

УДК 664.656. 3

## Анализ аппаратурно-технологических факторов процесса охлаждения хлебобулочных изделий

**Пастухов А.С.**, artem.pastukhov1984@gmail.com

**Богатырев А.В.**, bogatyrev@refriger.ru

канд. техн. наук **Данин В.Б.**, vldimir.danin@gmail.com

д-р техн. наук **Балубаш В.А.**, artem.pastukhov1984@gmail.com

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*В статье рассмотрен процесс охлаждения хлебобулочных изделий на спиральном конвейере («кулере»). Основной задачей управления таким многофакторным объектом является достижение определенной температуры в центре изделия путем поддержания температуры охлаждающего воздуха вблизи поверхности буханки в заданных пределах  $t \pm \Delta t$ , его скорости  $v \pm \Delta v$  и влажности  $\phi \pm \Delta \phi$ , а также поддержания скорости конвейера в пределах  $v_k \pm \Delta v_k$  при условии, что усушка для каждого вида изделия не превысит величины указанной ГОСТ. Одновременное воздействие по нескольким каналам управления позволяет подбирать оптимальное для процесса охлаждения сочетание команд управления, получая на выходе из «кулера» продукт с заданными температурой и массой. Для выбора канала управления был проведен анализ аппаратурно-технологических параметров процесса, определены номинальные значения и диапазоны варьирования основных возмущающих и управляющих воздействий. В ходе исследования выявлено, что скорость и температура обдуваемого продукт воздуха оказывают наибольшие влияния на отклик выходного параметра (температуру поверхности изделия) при возникновении возмущающих воздействий. Рассмотрена возможность применения программно-логического контроллера в системе контроля и регулирования технологического процесса охлаждения хлебобулочных изделий.*

**Ключевые слова:** хлеб, кулер, теплообмен, программно-логический контроллер

---

## Bakery products cooling factors apparatus-technological analysis

**Pastukhov A.S.**, artem.pastukhov1984@gmail.com

**Bogatyrev A.V.**, bogatyrev@refriger.ru

Ph.D., **Danin V.B.**, vldimir.danin@gmail.com

D.Sc. **Balubash V.A.**, artem.pastukhov1984@gmail.com

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*The article describes the process of the bakery products cooling on the spiral conveyor ("cooler"). The main*

*task of managing such a multifactorial object is to reach a certain temperature in the center of the product by maintaining the temperature of the cooling air near the surface of the loaf to set limits  $t \pm \Delta t$ , its velocity  $v \pm \Delta v$  and humidity  $\varphi \pm \Delta \varphi$ , as well as maintaining the conveyor speed within  $v_k \pm \Delta v_k$  at the condition that shrinkage for each type of product should not exceed the specified by GOST. Simultaneous exposure to multiple channels of control allows to select the optimal combination of process cooling control commands, yielding the product with given temperature and mass. For the selection of a control channel the process parameters were analyzed and the nominal values and ranges of variation of the main disturbing and control actions were defined.*

*The study found that the velocity and temperature of air blowing product have the greatest effect on the response of the output parameter (surface temperature of the product) in the event of disturbances. The possibility of using of program-logical control system is observed.*

*Key words:* bread, cooler, heat transfer, logic controller.

В условиях современных рыночных отношений производители пищевой продукции сталкиваются с необходимостью выполнять ряд требований, связанных как с рациональным использованием ресурсов [1], так и с внедрением новых технологий [2] при производстве традиционных изделий [3] и продуктов функционального назначения [4] или их компонентов [5], [6]. Многие десятилетия для сохранения свежести изделий пищевых продуктов применяется охлаждение [7], реализуемое различными способами. Проблема охлаждения хлебобулочных изделий на предприятиях хлебопекарной промышленности также решается различными способами в зависимости от располагаемых средств, производственных площадей, объемов производства [8], а также лимита энергоресурсов [9]. Помимо поддержания свежести, быстрое охлаждение позволяет сократить усушку хлебобулочных изделий [10].

Всё чаще на крупных предприятиях для этой цели используются «кулеры». «Кулер» представляет собой спиральную конвейерной систему, расположенную в камере из теплоизоляционного материала. За счет действия потоков холодного воздуха и поддержания необходимого количества влаги в рабочей камере «кулера» происходит охлаждение свежесвыпеченного хлеба. Продукт проходит по всем ярусам с нижнего до верхнего. С верхнего яруса охлажденная продукция сыпается или в приемный бункер или подается по дополнительному транспортеру на весовой стол, аппарат нарезки или фасовочный аппарат.

Основной задачей управления таким многофакторным объектом является достижение определенной температуры в центре изделия путем поддержания температуры охлаждающего воздуха вблизи поверхности буханки в заданных пределах  $t \pm \Delta t$ , его скорости  $v \pm \Delta v$  и влажности  $\varphi \pm \Delta \varphi$ , а также поддержания скорости конвейера в пределах  $v_k \pm \Delta v_k$  при условии, что усушка для каждого вида изделия не превысит величины указанной ГОСТ [9]. Одновременное воздействие по нескольким каналам

управления позволяет подбирать оптимальное для процесса охлаждения сочетание команд управления, получая на выходе из «кулера» продукт с заданными температурой и массой[10]. Очевидно, что для наиболее эффективного управления данным технологическим процессом необходимо знание влияния аппаратурно-технологических параметров процесса.

В таблице 1 представлены результаты анализа технической документации на оборудование спирального конвейера, а также анализ производственных ситуаций, присущих данному процессу и которые могут возникнуть на предприятии. Цель проведенного анализа заключается в определении номинальных значений и диапазона варьирования основных возмущающих и управляющих воздействий[11]. В результате исследования было также установлено влияние каждого воздействия на выходные параметры.

Анализ проводился с использованием технической и технологической документации, а также результатов экспериментов, проведенных в разное время на спиральном конвейере.

Таблица 1

Факторы процесса охлаждения хлебобулочных изделий (каналы управления)		Единицы измерения	Ориентировочное среднее (номинальное значение)	Технологический интервал отклонений от среднего значения	
				от	до
Управляемые	Температура воздуха	°С	22	-2,0	+4,0
	Скорость воздуха	м/с	0,5	-0,5	+2,5
	Относительная влажность воздуха	%	50	-10	+10

В результате анализа установлено:

*Температура обдуваемого изделие воздуха оказывает определенное влияние на скорость охлаждения (время достижения температуры 30 °С в центре мякиша изделия) (рис. 1).*

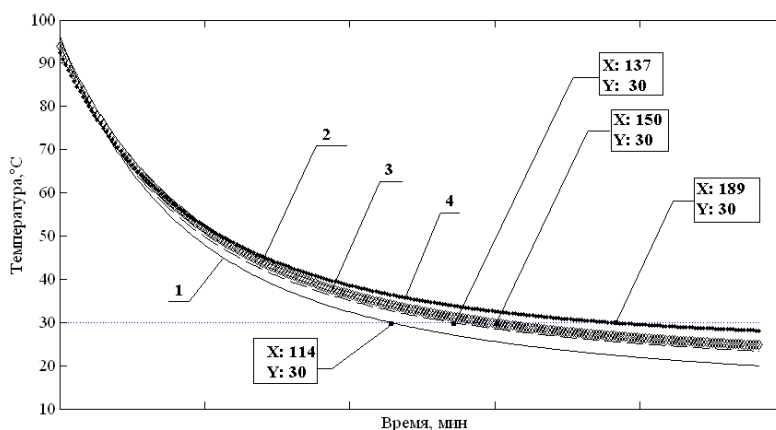


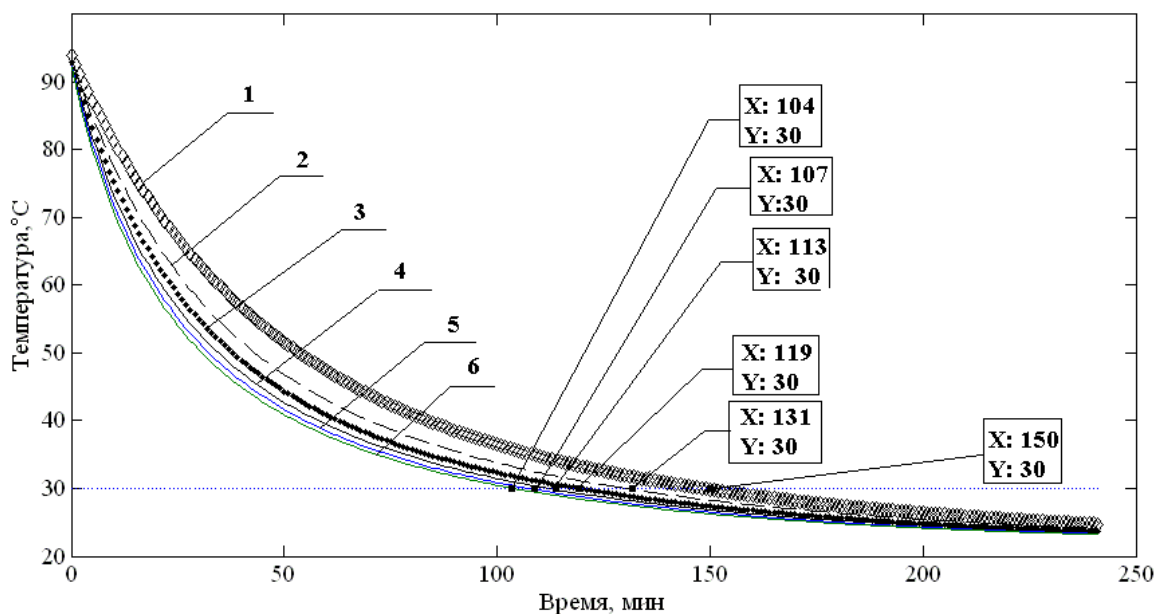
Рис. 1. Графики температуры в центре буханки во время охлаждения при скорости обдува 0.5 м/с . Температуры обдувающего продукт воздуха 15 °С (1), 20 °С (2), 22 °С (3), 26 °С (4).

Увеличение температуры обдувающего продукт воздуха на 4 °С приводит к увеличению времени необходимого для достижения 30 °С в центре мякиша на 26% . Понижение температуры воздуха на 7 °С приводит к сокращению требуемого времени на 24 % (табл. 2).

Таблица 2

Температура обдувающего продукт воздуха, м/с	Время, необходимое для достижения 30 °С в центре мякиша, мин	Время, необходимое для достижения 30 °С в центре мякиша, %
15	114	76
20	137	91
22	150	100
26	189	126

Скорость обдувающего изделие воздуха оказывает значительное влияние на время



достижения 30 °С в центре мякиша (рис. 2).

Рис. 2. Графики температуры в центре буханки во время охлаждения при температуре 22 °С. Скорости обдувающего продукт воздуха 0,5 м/с (1), 1 м/с (2), 1.5 м/с (3), 2 м/с (4), 2,5 м/с (5), 3 м/с (6).

Так при увеличении скорости воздуха на 0,5 м/с, уменьшается время достижения 30 °С в центре мякиша на 13%, а увеличение скорости воздуха на 2,5 м/с уменьшает время охлаждения на 31% (Табл. 3)

Таблица 3

Скорость обдувающего продукт воздуха, м/с	Время, необходимое для достижения 30 °С в центре мякиша, мин	Время, необходимое для достижения 30 °С в центре мякиша, %
0,5	150	100
1	131	87
1,5	119	79
2	113	75
2,5	107	71
3	104	69

Относительная влажность воздуха оказывает минимальное влияние на время достижения 30 °С в центре мякиша (рис. 3).

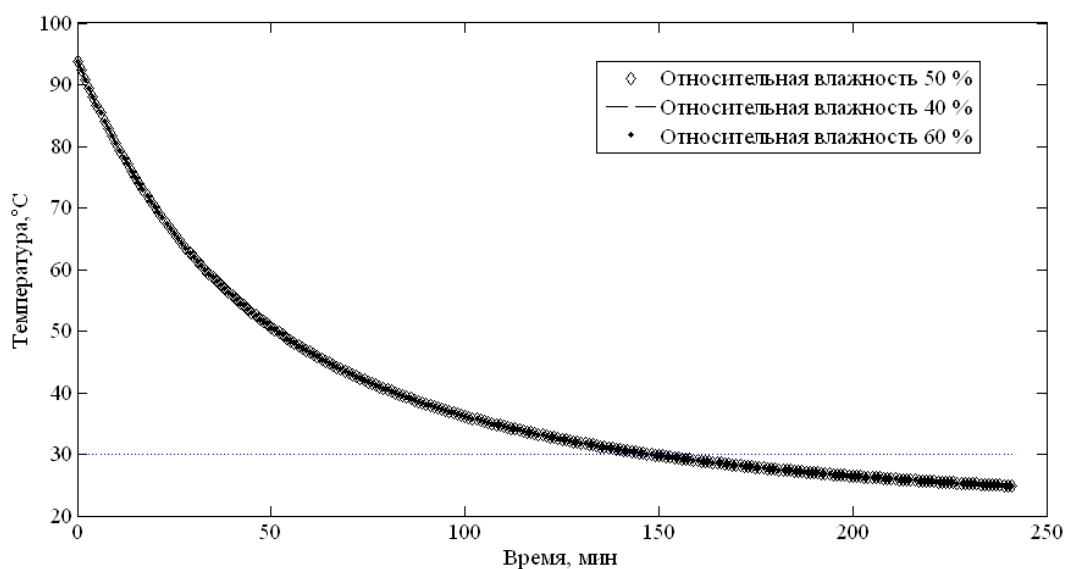


Рис. 3. Графики температуры в центре буханки во время охлаждения при температуре 22 °С в зависимости от относительной влажности обдувающего продукт воздуха.

Анализ представленных выше данных показывает, что при управлении конвейерной установкой охлаждения хлебобулочных изделий имеются широкие возможности компенсации влияния на конечный продукт отклонений неуправляемых внешних, внутренних и параметрических возмущений изменением управляющих воздействий в диапазонах, представленных в таблице 1. Эту задачу может выполнить контур регулирования «по отклонению», в котором измеренные первичным преобразователем отклонения температуры от номинального значения устраняются регулятором, воздействием по одному из каналов управления.

Проведенный анализ также показал, что наибольшие влияния на отклик выходного параметра оказывает и реализует оперативное управляющее воздействие скорость и температура обдувающего продукт воздуха. Поэтому в разрабатываемой системе именно параметры выбраны в качестве каналов управления.

В структуре системы управления аппаратурно-технологическим комплексом (АТК) охлаждения хлебобулочных изделий снижение времени запаздывания может быть обеспечено введением оперативного предвычисления изменения поверхности изделия, поступающего на охлаждение и, соответственно, внесение коррекции в систему управления [12].

Повышение регулирующего воздействия при отклонении температуры поверхности готового продукта может быть обеспечено суммарным воздействием каналов управления, формирующих параметр температуры поверхности изделия [13]. Для организации структуры такой многоканальной системы управления необходимо провести оценку уровней влияния на параметр температуры поверхности в виде безразмерных коэффициентов формирования температуры поверхности хлебобулочных изделий ( $K_{фг}$ ):

$$K_{фг} = \frac{\Delta W / W_n}{\Delta S / S_n} \quad (1)$$

где  $\Delta W$  – изменение значения температуры поверхности готового продукта, вызванное изменением возмущающего фактора, %;  $W_n$  – номинальное значение температуры поверхности готового продукта, %;  $\Delta S$  – изменение значения фактора формирования параметра температуры;  $S_n$  – номинальное (технологическое) значение фактора формирования параметра температуры.

При составлении программ основные зависимости между виртуальными органами управления, оборудованием, приборами контроля должны быть представлены в виде формул, графиков, циклограмм или сопровождаться подробным словесным описанием [14].

На рисунке 4 представлены графики экспериментальных и вычисленных значений изменения температуры в центре мякиша и на поверхности буханки во время охлаждения изделия. Эксперименты проводились над хлебом, произведенным в лаборатории и имеющим форму параллелепипеда т.е. форму наиболее «неблагоприятной» с точки зрения тепло- и массообмена[15]. Вычисления производились при помощи разработанной авторами вычислительной системы [16] на основе математической модели с учетом теплопроводности охлаждаемых изделий[17]. Видно, что экспериментальные и расчётные графики изменения температуры на поверхности буханки близки друг к другу и почти одинаковы. В тоже время, графики температуры в центре мякиша отличаются друг от друга. Это указывает на недостаток в

точности определения тепловой диффузии в модели  $\frac{\alpha(T)}{\rho_b c_{pb}(T)}$  [18].

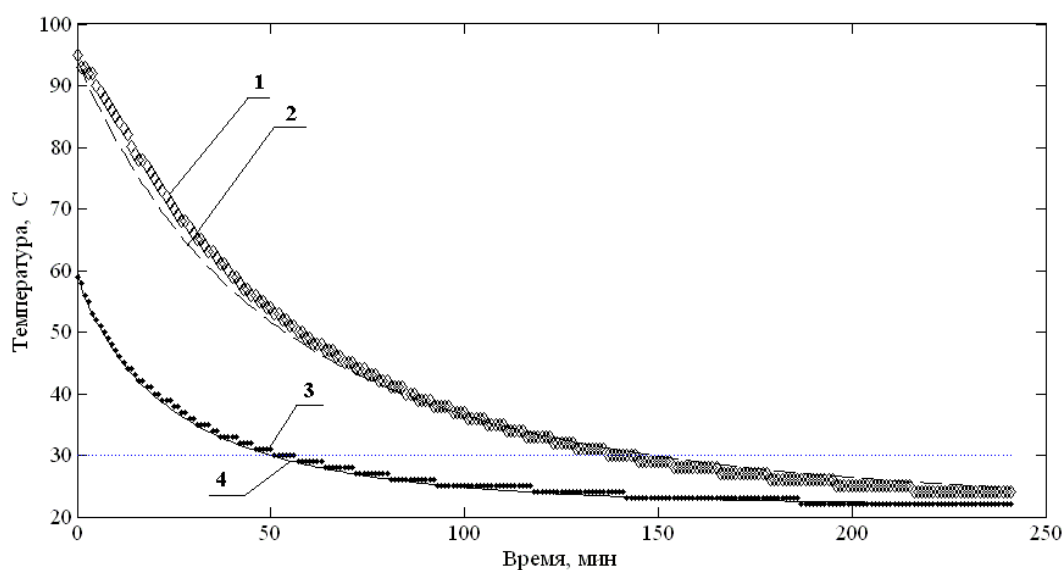


Рис. 4. Экспериментальная (1) и расчетная (2) температуры в центре буханки, и экспериментальная (3) и расчетная (4) температуры на поверхности буханки во время охлаждения при температуре 22 °С. Скорость воздуха 0,5 м/с.

Для определения количественного расхождения модели с экспериментальными данными используется среднеквадратичное отклонение между измеренными и вычисленными значениями изменения температуры во время охлаждения в центре буханки и на поверхности.

$$m_{\text{центр}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_{\text{exp}} - T_{\text{cal}})^2} = 14.44 \quad (2)$$

$$m_{\text{поверхн}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_{\text{exp}} - T_{\text{cal}})^2} = 5.96, \quad (3)$$

где

$T_{\text{exp}}$ ,  $T_{\text{cal}}$  - экспериментальные и вычисленные значения температур соответственно.

$N$  – число точек измерения.

Применение программно-логического контроллера в качестве управляющего устройства позволяет создать систему управления любой сложности [19]. Добиться такой точности можно только с применением современных технических средств регулирования. Практически все производители контроллеров и комплексов программирования предоставляют разработчику библиотеку регуляторов, в которую традиционно входит ПИД-регулятор. Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор – наиболее эффективный и распространенный вид регулятора, обеспечивающий достаточно высокую точность при управлении различными процессами.

На российском рынке средств автоматизации особой популярностью пользуются недорогие, но очень функциональные и надёжные ПЛК производства компании ОВЕН[20]. Данные ПЛК программируются в соответствии со стандартом МЭК 61131, в среде программирования CoDeSys [21].

Обобщая результаты работы. Можно отметить, что в ходе проведенного исследования выполнен анализ аппаратурно-технологических факторов процесса охлаждения хлебобулочных изделий, произведена количественная оценка степени влияния технологических факторов на время достижения  $30^{\circ}\text{C}$  в центре мякиша охлаждаемого изделия. Проведены экспериментальные и теоретические исследования процесса. Построена математическая модель процесса охлаждения. Модель показала хорошую сходимость с результатами экспериментов.

Анализ и разработанная модель позволили составить алгоритм вычисления значений температуры и скорости обдувающего продукт воздуха. Данный алгоритм применяется в работе программируемого логического контроллера системы управления технологическим процессом охлаждения хлебобулочных изделий различного ассортимента.



### Список литературы

1. Верболоз Е.И., Алексеев Г.В. Современные подходы к рациональному использованию ресурсов при первичной обработке пищевого сырья // Вестник Международной академии холода. 2003. № 4. с. 35-39.
2. Цесь Ю.В., Васильева Ж.В. Разработка технологии очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий с помощью биофлокулянтов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2014. № 1.
3. Верболоз Е.И., Кондратов А.В., Кравцова Е.В. Возможные пути совершенствования измельчителя для фруктов и овощей // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2. С. 13.
4. Минаева Л.В., Алексеев Г.В. Особенности процесса динамической экструзии при производстве высокобелковых продуктов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. №2.
5. Минаева Т.В., Алексеев Г.В. Устройство для длительного хранения цитрусовых плодов с минимизацией потерь при охлаждении // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. №2.
6. Пастухов А.С., Данин В.Б. Общие сведения об охлаждении хлеба // Известия СПбГУНиПТ. 2007. № 1. С. 37-41.
7. Громцев С.А., Громцев А.С., Червяков О.М. Особенности производства ржано-пшеничного хлеба в полевых условиях // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2. С. 21.
8. Пастухов А.С., Данин В.Б. Современные методы борьбы с усушкой хлебобулочных изделий // Известия СПбГУНиПТ. 2006. № 1. С. 88-90.
9. Данин В.Б., Пастухов А.С. Механизм естественного усыхания хлебобулочных изделий. Борьба с потерей массы продукта // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2009. № 1.
10. Пастухов А.С., Данин В.Б. Разработка системы стабилизации параметров процесса охлаждения хлебобулочных изделий в автоматизированной системе управления технологическим процессом хлебопекарного производства. Параметрическая схема объекта управления // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2.
11. Стегалищев, Ю.Г. Технологические процессы пищевых производств. Структурно-параметрический анализ объектов управления: Учеб. Пособие / Ю.Г. Стегалищев, В.А. Балюбаш, В.Н. Заморашкина. – Ростов н/Д : Феникс, – 2006. – 254 с.
12. Брусиловский Л.П., Вайнберг А.Я. АСУТП цельномолочных и молочно-консервных производств. М.: «Колос», 1993. – 300 с.

13. Балюбаш В.А. и др. Структура многоканальной системы управления процессом сушки молочных продуктов / В.А. Балюбаш, С.Е. Алёшичев, В.А. Добряков // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 2.
14. Балюбаш В.А., Алёшичев С.Е., Бриденко И.И. Компьютерное моделирование аппаратурно-технологических комплексов пищевой промышленности // Вестник Международной академии холода. 2013. № 2. С. 67-68.
15. Пастухов А.С., Данин В.Б. Процесс конвективного охлаждения хлебобулочных изделий как объект исследования // Известия Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий. 2008. № 2. С. 17-18.
16. Данин В.Б., Пастухов А.С. Разработка вычислительной системы параметров процесса охлаждения хлебобулочных изделий на основе математического моделирования // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2012. № 1. С. 22
17. Данин В.Б., Пастухов А.С. Аналитическое выражение коэффициента теплопроводности в процессе охлаждения хлебобулочных изделий // Вестник Международной академии холода. 2011. № 2. С. 50-55.
18. Pastukhov A., Danin V. Model development for fresh baked bread natural and forced cooling. В сборнике: 6th Baltic Conference on Food Science and Technology: Innovations for Food Science and Production, FOODBALT-2011 -Conference Proceedings 2011. С. 209-214.
19. Камалов Ф.А., Пастухов А.С., Данин В.Б. Исследование процесса стерилизации консервной продукции с применением программно-логического контроллера // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 1.
20. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и инструменты // Под ред. проф. В. П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 256 с: ил.
21. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys V2.3. – Смоленск: ПК "Пролог", 2004. – 423 с.

### References

1. Verboloz E.I., Alekseev G.V. Modern approaches to rational use of resources when preprocessing food raw materials // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2003. № 4. p. 35-39.

2. Ces' Ju.V., Vasil'eva Zh.V. Development of technology of sewage treatment of the fish processing enterprises with the help bioflokuljantov // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Jekonomika i jekologicheskij menedzhment»*. 2014. № 1.
3. Verboloz E.I., Kondratov A.V., Kravcova E.V. Possible ways of improvement of a grinder for fruit and vegetables // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2013. № 2. p. 13.
4. Minaeva L.V., G.V. Alekseev. Features of process of dynamic extrusion by production of high-proteinaceous products // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2013. №2.
5. Minaeva T.V. G.V. Alekseev. The device for long storage of citrus fruits with minimization of losses when cooling // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2013. №2.
6. Pastuhov A.S., Danin V.B. General information about bread cooling // *Izvestija SPbGUNIPT*. 2007. № 1. p. 37-41.
7. Gromcev S.A., Gromcev A.S., Chervjakov O.M. Features of production of rye white bread in field conditions // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2013. № 2. p. 21.
8. Pastuhov A.S., Danin V.B. Modern methods of fight against shrinkage of bakery products // *Izvestija SPbGUNIPT*. 2006. № 1. p. 88-90.
9. Danin V.B., Pastuhov A.S. Mechanism of a natural usykhanije of bakery products. Fight against loss of mass of a product // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2009. № 1.
10. Pastuhov A.S., Danin V.B. Development of the system of stabilization of parameters of process of cooling of bakery products in an automated control system for technological process of baking production. Parametrical scheme of object of management // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2013. № 2.
11. Stegalishhev, Ju.G. Technological processes of food productions. Structural and parametrical analysis of objects of an upravleniyaupravleniye: Ucheb. Posobie / Ju.G. Stegalishhev, V.A. Baljubash, V.N. Zamorashkina. – Rostov n/D : Feniks, – 2006. – 254 p.
12. Brusilovskij L.P., Vajnberg A.Ja. ASUTP of whole-milk and concentrated milk productions. – M.: «Kolos», 1993. – 300 s.
13. Baljubash V.A.i dr. Structure of multichannel system of an upraleniye процессoc drying of dairy products /V.A. Baljubash, S.E. Aljoshichev, V.A. Dobrjakov // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2013. № 2.
14. Baljubash V.A., Aljoshichev S.E., Bridenko I.I. Computer modeling of hardware and technological complexes of the food industry // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2013. № 2. p. 67-68.

15. Pastuhov A.S., Danin V.B. Process of convective cooling of bakery products as object of research // *Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta nizektemperaturnyh i pishhevyyh tehnologij*. 2008. № 2. p. 17-18.
16. Danin V.B., Pastuhov A.S. Development of the computing system of parameters of process of cooling of bakery products on the basis of mathematical modeling // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyyh proizvodstv»*. 2012. № 1. p. 22
17. Danin V.B., Pastuhov A.S. Analytical expression of coefficient of heat conductivity in the course of cooling of bakery products // *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2011. № 2. p.50-55.
18. Pastukhov A., Danin V. Model development for fresh baked bread natural and forced cooling. V sbornike: 6th Baltic Conference on Food Science and Technology: Innovations for Food Science and Production, FOODBALT-2011 -Conference Proceedings 2011. p. 209-214.
19. Kamalov F.A., Pastuhov A.S., Danin V.B. Research of process of sterilization of canning production with use of the program and logical controler // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyyh proizvodstv»*. 2014. № 1.
20. Petrov I.V. Programmable controlers. Standard languages and tools // Pod red. prof. V. P. D'jakonova. – M.: SOLON-Press, 2003. – 256 p: il.
21. The user's guide to PLK programming in CoDeSys V2.3. – Smolensk: PK "Prolog", 2004. – 423 p.