

УДК 621.56

## Оценка изменения температуры замороженного продукта в торговом холодильном оборудовании при конвективных и кондуктивных условиях теплообмена

Канд. техн. наук, доцент **Цуранов О.А.**

канд. техн. наук, доцент **Крысин А.Г.**,

**Быкова В.В.**, jol9912@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный торгово-экономический университет (ФГБОУ ВПО)  
194021, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, д. 50

*Краткосрочное хранение замороженных продуктов в торговом зале предполагает свободный доступ покупателя, что обеспечивается холодильным оборудованием с открываемыми дверцами. Предложена методика оценки изменения температуры замороженного продукта при хранении в низкотемпературном торговом оборудовании с циклическим дискретным изменением в нем температуры воздуха при конвективных условиях теплообмена и условиях контактного теплообмена с поверхностью испарителя холодильной машины. Установлен характер изменения температурного поля замороженного продукта во времени для каждого из рассмотренных условий теплообмена. Так как при открывании дверцы витрины холодный воздух выходит из нее и замещается теплым воздухом, температурный режим хранения замороженных продуктов нарушается и тем более ощутимо, чем чаще открываются дверцы и на больший промежуток времени. Установленная амплитуда колебания температуры в объеме продукта является технологически недопустимой и требует изменения как условий хранения продуктов, так и способов регулирования холодопроизводительности компрессора холодильной машины торгового холодильного оборудования. Предложена компьютерная модель процесса для условий хранения замороженных продуктов в торговом холодильном оборудовании. В модельном эксперименте хранения замороженных продуктов установлен факт глубокого проникновения тепловой волны в продукт, что является основанием для создания систем автоматического регулирования холодопроизводительности холодильной машины при отсутствии цикличности в ее работе.*

**Ключевые слова:** продукт, заморозка, холодильная машина, испаритель, витрина, температурный режим, конвекция, контактный теплообмен.

---

## Assessment of change of temperature frozen product-tion in commercial refrigeration of equipment in convective and conductive heat transfer conditions

Ph. D. **Tsuranov O. A.**, Ph. D. **Krysin A.G.**

**Bykova V.V.**, jol9912@yandex.ru

St. Petersburg state trade and economic university (FGBOU VPO)  
194021, St. Petersburg, Novorossiyskaya St., 50

*Short-term storage of frozen food in the sales area includes free access to the buyer, which is provided with cooling equipment opens the door. An estimation method for changing the temperature of the frozen product when stored in low-temperature commercial refrigeration equipment with discrete cyclical changes of the air temperature and convective heat transfer under conditions of heat exchange contact with the surface of the evaporator of the chiller. The character of the temperature field of frozen product in time for each of the above conditions of heat exchange. As opening the door showcases cold-tion air comes out of it and is replaced by warm air, tempera-mode-temperature storage of frozen food is broken and even more significantly, the more often the door open for a longer promo zhutok time. Installed amplitude of temperature fluctuations in the volume of the product is technically unacceptable and requires a change in how the*

*conditions of storage products and methods of regulation, the cooling capacity of the compressor chiller torus traction refrigeration. Provided a computer model of the process conditions for the storage of frozen products in commercial refrigeration equipment. In a model experiment frozen food established that deep penetration of the heat wave in the product that is the basis for the creation of automatic control systems refrigerating machine in the absence of cyclicity in its work.*

**Keywords:** product, freezing, refrigerating machine, evaporator, showcase, temperature, convection heat transfer contact.

Краткосрочное хранение замороженных продуктов в торговом холодильном оборудовании предполагает свободный доступ покупателя к продукту. Он обеспечивается в основном двумя типами технического исполнения оборудования: в виде открытых прилавков и холодильным оборудованием, например, витринами шкафного типа с дверцами открываемыми покупателями. В последнем случае как, например, в низкотемпературной холодильной витрине типа Кохка-Z86-3, при открывании дверцы витрины холодный воздух выходит из нее и замещается теплым воздухом. Температурный режим хранения замороженных продуктов нарушается и тем более ощутимо, чем чаще открываются дверцы и на больший промежуток времени. При закрытых дверцах температура воздуха в холодильной витрине может быть равной  $-23 \dots -25^{\circ}\text{C}$ . На практике она поддерживается на уровне  $-12^{\circ}\text{C}$ . Эта температура является средним значением температуры воздуха в охлаждаем объеме. Она зависит от многих факторов, в том числе от способа ее регулирования.

Изменение температуры воздуха в охлаждаемом объеме витрины влияет на условия хранения продукта, определяющие в конечном итоге качество хранимого продукта. Поэтому представляет интерес разработка методики, позволяющей математически описать температурное поле продукта в условиях цикличности процесса открывания и закрывания дверей витрины. Ход температурных кривых для воздуха, поверхности продукта и его центра приведен на рисунке 1. В основу разработки методики расчёта полей температур положено представление о возможности использования методов аналитической оценки процесса охлаждения и отепления продукта, представляющего твердое тело стандартной стереометрической формы с отсутствием в его объёме фазовых переходов вода – лед.

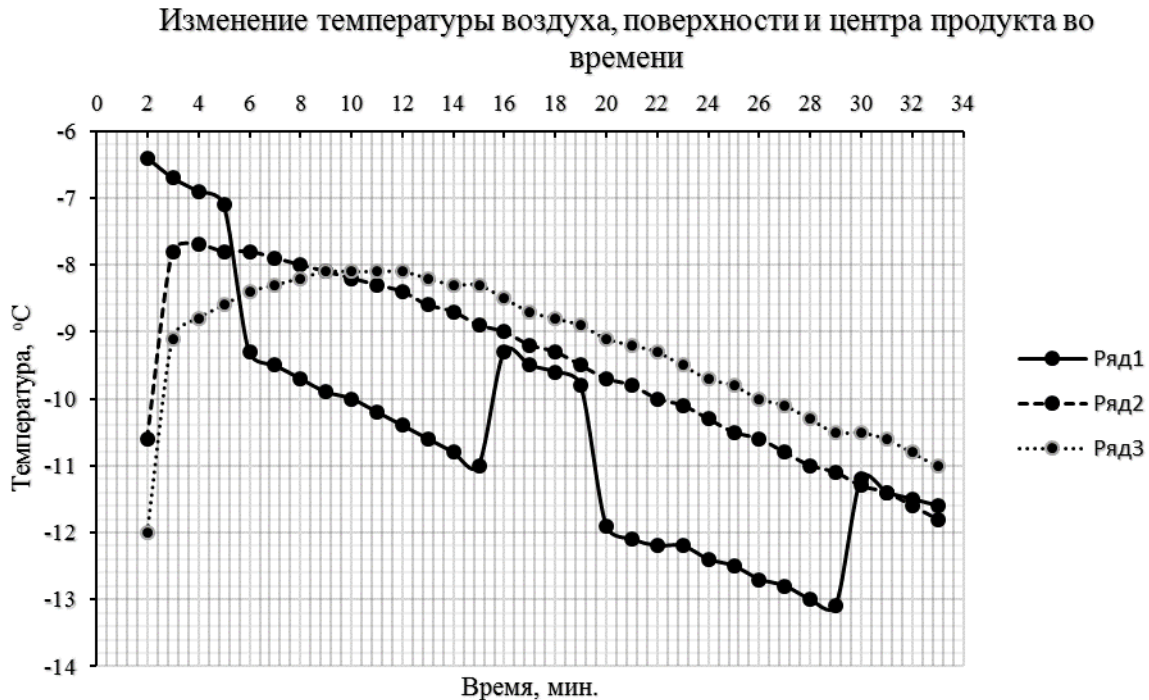
Температура воздуха при открывании дверей вновь повышается, после чего, при продолжающемся понижении температуры воздуха, наблюдается понижение температуры поверхности и центра продукта.

Для достижения исходного температурного состояния продукта, соответствующего среднеобъёмной температуре продукта  $-12^{\circ}\text{C}$ , требуется два, максимум три цикла. После этого, температура воздуха в охлаждаемом объеме достигает предельного значения, заданного в начальных условиях.

Основой регулирования температуры воздуха в охлаждаемом объеме является изменение холодопроизводительности холодильной машины посредством останковки и пуска компрессора. Вне зависимости от типа устройства применяемого для останковки и пуска компрессора холодильной машины (реле температуры или реле давления) предполагается, что этот процесс должен протекать в интервале колебаний температур воздуха  $3 \dots 6^{\circ}\text{C}$  с тем, чтобы обеспечить эксплуатационную надежность работы компрессора. Следовательно, при среднем значении температуры воздуха  $-12^{\circ}\text{C}$  максимальная амплитуда колебания температур воздуха в охлаждаемом объеме может составлять от  $-6^{\circ}\text{C}$  до  $-18^{\circ}\text{C}$ . Изменение количества вымороженной воды в продукте соответствует изменению

температуры продукта. Эту величину ( $\omega, \%$ ) можно оценить на основе выражения [23]  $\omega = 1 - \frac{t_{kp}}{t}$ . Количество

воды превратившейся в лед ( $\omega, \%$ ) при температуре продукта  $-6^{\circ}\text{C}$  составляет 83%, при  $-18^{\circ}\text{C}$  - 94%, при  $-12^{\circ}\text{C}$  - 92%.



**Рис. 1. Изменение температуры воздуха (Ряд 1), поверхности (Ряд 2) и центра продукта (Ряд 3) во времени.**

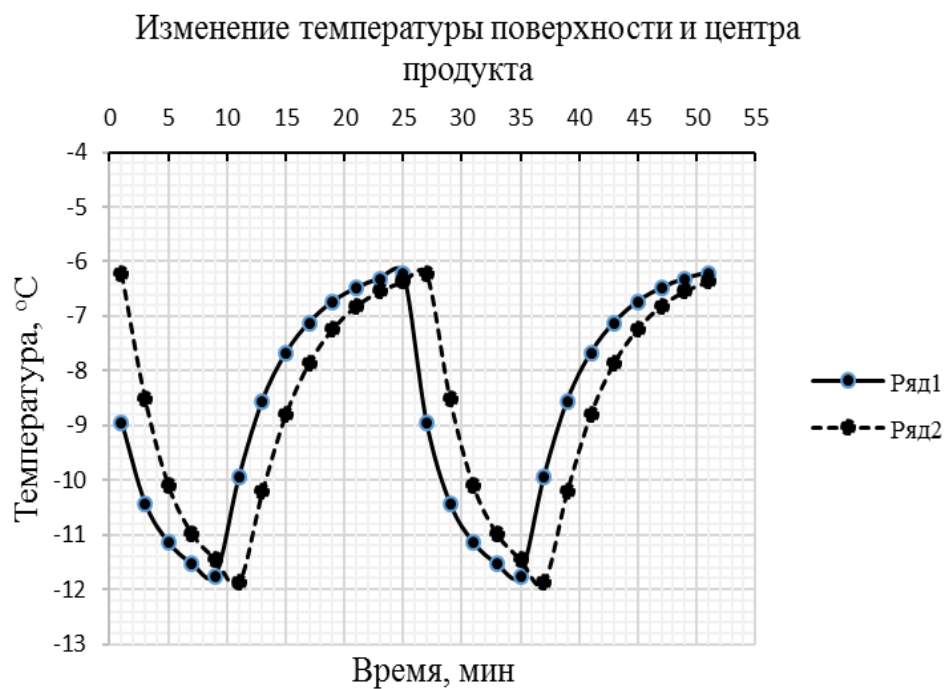
Таким образом, при любой из указанных температур воздуха в охлаждаемом объеме, продукт находится в замороженном состоянии, то есть может рассматриваться как твердое тело, в котором при изменении температуры воздуха, наблюдаются минимальные изменения количества вымороженной воды. В этом случае, с определенной долей достоверности, температурное поле замороженного продукта можно оценить на основе закономерностей, пригодных для описания охлаждения тела при дискретном изменении температуры воздуха, имитирующего процесс открывания и закрывания дверцы в холодильную витрину. При этом длительность каждой из фаз определяется достижением температуры поверхности продукта, близкой к температуре воздуха в охлаждаемом объеме [2-7, 9-12, 14, 15, 17, 21, 22].

В первой фазе охлаждения температура воздуха принимается равной  $-12^{\circ}\text{C}$ . Продукт охлаждается от температуры  $-6^{\circ}\text{C}$  до достижения температуры поверхности  $-12^{\circ}\text{C}$ .

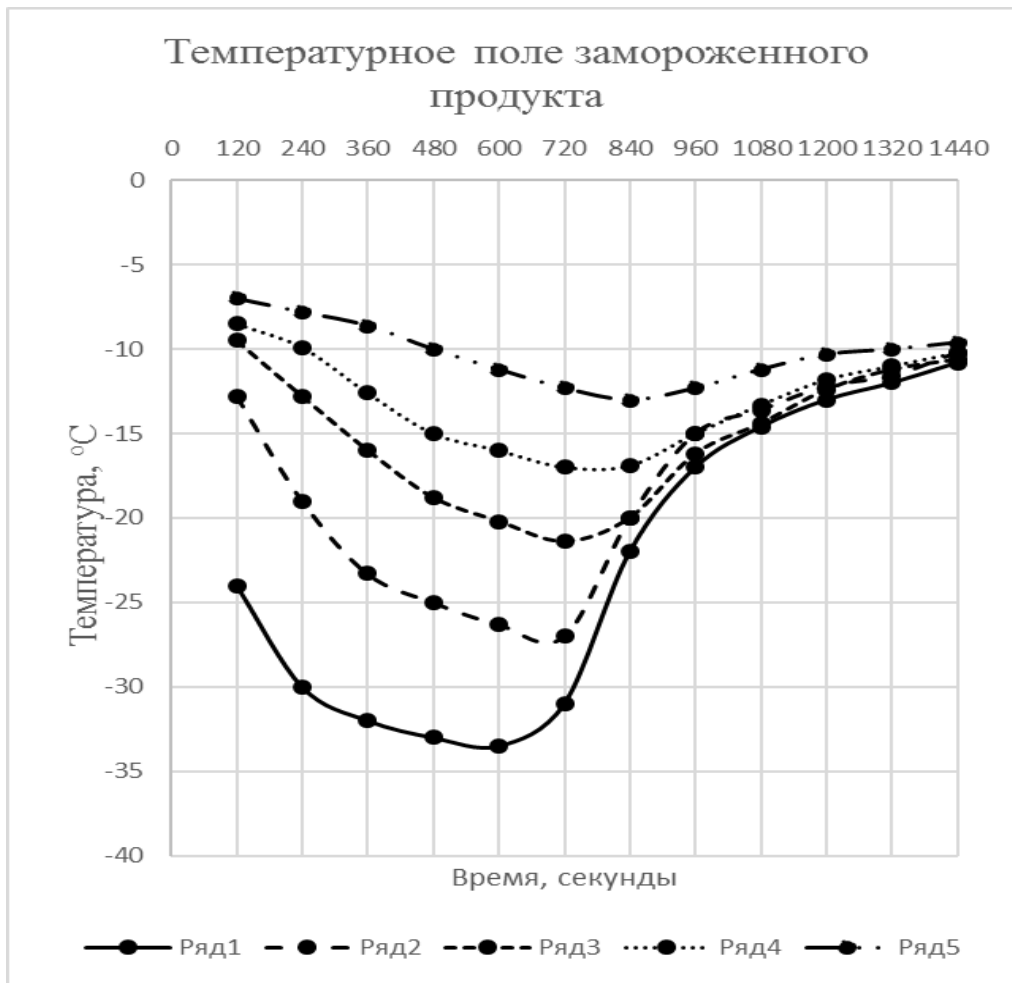
Во второй фазе температура воздуха принимается, например, равной  $-6^{\circ}\text{C}$ . Предполагается, что после открывания дверцы витрины происходит замещение холодного воздуха на теплый и температура воздуха в охлаждаемом объеме повышается до  $-6^{\circ}\text{C}$ . На этой фазе продукт отепляется от температуры минус  $12^{\circ}\text{C}$  до температуры поверхности, близкой к температуре воздуха. Скорость движения воздуха в каждой из фаз составляет соответственно  $3,0$  м/с и  $0,3$  м/с.

Компьютерная модель, описывающая отмеченные условия, позволила получить графическую зависимость, отраженную на рисунке 2. График построен для продукта в форме шара радиуса  $R=0,025$  м. Теплофизические характеристики продукта соответствуют картофелю. Длительность фазы охлаждения в условиях конкретного модельного эксперимента составила 10 минут, фазы отепления – 16 минут. Изменение температуры поверхности и центра продукта соответствуют двум дискретным постоянным значениям температуры воздуха:  $-6^{\circ}\text{C}$  и  $-12^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). Характер изменения температуры поверхности и центра продукта соответствуют логике теплообмена твердого тела в условиях охлаждения при постоянной температуре теплоотводящей среды. Колебание температуры воздуха в охлаждаемом объеме существенно ухудшают показатели качества продуктов.

При этом наблюдается миграция влаги в объеме продукта с поверхности в теплоотводящую среду, а в замороженных продуктах, кроме отмеченного, интенсифицируется рекристаллизация льда, изменяющая тканевую структуру продукта [1, 8, 13, 16, 18-20]. Поэтому, кроме рассмотренного ранее, представляет интерес более эффективный теплообмена между продуктом и теплоотводящей средой, а именно - контактный теплообмен продукта с поверхностью испарителя холодильной машины. На рисунке 3 представлено распределение температуры во времени по глубине картофельного образца, имеющего контакт с теплоотводящей поверхностью испарителя. Результаты анализа экспериментальных исследований показывают, что температурное поле в продукте соответствует колебаниям температуры теплоотводящей среды, подчиняясь закону простого гармонического колебания [24].



**Рис.2. Изменение температуры продукта во времени: поверхности (Ряд 1), центра (Ряд 2).**



**Рис.3. Температурное поле замороженного продукта (ряд 1- X=0; ряд 2- X=0,005м; ряд 3- X=0,01м.; ряд 4- X=0,015м.; ряд 5- X=0,02м.**

В теплофизике подобные процессы относятся к процессам, касающимся макроскопических тепловых волн, а, следовательно, могут рассматриваться как квазистационарные. В условиях квазистационарного режима хранения тепловая волна по глубине продукта носит затухающий характер, о чем свидетельствуют данные эксперимента. Так, при хранении картофельного образца на поверхности испарителя ( $\alpha \rightarrow \infty$ ) при работе компрессора холодильной машины с коэффициентом рабочего времени 0,4 длина тепловой волны в продукте составила 0,025 м (при коэффициенте температуропроводности продукта  $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

Амплитуды колебания температуры на расстоянии X от теплоотводящей поверхности к аналогичной величине на поверхности продукта составляет: при X = 0,005 м - 74%, при X = 0,02 м - 30% и при X = 0,04 м - 0,1%. Установленная амплитуда колебания температуры в объеме продукта является технологически недопустимой и требует изменения, как условий хранения продуктов, так и способов регулирования холодопроизводительности компрессора холодильной машины торгового холодильного оборудования.

### Выводы

1. Компьютерная модель, предложенная для условий хранения замороженных продуктов в торговом холодильном оборудовании, пригодна для качественной оценки температурного поля замороженного продукта.
2. Совершенствование компьютерной модели предполагает учет изменения температуры воздуха в охлаждаемом объеме и теплофизических свойств продукта.

3. В модельном эксперименте хранения замороженных продуктов на поверхности испарителя холодильной машины установлен факт глубокого проникновения тепловой волны в продукт, что является основанием для создания систем автоматического регулирования холодопроизводительности холодильной машины при отсутствии цикличности в ее работе.

### Список литературы

1. *Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Поляков С.В., Марков В.Н.* Постановка и решение задачи механической очистки пищевых сред. Известия высших учебных заведений. пищевая технология. 2009. № 1. с. 78-80.
2. *Бараненко А.В., Вороненко Б.А., Гусев Б.К., Пеленко В.В., Поляков С.В.* Выбор математического описания процесса охлаждения крема кондитерского в холодильной камере. Вестник красноярского государственного аграрного университета. 2008. № 5. с. 306-310.
3. *Бараненко А.В., Поляков С.В., Вороненко Б.А., Пеленко В.В.* Аналитическое решение краевой задачи теплопроводности в связи с процессом охлаждения крема кондитерского в холодильной камере // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2008. № 2. с. 1-5.
4. *Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Хатченко Е.П.* Математическая модель термообработки колбасных изделий в белковой оболочке // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2008. №1.
5. *Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Иваненко В.П., Стариков В.В.* Определение оптических характеристик пищевых продуктов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2008. № 2.
6. *Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Стариков В.В.* Математическое описание процессов тепло- и массопереноса в колбасных изделиях при их тепловой обработке // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2009. № 2.
7. *Пеленко В.В., Иваненко В.П., Крысин А.Г., Усманов И.И.* Исследование процесса уноса влаги сушеного абрикоса // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2010. № 1
8. *Вороненко Б.А., Демидов С.Ф., Иваненко В.П., Крысин А.Г., Пеленко В.В., Усманов И.И.* Моделирование процесса радиационно-конвективной сушки пищевых материалов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2010. № 1.
9. *Демидов С.Ф., Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Демидов А.С.* Сушка листьев петрушки инфракрасным излучением // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 3.
10. *Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Поляков С.В.* Тепломассоперенос в креме кондитерском при его охлаждении в холодильной камере // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2012. № 1.
11. *Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Поляков С.В.* К вопросу об описании гидромеханического процесса осаждения твердых частиц в жидкой среде // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 4.
12. *Пеленко В.В., Дайнеко К.Э., Иваненко В.П., Крысин А.Г., Пеленко Ф.В., Кайка А.Х., Тарабановский Ф.Б.* Учет сил поверхностного натяжения в математической модели тепло-массопереноса при осушке поверхностной влаги сухофруктов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 4
13. *Демидов С.Ф., Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Демидов А.С., Еловик Д.К.* Осциллирующий режим сушки шинкованной моркови инфракрасным излучением // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 4.
14. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. Гос. издат. Технич. Литературы. М.: 1952. 392с.
15. *Чижов Г.Б.* Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. Издательство «Пищевая промышленность», М: Москва, 1971. 280с.

## References

1. Voronenko B.A., Pelenko V.V., Polyakov S.V., Markov V.N. Postanovka i reshenie zadachi mekhanicheskoi ochistki pishchevykh sred. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. pishchevaya tekhnologiya. 2009. № 1. s. 78-80.
2. Baranenko A.V., Voronenko B.A., Gusev B.K., Pelenko V.V., Polyakov S.V. Vybor matematicheskogo opisaniya protsessa okhlazhdeniya krema konditerskogo v kholodil'noi kamere. Vestnik krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2008. № 5. s. 306-310.
3. Baranenko A.V., Polyakov S.V., Voronenko B.A., Pelenko V.V. Analiticheskoe reshenie kraevoi zadachi teporprovodnosti v svyazi s protsessom okhlazhdeniya krema konditerskogo v kholodil'noi kamere // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv». 2008. № 2. s. 1-5.
4. Voronenko B.A., Pelenko V.V., Khatchenko E.P. Matematicheskaya model' termoobrabotki kolbasnykh iz-deliy v belkovo obolochke // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv». 2008. №1.
5. Voronenko B.A., Pelenko V.V., Ivanenko V.P., Starikov V.V. Opredelenie opticheskikh kharakteristik pishchevykh produktov // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv». 2008. № 2.
6. Voronenko B.A., Pelenko V.V., Starikov V.V. Matematicheskoe opisanie protsessov teplo- i massoperenosa v kolbasnykh izdeliyakh pri ikh teplovoi obrabotke // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv». 2009. № 2.
7. Pelenko V.V., Ivanenko V.P., Krysin A.G., Usmanov I.I. Issledovanie protsessa unosa vlagi sushenogo abrikosa // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv». 2010. № 1
8. Voronenko B.A., Demidov S.F., Ivanenko V.P., Krysin A.G., Pelenko V.V., Usmanov I.I. Modelirovanie protsessa radiatsionno-konvektivnoi sushki pishchevykh materialov // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv». 2010. № 1.
9. Demidov S.F., Voronenko B.A., Pelenko V.V., Demidov A.S. Sushka list'ev petrushki infrakrasnym izlucheniem // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv». 2014. № 3.
10. Voronenko B.A., Pelenko V.V., Polyakov S.V. Teplomassoperenos v kreme konditerskom pri ego okhlazhdenii v kholodil'noi kamere // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv». 2012. № 1.
11. Voronenko B.A., Pelenko V.V., Polyakov S.V. K voprosu ob opisaniy gidromekhanicheskogo protsessa osazhdeniya tverdykh chastits v zhidkoi srede // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv». 2013. № 4.
12. Pelenko V.V., Daineko K.E., Ivanenko V.P., Krysin A.G., Pelenko F.V., Kaika A. Kh., Tarabanovskii F.B. Uchet sil poverkhnostnogo natyazheniya v matematicheskoi modeli teplo-massoperenosa pri osushke poverkhnostnoi vlagi sukhofruktov // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv». 2013. № 4
13. Demidov S.F., Voronenko B.A., Pelenko V.V., Demidov A.S., Elovik D.K. Ostsilliruyushchii rezhim sushki shinkovannoi morkovi infrakrasnym izlucheniem // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv». 2014. № 4.
14. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti. Gos. izdat. Tekhnich. Literatuy. M.: 1952. 392s.
15. Chizhov G.B. Teplofizicheskie protsessy v kholodil'noi tekhnologii pishchevykh produktov. Izdatel'stvo "Pishchevaya promyshlennost'", M: Moskva, 1971. 280s.