

М. В. Вотинов, М. А. Ершов, А. А. Маслов

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ РЫБЫ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССАМИ ЕЁ НАГРЕВА И ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

На малогабаритной сушильной установке, созданной в Мурманском государственном техническом университете, исследовались положительные и отрицательные стороны традиционных способов тепловой обработки рыбы – конвективного и инфракрасного. Диапазон значений температуры в процессе исследования соответствовал значениям температуры технологических процессов сушки, вяления и горячего копчения рыбы (20–120 °С). Сырьё – образцы путассу (удельная поверхность 0,2 м<sup>2</sup>/кг, средняя масса 280 г). Приводятся параметры процесса (начальная и конечная масса; массопотери; продолжительность; средний темп обезвоживания; средняя подаваемая мощность; затраты электроэнергии) при 30, 50 и 80 °С. При конвективном способе температура поверхности рыбы так и не достигла 50 °С. Продолжительность эксперимента составила 6,5 часа, средний темп обезвоживания – 37,8 %/ч, затраты электроэнергии – 6,6 кВт · ч. При инфракрасной обработке заданная температура поддерживалась и на поверхности рыбы, и в самой термокамере примерно в течение часа, затем температура в термокамере начинала падать в связи с прогревом рыбы и, как следствие, уменьшением необходимой мощности инфракрасных ламп. Продолжительность эксперимента составила 5 часов, средний темп обезвоживания – 51 %/ч, затраты электроэнергии – 5,6 кВт · ч. Полученные данные стали основой для разработки энергоэффективного комбинированного способа тепловой обработки, реализуемого с использованием двухконтурной системы автоматического управления: первый контур контролирует температуру в термокамере и управляет мощностью трубчатого электронагревателя, второй контролирует температуру поверхности рыбы и управляет мощностью инфракрасного излучения. Способ характеризуется более высоким средним темпом обезвоживания (51 %/ч), меньшей длительностью процесса (чуть более 4-х часов) и более низкими затратами электроэнергии (4,86 кВт · ч). Установлено, что чем выше температура тепловой обработки сырья, тем менее энергозатратным будет комбинированный способ.

**Ключевые слова:** тепловая обработка рыбы, конвективный способ обработки, инфракрасный способ обработки, энергоэффективный способ обработки, автоматизация, управление.

### Введение

**Состояние проблемы.** Пищевая рыбная промышленность в России неуклонно развивается. Динамика производства рыбы и рыбных продуктов (переработанных и консервированных) имеет положительную тенденцию на протяжении последних лет. Так, в 2015 г. этот показатель, по данным Федеральной службы государственной статистики, составил 3 819 тыс. т [1]. Прирост, по сравнению с 2010 г., составил более 270 тыс. т (рис. 1).

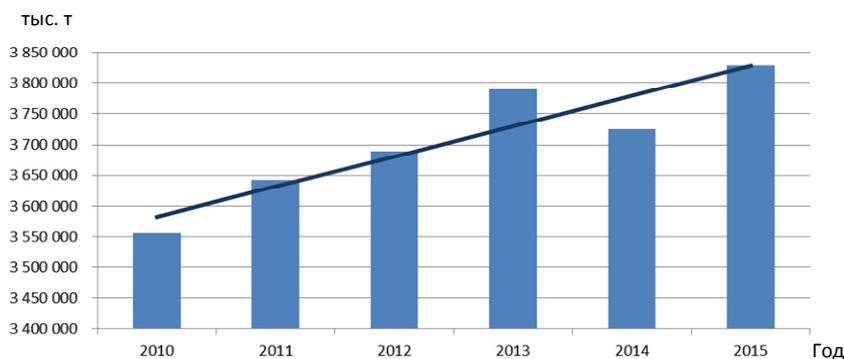


Рис. 1. Производство рыбы и рыбных продуктов (переработанных и консервированных) в России

Вместе с тем производство рыбной продукции, связанное с её тепловой обработкой, не имеет таких темпов роста. Выделяя среди тепловых процессов процессы сушки, вяления и копчения рыбы, можно утверждать, что с 2010 г. темпы объёмов производства не изменились [1] (рис. 2).

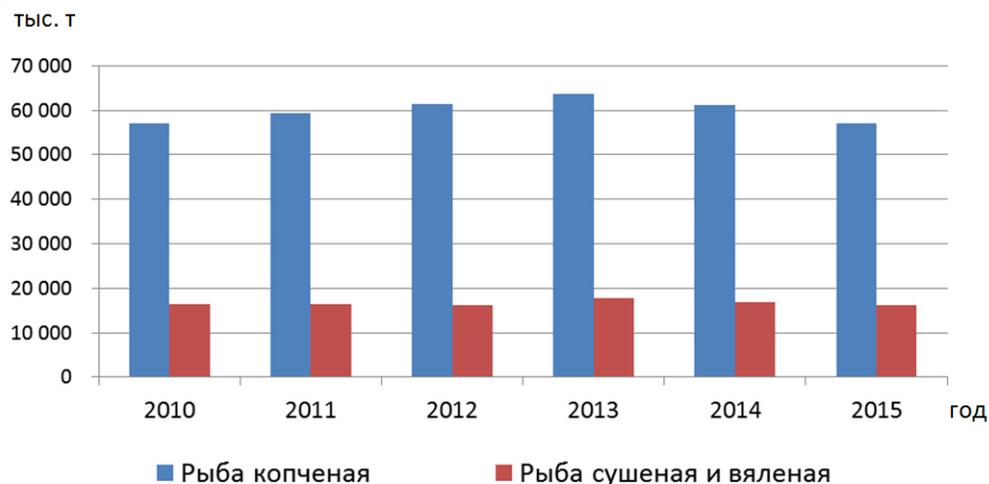


Рис. 2. Производство рыбы копчёной, сушёной и вяленой

Федеральное агентство по рыболовству в этой связи отмечает в Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации низкий уровень технологической и технической оснащённости организаций рыбного хозяйства. Одной из задач в Стратегии определено техническое перевооружение и модернизация действующих рыбоперерабатывающих мощностей. Как результат, к 2020 г. планируется рост объёмов производства копчёных и сушено-вяленых рыбных товаров в 5 раз по сравнению с 2007 г. [2].

В этой связи актуальны переоснащение производств, создание новых энергоэффективных установок, позволяющих уменьшить объем потребляемой электроэнергии и, как следствие, снизить себестоимость конечной продукции, сделать её более привлекательной для покупателя. Однако, чтобы добиться энергоэффективности протекающего теплового процесса, недостаточно просто создать установку, необходимо ещё выбрать способ тепловой обработки и обосновать его эффективность, что и явилось *целью исследования*.

#### Методы и результаты исследования

В Мурманском государственном техническом университете на базе учебно-экспериментального цеха разработана малогабаритная сушильная установка (рис. 3).



Рис. 3. Малогабаритная сушильная установка

Установка предназначена для поиска энергоэффективных способов тепловой обработки. Система автоматического управления для этих целей позволяет задавать различные режимы работы исполнительных механизмов. В малогабаритной сушильной установке имеется камера подготовки теплоносителя, оснащенная трубчатым электронагревателем (ТЭН). В термокамере установки расположены инфракрасные лампы (ИК-лампы), которые используются для тепловой обработки гидробионтов [3].

Установка оснащена системой рециркуляции теплоносителя, позволяющей рационально использовать тепловой агент. Центробежный вентилятор обеспечивает движение теплового агента со скоростью 2 м/с.

С использованием малогабаритной сушильной установки была проведена серия экспериментов по определению энергоэффективных способов тепловой обработки. Сравнивались традиционные способы тепловой обработки – *конвективный* и *инфракрасный*. Диапазон значений температуры, выбранный для исследования, практически соответствует значениям температуры технологических процессов сушки, вяления и горячего копчения рыбы и составляет от 20 до 120 °С. При высокотемпературной обработке гидробионтов осуществлялся прогрев центральных слоев образцов до температуры 80 °С. Для исследования в качестве сырья были выбраны образцы путассу. Характеристика полуфабриката представлена в табл. 1.

Таблица 1

Параметры полуфабриката в начале эксперимента

Параметр	Значение
Влажность рыбы на общую массу, %	78
Средняя масса рыбы, г	280
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	0,2
Содержание поваренной соли, %	3,3

Для унификации результатов экспериментов процессы тепловой обработки рыбы завершались при достижении потерь массы 50–60 %.

Отличительной особенностью экспериментов является непрерывный дистанционный контроль температуры поверхности рыбы в термокамере малогабаритной сушильной установки, который осуществляется ИК-датчиком температуры серии СТ фирмы «Optris».

**Первая серия экспериментов – конвективная тепловая обработка рыбы.** В данном случае тепловой агент подвергался нагреву с использованием ТЭНа мощностью 2 кВт. Система автоматического управления поддерживала температуру в термокамере на заданном уровне. На рис. 4 представлены все параметры, контролируемые системой автоматического управления, при поддержании температуры в термокамере на уровне 50 °С.

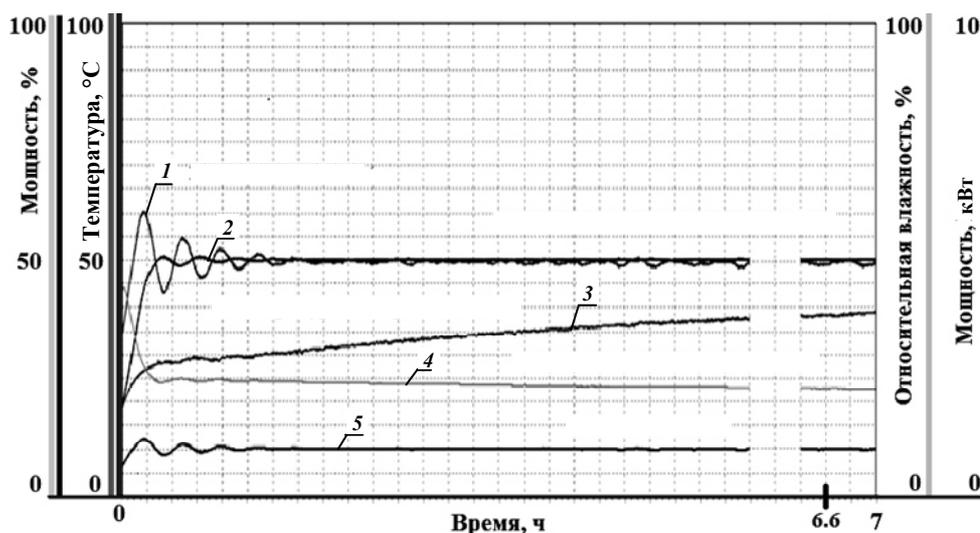


Рис. 4. Эксперимент по конвективной тепловой обработке: 1 – мощность ТЭН, %; 2 – температура в термокамере, °С; 3 – температура поверхности, °С; 4 – относительная влажность, %; 5 – мощность, кВт

Следует уточнить, что графики контролируемых параметров для исследуемого диапазона значений температуры, как и для исследуемых способов тепловой обработки, имели стабильно одинаковый характер, поэтому приводятся данные для температуры среды в термокамере равной 50 °С.

Анализ графиков первой серии экспериментов позволяет констатировать, что температура в термокамере в ходе всего эксперимента была на заданном уровне, т. е. система автоматического управления должным образом справлялась со своими задачами. На прогрев термокамеры ушло 15 минут. Относительная влажность варьировалась в среднем в диапазоне 24–27 %. Продолжительность эксперимента составила 6,5 часа, за которые было израсходовано 6,6 кВт · ч электроэнергии. Средний темп обезвоживания составил 37,8 %/ч.

Следует отметить, что прогрев рыбы протекал не так интенсивно, как прогрев термокамеры. Температура поверхности рыбы так и не достигла 50 °С. Интенсификации данного процесса можно достичь, используя более жесткий режим тепловой обработки рыбы.

**Вторая серия экспериментов – ИК-обработка рыбы.** В качестве источника ИК-излучения использовались лампы КГТ-1000. Система автоматического управления была перенастроена для поддержания заданной температуры на поверхности рыбы. Безусловно, тепловое излучение ламп, направленное на поверхность рыбы, частично прогревает и сушильный агент, за счет контакта последнего с разогретыми стенками термокамеры. Для первоначального прогрева сушильного агента, входящего в установку, ТЭН работал на 15 % мощности.

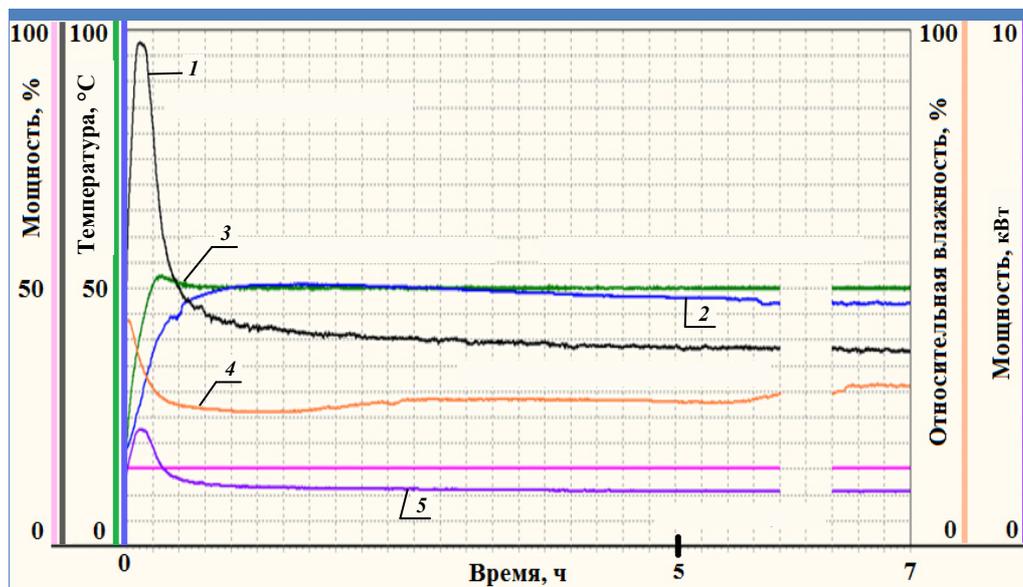


Рис. 5. Эксперимент по инфракрасной тепловой обработке: 1 – мощность ИК-ламп, %; 2 – температура в термокамере, °С; 3 – температура поверхности, °С; 4 – относительная влажность, %; 5 – мощность, кВт

Согласно данным на рис. 5, система автоматического управления поддерживала заданную температуру поверхности рыбы на уровне 50 °С, причём мощности ИК-ламп хватало и на поддержание заданной температуры в самой термокамере. Однако серия экспериментов выявила некую нестабильность параметров – примерно через час температура в термокамере начинает падать и, соответственно, увеличивается относительная влажность воздуха. Это связано с прогревом рыбы и, как следствие, с уменьшением требуемой мощности ИК-ламп, что и привело к снижению температуры среды в самой термокамере.

Во второй серии экспериментов средний темп обезвоживания составил 51 %/ч, процесс был остановлен через 5 часов, за это время было израсходовано 5,6 кВт · ч.

**Третья серия экспериментов – комбинированный способ тепловой обработки рыбы.** Анализ данных конвективной и ИК-обработки выявил как положительные, так и отрицательные стороны этих процессов. Было принято решение о разработке на основании полученных резуль-

татов энергоэффективного способа тепловой обработки, который обеспечивал бы постоянство температурного режима в термокамере и характеризовался бы более высокими темпами обезвоживания. К разрабатываемому способу тепловой обработки и к реализующей его системе автоматического управления были предъявлены следующие требования:

1. Контроль и управление заданным температурным режимом сушильной установки.
2. Обеспечение системой автоматического управления контроля температуры на поверхности рыбы.
3. Управление исполнительными механизмами системы таким образом, чтобы на заданном уровне одновременно поддерживалась температура на поверхности рыбы и в термокамере.
4. Меньший расход электроэнергии в сравнении с конвективной и ИК-обработкой.

Сформулированные требования были реализованы в системе автоматического управления малогабаритной сушильной установкой (рис. 6). В системе используются два контура управления. Первый контур контролирует температуру в термокамере и управляет с помощью регулятора (регулятор ТЭН) мощностью трубчатого электронагревателя, второй контур контролирует температуру поверхности рыбы и управляет с помощью регулятора (регулятор ИК) мощностью ИК-излучения.

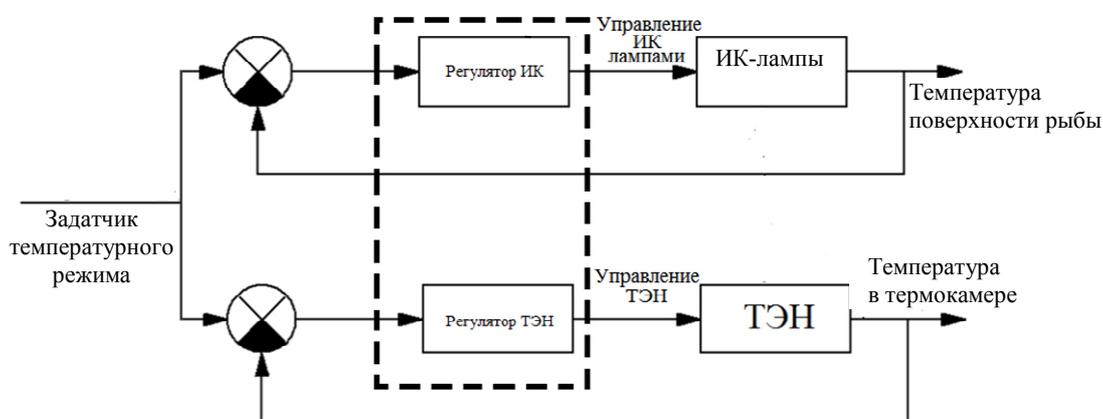


Рис. 6. Структурная схема системы автоматического управления

Типовые графики для температурного режима 50 °С, полученные при реализации нового комбинированного способа тепловой обработки рыбы, представлены на рис. 7.

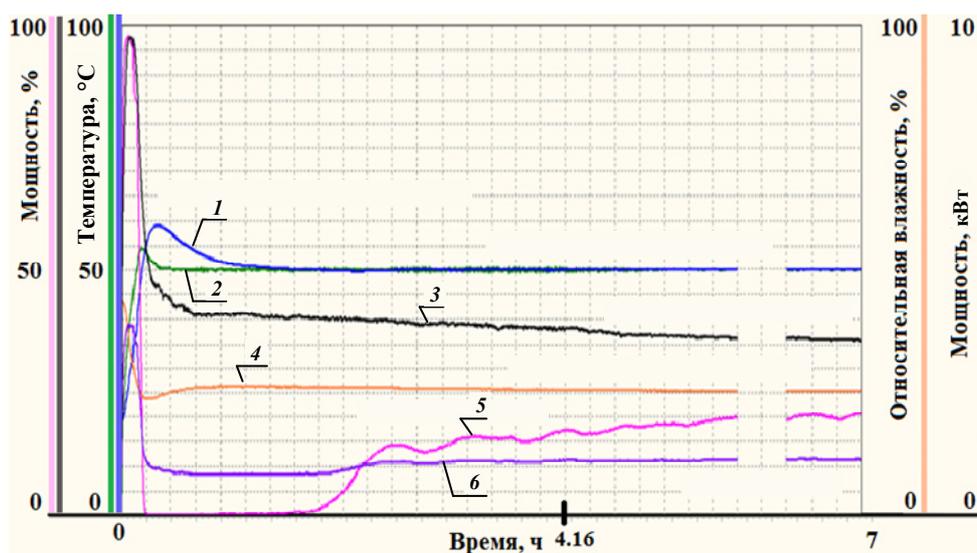


Рис. 7. Стадийная комбинированная тепловая обработка при обезвоживании (сушке):  
 1 – температура в термокамере, °С; 2 – температура поверхности, °С; 3 – мощность ИК-ламп, %;  
 4 – относительная влажность, %; 5 – мощность ТЭН, %; 6 – мощность, кВт

Анализ графиков данной серии экспериментов позволяет сделать вывод о том, что системой автоматического управления поддерживалась как температура в термокамере, так и температура поверхности рыбы на уровне 50 °С. Полученные данные сходны с результатами экспериментов второй серии. Отличие состоит в том, что уменьшение температуры в термокамере компенсируется увеличением мощности, подаваемой на ТЭН. Данный температурный режим способствует увеличению темпа обезвоживания, который составил 51 %/ч. Процесс был остановлен чуть более чем через 4 часа, за это время было израсходовано 4,86 кВт · ч.

В табл. 2 представлены результаты исследования способов тепловой обработки рыбы, которые показывают, что предложенный комбинированный способ тепловой обработки характеризуется лучшими показателями в плане затрат электроэнергии и средних темпов обезвоживания. Следует отметить, что сходные результаты были получены и для других значений температуры исследуемого диапазона.

Таблица 2

Параметры образцов рыбы в зависимости от способа тепловой обработки

Параметр	Способ тепловой обработки		
	ТЭН	ИК-лампы	Комбинированный
	30 °С		
Начальная масса, г	279	280	281
Конечная масса, г	140	140	140
Массопотери, %	50	50	50
Продолжительность, ч	9,7	8	6,9
Средний темп обезвоживания, %/ч	25,77	31,25	36,23
Средняя подаваемая мощность, %	36	41	45
Затраты электроэнергии, кВт·ч	7	6,6	6,25
	50 °С		
Начальная масса, г	280	278	283
Конечная масса, г	140	139	142
Массопотери, %	50	50	50
Продолжительность, ч	6,6	5	4,16
Средний темп обезвоживания, %/ч	37,8	51	60,1
Средняя подаваемая мощность, %	49,56	56,35	58,67
Затраты электроэнергии, кВт·ч	6,6	5,6	4,86
	80 °С		
Начальная масса, г	281	280	282
Конечная масса, г	140	140	141
Массопотери, %	50	50	50
Продолжительность, ч	5,5	3,8	3,2
Средний темп обезвоживания, %/ч	45,45	65,76	78,1
Средняя подаваемая мощность, %	95,10	66,00	67,07
Затраты электроэнергии, кВт·ч	10,46	5,13	4,28

Для разработанного комбинированного способа выявлена закономерность – снижение затрат электроэнергии в зависимости от температурного режима (рис. 8).

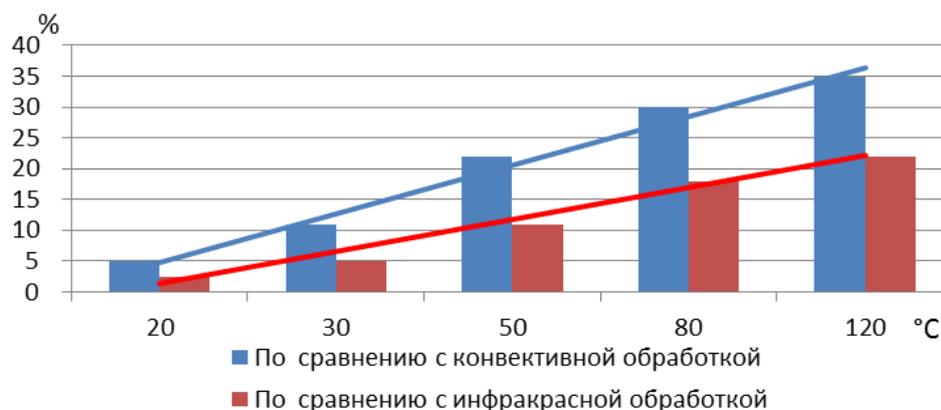


Рис. 8. Снижение затрат электроэнергии при комбинированной тепловой обработке

Чем выше температура тепловой обработки сырья, тем менее энергозатратным будет комбинированный способ в сравнении с конвективной и ИК-обработкой.

### Заключение

Результаты исследований показали, что предложенный комбинированный способ тепловой обработки рыбы характеризуется более высокими средними темпами обезвоживания и более низкими затратами электроэнергии.

Система автоматического управления, реализуемая с использованием двух контуров управления, позволяет осуществлять контроль и управление как температурой в термокамере малогабаритной сушильной установки, так и температурой поверхности рыбы, поддерживая при этом заданный температурный режим тепловой обработки.

Комбинированный способ тепловой обработки, реализация которого осуществляется с помощью системы автоматического управления, является более эффективным в сравнении с конвективным и инфракрасным способами. Однако очевидным остаётся тот факт, что требуются дополнительные исследования по применению накопленной теоретической и практической базы на более масштабных сушильных установках.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Россия в цифрах*. 2016: крат. стат. сб. М.: Росстат, 2016. 543 с.
2. *Об утверждении* Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2020 года: приказ Росрыболовства от 30 марта 2009 г. № 246. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2068101/>.
3. *Пат. 135234* Рос. Федерация, МПК А 23 В 4/03. Малогабаритная сушильная установка / Вотинов М. В. № 2013132112/13; заявл. 10.07.13; опубл. 10.12.13, Бюл. № 34.

Статья поступила в редакцию 30.01.2017

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Вотинов Максим Валерьевич** – Россия, 183010, Мурманск; Мурманский государственный технический университет; канд. техн. наук; доцент кафедры автоматизации и вычислительной техники; votinovmv@yandex.ru.

**Ершов Михаил Александрович** – Россия, 183010, Мурманск; Мурманский государственный технический университет; канд. техн. наук; старший научный сотрудник кафедры технологий пищевых производств; maershov@mail.ru.

**Маслов Алексей Алексеевич** – Россия, 183010, Мурманск; Мурманский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; зав. кафедрой автоматизации и вычислительной техники; ptfaivt@mstu.edu.ru.

*M. V. Votinov, M. A. Ershov, A. A. Maslov*

### ANALYSIS OF FISH THERMAL PROCESSING USING AUTOMATICALLY CONTROLLED HEATING AND DEHYDRATION METHODS

**Abstract.** The article deals with the small-size drying plant built in Murmansk State Technical University and used to study advantages and disadvantages of traditional methods of fish thermal processing: convective and infrared. In the course of study the temperature values corresponded to

those in technological processes of drying, curing and smoking fish (20-120°C). Poutassou carcasses were taken as raw material (specific surface - 0.2 m<sup>2</sup>/kg, average weight - 280 g). There are presented the processing parameters: starting weight and end weight, weight loss, processing length, average speed of dehydration, average power supply, energy costs at 30, 50, 80°C. At convective type of processing temperature of fish skin didn't reach 50°C. Experiment lasted 6.5 hours, average speed of dehydration made 37.8 %/h, energy costs – 6.6 kWt·h. During infrared type of processing the desired temperature was kept both on the fish skin and in the heat chamber during one hour, after which temperature in the chamber decreased due to fish warming-up and decreasing power supply to infrared lamps. Experiment lasted 5 hours, average speed of dehydration made 51 %/h, energy costs made 5.6 kWt·h. The results obtained served as a basis for developing energy efficient combined method of thermal processing which has a two-circuit automatic control system: the first circuit controls temperature in the heat chamber and regulates power in pipe electric heater; the second circuit controls the temperature of the fish and regulates power of the infrared radiation. This method is characterized by higher speed of dehydration (51 %/h), less duration of the process (more than 4 hours) and lower energy costs (4.86 kWt·h). The higher temperature of raw material processing, the less energy intensive the combined method.

**Key words:** fish thermal processing, convective processing method, infrared processing method, energy efficient processing method, automation, control.

#### REFERENCES

1. *Rossia v tsifrakh. 2016: kratkii statisticheskii sbornik* [Russia in numbers. 2016: a statistical digest]. Moscow, Rosstat, 2016. 543 p.
2. *Ob utverzhenii Strategii razvitiia rybokhoziaistvennogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 goda* [To the question of ratification of the Strategy of the fishery complex development in Russian Federation for the period up to 2020]. Prikaz Rosrybolovstva ot 30 marta 2009 g. № 246. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2068101/>.
3. Votinov M. V. *Malogabaritnaia sushil'naia ustanovka* [The small-size drying plant]. Patent RF № 2013132112/13; 10.12.13.

The article submitted to the editors 30.01.2017

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Votinov Maksim Valer'evich** – Russia, 183010, Murmansk; Murmansk State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Automatic and Computer Engineering; [votinovmv@yandex.ru](mailto:votinovmv@yandex.ru).

**Ershov Mikhail Aleksandrovich** – Russia, 183010, Murmansk; Murmansk State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Senior Researcher of the Department of Food Technologies; [maershov@mail.ru](mailto:maershov@mail.ru).

**Maslov Aleksey Alekseevich** – Russia, 183010, Murmansk; Murmansk State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Automatic and Computer Engineering; [maslovaa@mstu.edu.ru](mailto:maslovaa@mstu.edu.ru).

