$

В результате анализа изменения температур было установлено, что открывание дверей с определенной частотой приводит к повышению температуры внутри камеры, в центре продукта и нарушению режима хранения.

Для задержки утечек холодного воздуха в дверном проеме холодильного шкафа при открывании двери предложено применение энергосберегающего холодильного шкафа с дверным поршневым насосом (рис. 2).

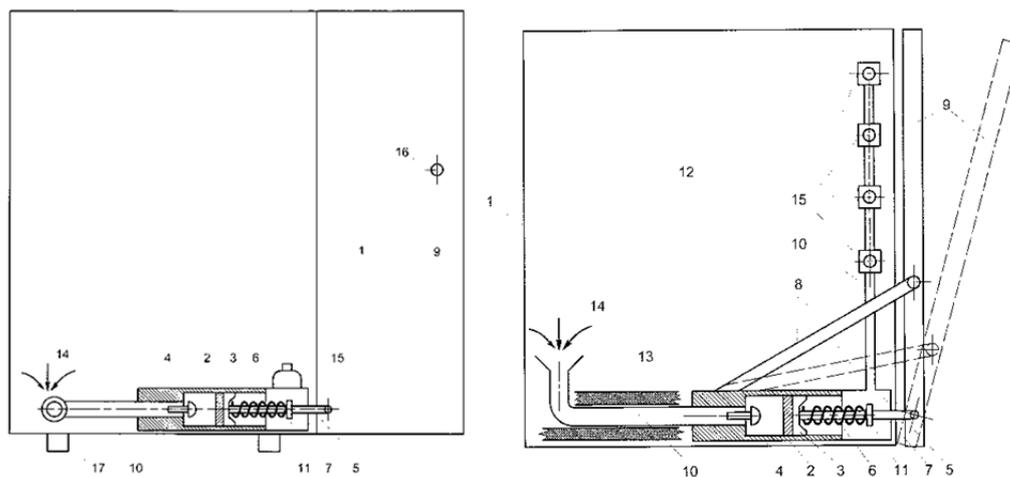


Рис. 2. Энергосберегающее устройство для холодильного шкафа с дверным поршневым насосом:

- 1 – холодильный шкаф с встроенным поршневым насосом; 2 – поршень насоса; 3 – клапан поршня; 4 – дисковый клапан;
- 5 – емкость (резервуар) для сжатого холодного воздуха; 6 – пружина возврата поршня; 7 – шток поршня; 8 – балансир;
- 9 – дверь; 10 – воздухопровод; 11 – держатель пружины; 12 – отсек внутреннего объема холодильного шкафа с холодным воздухом;
- 13 – теплоизоляция воздуховода от теплопритоков в изоляционное ограждение холодильного шкафа; 14 – воздух;
- 15 – диффузоры; 16 – дверная ручка; 17 – опорные ножки

В холодильном шкафу при открывании двери задержка утечек холода осуществляется с помощью поршневого насоса, установленного сверху и снизу изоляционного ограждения каркаса холодильного шкафа. Забор холодного воздуха производится из

отсека внутреннего объема холодильного шкафа. Когда закрывается дверь холодильного шкафа, пружина на штоке поршня сжимается, поршень идет вниз и воздух из-под поршня из внутреннего объема холодильного шкафа поступает через от-

крытый поршневой клапан в освобождающееся пространство под поршнем. При движении поршня вверх поршневой клапан закрывается и холодный воздух над поршнем поднимается в емкость (резервуар) для хранения сжатого холодного воздуха. Под поршнем в это время создается вакуум (разрежение), и по воздухопроводу, изолированному теплоизоляцией от теплопритоков, воздух из емкости (резервуара) для хранения сжатого холодного воздуха под напором направляется в нагнетательный диффузор, имеющий выпускную щель. Через щель диффузора воздух подается на решетку, разделенную на направляющие отверстия поперечными перегородками вниз и вверх дверного проема. Создается воздушная завеса для задержки утечек холода в дверном проеме холодильного шкафа с помощью дверного поршневого насоса.

Данный способ задержки холода в дверном проеме холодильного шкафа экономичен, так как работа поршня выполняется за счет открывания и закрывания двери холодильного шкафа с помощью балансира, закрепленного на дверях, и накопления сжатого холодного воздуха в емкости (резервуаре) для хранения сжатого холодного воздуха. Затем сжатый воздух под давлением подается на диффузоры и создается воздушная завеса в дверном проеме холодильного шкафа. Для каждого типа холодильного шкафа рассчитывается объем резервуара и диаметры отверстий диффузоров для качественного обеспечения холодным воздухом воздушной завесы дверного проема (как минимум на шесть минут – по нормам ГОСТ 23833-95), пока открыта дверь холодильного шкафа [3]. При этом решается задача обеспечения экономии электроэнергии для работы компрессора (агрегата) холодильной машины, обеспечивается энергосбережение и сохранение холода в холодильном шкафу, а также обеспечивается холодильное хранение и сохранность качества замороженных продуктов в торговом холодильном оборудовании за счет сохранения холода. В период, когда дверь холодильного шкафа закрыта, в емкость (резервуар) за счет движения поршня вниз нагнетается сжатый холодный воздух. При открывании двери холодильного шкафа холодный воздух по воздухопроводу под высоким давлением поступает через диффузор на решетку с направляющими отверстиями вверх и вниз дверного проема холодильного шкафа. Образуется воздушная завеса из холодного воздуха в дверном проеме холодильного шкафа. Происходит задержка утечек холода в дверном проеме холодильного шкафа из его отсека внутреннего объема.

Также предложено вентиляционное устройство для задержки утечек холодного воздуха в дверном проеме холодильного шкафа при открывании двери, применение энергосберегающих устройств (рис. 3).

Разработанный способ для задержки утечек холодного воздуха в холодильном шкафу при открывании двери осуществляется с помощью вентилятора (побудителя тяги), установленного сверху и снизу дверного проема изоляционного ограждения холодильного шкафа. Из отсека внутреннего объема

ма холодильного шкафа производится забор холодного воздуха. Холодный воздух по воздухопроводу, изолированному теплоизоляцией от теплопритоков, направляется под напором в нагнетательный диффузор, имеющий выпускную щель. Через щель диффузора воздух подается на решетку, разделенную на направляющие отверстия поперечными перегородками вниз и вверх дверного проема. Создается воздушная завеса для задержки утечек холода из холодильного шкафа. Данный способ задержки холода в дверном проеме холодильного шкафа позволит решить задачу сбережения электрической энергии на дополнительную работу компрессора (агрегата) холодильной машины для холодильного хранения замороженных рыбных продуктов и обеспечит сохранность их качества.

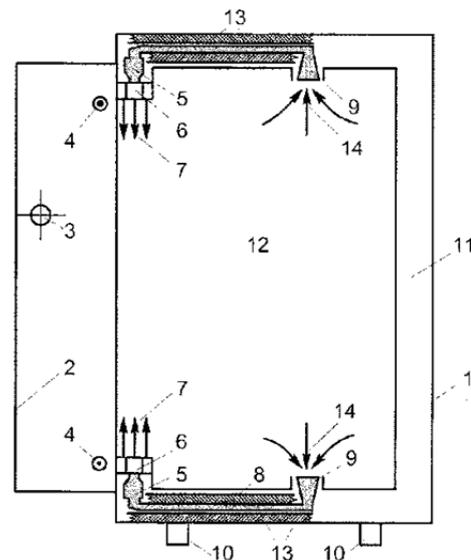


Рис. 3. Вентиляционное устройство для задержки холодного воздуха для холодильного шкафа:

1 – холодильный шкаф с распашными дверями; 2 – дверь; 3 – ручка двери; 4 – кнопка-выключатель вентилятора (побудителя тока); 5 – диффузоры; 6 – решетка с направляющими отверстиями для подачи холодного воздуха вниз и вверх дверного проема шкафа; 7 – воздушная завеса из холодного воздуха для задержки утечек воздуха из холодильного шкафа; 8 – воздухопровод; 9 – вентилятор (побудитель тяги); 10 – опорные ножки; 11 – изоляционное ограждение; 12 – отсек внутреннего объема шкафа; 13 – теплоизоляция воздухопровода от теплопритоков в изоляционное ограждение шкафа; 14 – холодный воздух

Устройство для задержки утечек холода в холодильном шкафу при открывании двери работает следующим образом: в холодильном шкафу с помощью вентилятора (побудителя тяги) подается холодный воздух по воздухопроводу на диффузоры с направляющими решетками, установленные сверху и снизу дверного проема.

Забор холодного воздуха производится в результате создания вентилятором вакуума на входе в воздухопровод. Под напором холодный воздух подается по воздухопроводу, изолированному теплоизоляцией от теплопритоков, в нагнетательный диффузор, имеющий выпускную щель. Через щель диффузора воздух подается на решетку, разделенную на

направляющие отверстия поперечными перегородками внизу и вверху дверного проема. Создается воздушная завеса для задержки утечек холода из холодильного шкафа. Для задержки холода в отсеке внутреннего объема холодильного шкафа в дверях установлены кнопки-включатели вентилятора (побудителя тяги). В период, когда дверь холодильного шкафа закрыта, вентилятор не работает. Температура холодного воздуха в отсеке внутреннего объема холодильного шкафа соответствует нормам и техническим условиям хранения мороженных продуктов. При открытии дверей холодильного шкафа срабатывает кнопка-включатель вентилятора (побудителя тяги), замыкается электрическая цепь и холодный воздух поступает с помощью вентилятора из отсека внутреннего объема холодильного шкафа по воздуховоду на диффузор и решетку с направляющими отверстиями вверху и внизу дверного проема. Образуется воздушная завеса из холодного воздуха и задержка холода в дверном проеме холодильного шкафа.

Таким образом, происходит сохранение холода во внутреннем отсеке холодильного шкафа и обеспечивается сохранность качества мороженных продуктов даже при частом неконтролируемом открытии дверей. Данные технические решения способствуют экономии электроэнергии, расходуемой на дополнительное включение в работу компрессора (агрегата) холодильной машины, и обеспечивается энергосбережение в торговом холодильном оборудовании.

Заключение

1. Техническим результатом является повышение рациональности работы и экономичности холодильной производительности агрегата холодильного шкафа, экономия затрат электрической энергии на работу компрессора (агрегата) холодильной машины и сохранение холода в отсеке внутреннего объема холодильного шкафа.

2. Способы задержки холода в дверном проеме холодильного шкафа позволяют решить задачу энергосбережения в холодильной, пищевой и рыбной промышленности. Сохранение холода экономит электроэнергию на работу компрессора (агрегата) холодильной машины, а также обеспечивается рациональное холодильное хранение, сохранность и качество мороженных рыбных продуктов в холодильном шкафу.

3. Результаты экспериментальных исследований показывают, что подача холодного воздуха и его задержка в дверном проеме холодильного шкафа с помощью вентилятора практичнее, чем подача воздуха с помощью поршневого насоса.

Экспериментальные исследования и моделирование работы устройств для энергосбережения в холодильных шкафах показали высокую эффективность. Поданы две заявки на патенты Российской Федерации – полезные модели энергосберегающих холодильных шкафов.

Результаты и их обсуждение

1. При реализации технологии приготовления и хранения полуфабрикатов высокой степени готовности, полученных при интенсивной заморозке, рекомендовано учитывать при хранении полученных изделий теплопритоки с окружающим воздухом, поступающим при открывании дверей.

2. Рекомендовано учитывать частоту и количество открываний в соответствии с графиком (рис. 1).

3. Предлагается использовать полученное аналитическое соотношение для описания потоков поступающего воздуха.

4. На основании экспериментальных исследований поставлена и решена краевая задача теплопроводности, описывающая температурное поле в объеме замороженного продукта в условиях хранения его в торговом холодильном оборудовании – холодильном шкафу-витрине.

5. После экспериментальной проверки и компьютерного исследования охлаждающего устройства разработанная математическая модель может быть рекомендована для инженерных расчетов и автоматизации качественного и безопасного хранения скоропортящихся продуктов в холодильном шкафу-витрине.

6. Полученное аналитическое решение дает возможность определить темп охлаждения (нагрева), наименьший удельный расход энергии для поддержания необходимого режима, а также выбрать оптимальное соотношение продолжительностей периодов работы и отключения холодильной машины.

Обозначения

$t(x, \tau)$ – температура, °C, K; t_1 – минимальная температура; t_2 – максимальная температура; $\Delta t = t_2 - t_1 > 0$;

x – текущая координата; R – половина толщины пластины при симметричном теплообмене тела с окружающей средой; τ – время, с; $\tau_0 = 0$ – время начала процесса; не уменьшая общности исследования проблемы, рассматриваем одинаковыми длительности циклов (периодов) процесса «нагрев – охлаждение»:

$$[0, \tau_2] = [\tau_2, \tau_4] = \dots = [\tau_{2(n-1)}, \tau_{2n}] = \Delta\tau = const,$$

$n \in N$; N – множество натуральных чисел; a – коэффициент температуропроводности, m^2/c ; k_1, k_2 – коэффициенты скорости (нагрева, охлаждения), $1/c$; $k_1 > k_2$; $f_1(\tau_1) = t_2 + (t_1 - t_2)e^{-k_1\tau_1} = t_2 - \varepsilon \approx t_2$ ($0 < \varepsilon \ll |t_2|$); $f_2(\tau_2) \approx t_1$; f_1 при $\tau_{2(n-1)} < \tau < \tau_{2n-1}$;

$$f_2 \text{ при } \tau_{2n-1} < \tau < \tau_{2n}; T = T(X, Fo) = \frac{t_{(x,\tau)} - t_1}{t_2 - t_1} -$$

безразмерная (относительная) температура; $T_i = \frac{t_i}{\Delta t}$, $i = 1, 2$; $X = \frac{x}{R}$ – безразмерная координата; $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$ – число Фурье; $Fo_i = \frac{a\tau_i}{R^2}$ ($i = 1, 2$);

$$Pd_i = \frac{k_i R^2}{a} - \text{число Предводителя, } i = 1, 2.$$

Список литературы

1. Кирпичников, В.П. Оборудование предприятий общественного питания. Т. 2: Тепловое оборудование / В.П. Кирпичников, М.И. Ботов. – М.: Издательский центр «Академия». – 2012. – 390 с.
2. Эрлихман, В.Н. Энергосбережение в технологических процессах АПК с использованием теплонаносных установок / В.Н. Эрлихман, Ю.А. Фатыхов, А.Э. Суслов. – Калининград: КГТУ, 2007. – 234 с.
3. J.H. Fezziger, M. Peric., Computational Methods for fluids Dynamics, Springer, 2013/, 426p.
4. Малахов, И.В. Использование нетрадиционных высокотемпературных теплоносителей в аппаратах с косвенным обогревом / И.В. Малахов, С.К. Осолков // Пищевые инновации и биотехнологии: сб. науч. трудов. – К.: КТИПП, 2014. – т. 1.
5. Вороненко, Б.А. К вопросу о выборе математической модели тепло- и массопереноса в объеме замороженного продукта в условиях хранения в торговом холодильном оборудовании / Б.А. Вороненко, В.С. Евреина, О.А. Цуранов // Исследование тепло- и массопереноса при холодильной обработке и хранении пищевых продуктов: межвузовский сб. науч. трудов. – Л.: ЛТИХП, 1982. – С. 313–315.
6. Колоколов, В.А. Концептуальные основы развития системы школьного питания г. Москвы / В.А. Колоколов, М.И. Ботов, А.Д. Ефимов // Материалы межрегионального семинара-совещания / КГТЭИ. – Красноярск, 2001. – С. 58–65.
7. Вороненко, Б.А. Математическое моделирование процесса теплопереноса в объеме замороженного продукта в условиях хранения в торговом холодильном оборудовании / Б.А. Вороненко, И.Г. Кобылянский, О.А. Цуранов // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2015. – № 2(32).
8. Кобылянский, И.Г. Теоретические и экспериментальные исследования утечки холодного воздуха в шкафах-витринах супермаркетов / И.Г. Кобылянский, Б.В. Голубев, А.В. Шутов // Вестник МГТУ: труды Мурман. гос. техн. ун-та. – Мурманск, 2011. – Т. 14. – № 3. – С. 502–506.
9. Модель шкафа-витрины для исследования утечек холодного воздуха: пат. 106932 РФ: МПК F17D 5/00 / Б.В. Голубев, А.В. Шутов, И.Г. Кобылянский, А.Б. Коваль; заявитель и патентообладатель Мурман. гос. техн. ун-та. – № 2011110096; заявл. 16.03.11; опубл. 27.07.2011, Бюл. № 21. – 11с.
10. Teknoterm refrigeration. Product catalogue.9.2010.

CONSIDERATION OF ADDITIONAL ENERGY CONSUMPTION IN SMALL-SIZED REFRIGERATED SALES CABINET

M.I. Botov¹, I.V. Malakhov^{1,*}, I.G. Kobylanskiy²

¹Plekhanov Russian University of Economics,
36, Stremyanny pereulok, Moscow, 117997, Russia

²Murmansk State Technical University,
13, Sportivnaya Str., Murmansk, 183010, Russia

*e-mail: kafedrates@mail.ru

Received: 29.04.2016

Accepted: 20.09.2016

One of the factors restraining production and storage of frozen and half-finished products is the high cost caused by additional operations of freezing and regeneration. Additional energy costs are determined by storage conditions. These energy costs are difficult to determine as there are no special studies on identification of additional leaks in the refrigeration apparatus when opening the doors. The energy losses are particularly significant for small-size refrigeration equipment used in food service industry and trade. At significant ratio of the door area to the volume of operating chamber specific for cooling and display cabinets the losses at door openings can amount up to 30%. Such mode of operation causes repeated-varying mode of heating-cooling of the stored products. The pulsation of temperature fields in the operating chamber caused by door openings can adversely affect the quality of stored half-finished products. The necessity of precise observation of foods storage conditions has been considered; the need of temperature pulsation recording in the apparatus operating volume when opening the doors has been shown. The experimental data characterizing the frequency of door openings are presented in the article. The experimental studies and the results of the solution of heat conductivity problem describing the temperature field in the frozen product volume under storage conditions in commercial refrigeration equipment – refrigerated sales cabinets are presented. The obtained analytical solution makes it possible to determine the rate of cooling (heating), specific energy consumption to maintain the required condition as well as to choose the optimum ratio of operating period duration and refrigerator shutdowns. A technical solution enabling to compensate the loss of cold when opening the doors is proposed.

Energy efficiency, storage condition, operating volume, temperature pulsation

References

1. Kirpichnikov V.P., Botov M.I. *Oborudovanie predpriyatij obshchestvennogo pitaniya. T.2 Teplovoe oborudovanie* [Catering industry equipment, Vol. 2 Heating equipment]. Moscow, Akademija Publ., 2012. 390 p.
2. Erlikhman V.N., Fatykhov Yu.A., Suslov A.E. *Energoberezhenie v tekhnologicheskikh protsessakh APK s ispol'zovaniem teplonosnykh ustanovok* [Energy conservation in industrial processes with AIC using heat pump installations]. Krasnojarsk, KG TU Publ., 2007. 234 p.

3. Fezziger J.H., Peric M. *Computational Methods for fluids Dynamics*, Springer, 2013. 426p.
4. Malakhov I.V., Oskolkov S.K. Ispol'zovanie netraditsionnykh vysokotemperaturnykh teplonositeley v apparatakh s kosvennym obogrevom. [The use of non-traditional high-temperature heat transfer in devices with indirect heating]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Pishchevye innovatsii i biotekhnologii"* [Proc. of the Intern. Sci. and Prac. Conf. "Food innovation and biotechnology"]. Kemerovo, 2014, pp. 273–275.
5. Voronenko B.A., Evreinova V.S., Tsuranov O.A. K voprosu o vybore matematicheskoy modeli teplo- i massoperenosa v ob"eme zamorozhennogo produkta v usloviyakh khraneniya v torgovom kholodil'nom oborudovanii [On the selection of a mathematical model of heat and mass transfer in the amount of frozen product storage conditions in the commercial refrigeration equipment]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchn. trudov "Issledovanie teplo- i massoperenosa pri kholodil'noy obrabotke i khranении pishchevykh produktov"* [Interuniversity Coll. Scien. Works "Investigation of heat and mass transfer in refrigeration processing and storage of foods."]. Leningrad, 1982, pp. 313–315.
6. Kolokolov V.A., Botov M.I., Efimov A.D. Kontseptual'nye osnovy razvitiya sistemy shkol'nogo pitaniya g. Moskvy, [Conceptual basics in development of school food system for Moscow]. *Materialy mezhregional'nogo seminara-soveshchaniya KGTEI* [Proc. of the interregional seminar-meeting, KGTEI]. Krasnoyarsk, 2001, pp. 58–65.
7. Voronenko B.A., Kobylanskiy I.G., Tsuranov O.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessa teploperenosa v ob"eme zamorozhennogo produkta v usloviyakh khraneniya v torgovom kholodil'nom oborudovanii [On the selection of a mathematical model of heat and mass transfer in the amount of frozen product storage conditions in the commercial refrigeration equipment] *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa* [Technical and technological service problems], 2015, vol. 32, no. 2, pp. 45–48.
8. Kobylanskiy I.G., Golubev B.V., Shutov A.V. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya utechki kholodnogo vozdukhа v shkafakh-vitrinakh supermarketov [Theoretical and experimental research of cold air leak in supermarket display cases] *Vestnik MGTU* [Vestnik MGTU], 2011, vol. 14, no. 3, pp. 502–506.
9. Golubev B.V., Shutov A.V., Kobylanskiy I.G., Koval' A.B. *Model' shkafa-vitriny dlya issledovaniya utechek kholodnogo vozdukhа* [Model display cases for investigation of leaks of cold air]. Patent RF, no. 106932, 2011.
10. *Teknoterm refrigeration. Product catalogue*, 2010, no. 9. Available at: <http://www.teknotherm.no/>. (accessed 5 April 2016).

Дополнительная информация / Additional Information

Ботов, М.И. Учет дополнительных затрат энергии в малогабаритной торговой холодильной витрине / М.И. Ботов, И.В. Малахов, И.Г. Кобылянский // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – Т. 43. – № 4. – С. 102-109.

Botov M.I., Malakhov I.V., Kobylanskiy I.G. Consideration of additional energy consumption in small-sized refrigerated sales cabinet. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2016, vol. 43, no. 4, pp. 102–109 (In Russ.).

Ботов Михаил Иванович

канд. техн. наук, профессор кафедры технико-экономических систем, ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова», 117997, Россия, г. Москва, Стремянный пер., 36, тел.: +7 (499) 237-83-46, e-mail: kafedrates@mail.ru

Малахов Игорь Витальевич

старший преподаватель кафедры технико-экономических систем, ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова», 117997, Россия, г. Москва, Стремянный пер., 36, +7 (499) 237-83-46, e-mail: kafedrates@mail.ru

Кобылянский Иван Григорьевич

старший преподаватель кафедры экономики, ФГБОУ ВО «Мурманский государственный технический университет», 183010, Россия, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13, тел.: +7 (499) 237-83-46, e-mail: kafedrates@mail.ru

Mikhail I. Botov

Cand.Sci.(Eng.), Professor, Department of Techno-economic systems, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny pereulok, Moscow, 117997, Russia, phone: +7 (499) 237-83-46, e-mail: kafedrates@mail.ru

Igor V. Malakhov

Senior Lecturer of the Department of Techno-economic systems, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny pereulok, Moscow, 117997, Russia, phone: +7 (499) 237-83-46, e-mail: kafedrates@mail.ru

Ivan G. Kobylanskiy

Senior Lecturer of the Department of Economics, Murmansk State Technical University, 13, Sportivnaya Str., Murmansk, 183010, Russia, phone: +7 (499) 237-83-46, e-mail: kafedrates@mail.ru

