

МНОГОКОНТУРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНВЕКТИВНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ РЫБНОГО СЫРЬЯ

А. В. Кайченев, В. В. Ерещенко, В. В. Яценко, И. Ю. Селяков

*Кафедра автоматической и вычислительной техники, kaychenovav@mstu.edu.ru;
ФГАОУ ВО «Мурманский государственный технический университет»,
Мурманск, Россия*

Ключевые слова: автоматизированная сушильная установка; многоконтурная система управления; процесс конвективного обезвоживания; регулятор влагосодержания; эффективность режима.

Аннотация: Рассмотрена система управления процессом обезвоживания рыбного сырья с регулированием по влагосодержанию и температуре сушильного агента, реализующая комбинированный режим сушки с линейно изменяющимся временем релаксации рыбы. Приведены описания экспериментов на установке для поиска оптимальных технологических режимов обезвоживания (УПОР-М) и анализ полученных данных.

Введение

В пищевой промышленности процесс обезвоживания продуктов в целях увеличения срока хранения, уменьшения объема при максимальном сохранении полезных свойств является традиционной и широко распространенной технологией. Для достижения высоких показателей по качеству продукта, точности, энергоэффективности система, как правило, содержит более одного контура управления.

Существующие многоконтурные системы автоматического регулирования проектируются либо без учета взаимных связей в случае, если к качеству управления не предъявляются жесткие требования, либо используется развязка каналов для обеспечения функциональной независимости контуров. Однако для ряда технологических процессов подходы, связанные с обеспечением условия автономности контуров, не гарантируют их выполнение для всех возможных режимов работы. В таких случаях необходимо введение специальных вычислительных устройств, определяющих параметры объекта в процессе работы системы и производящих перенастройку перекрестных связей многоконтурной системы [1 – 5].

Объекты и методы

Объект исследования – система управления конвективным обезвоживанием рыбного сырья. Система реализована в установке поиска оптимальных технологических режимов обезвоживания УПОР-М [6 – 8]. Структурная схема системы автоматического управления конвективным обезвоживанием [9] представлена на рис. 1. В схеме реализованы два контура управления: по влагосодержанию и температуре сушильного агента. Возмущающее воздействие на объект управления F в рамках исследования принято неизменным.

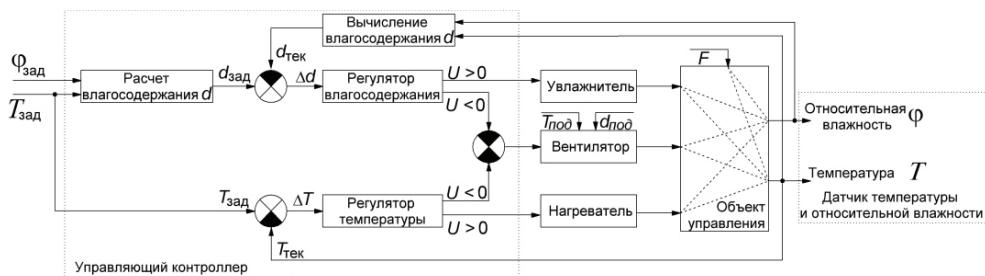


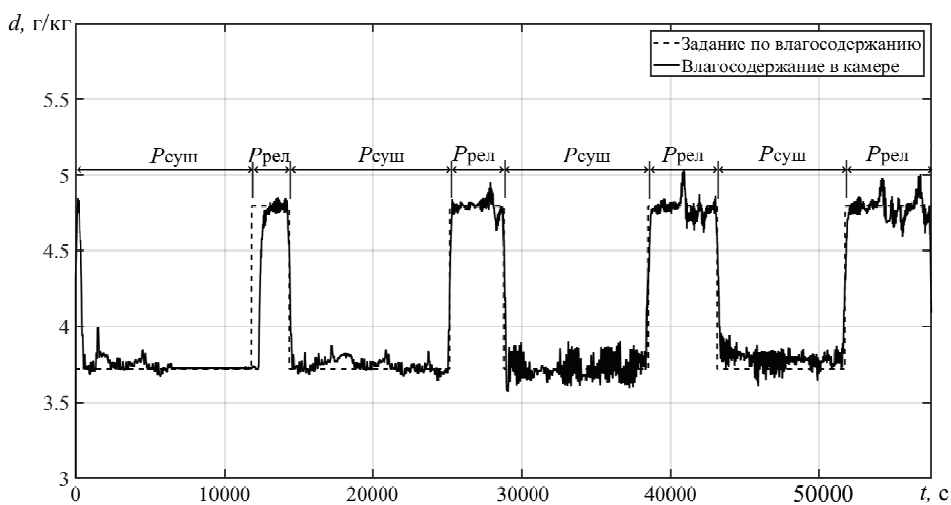
Рис. 1. Структурная схема системы автоматического управления процессом обезвоживания рыбного сырья

Входные параметры системы: заданные в режиме обезвоживания температура $T_{зад}$ и относительная влажность $\phi_{зад}$, которые позволяют вычислить по методике расчета i - d -диаграмм [8] заданное влагосодержание сушильного агента при обезвоживании $d_{зад}$.

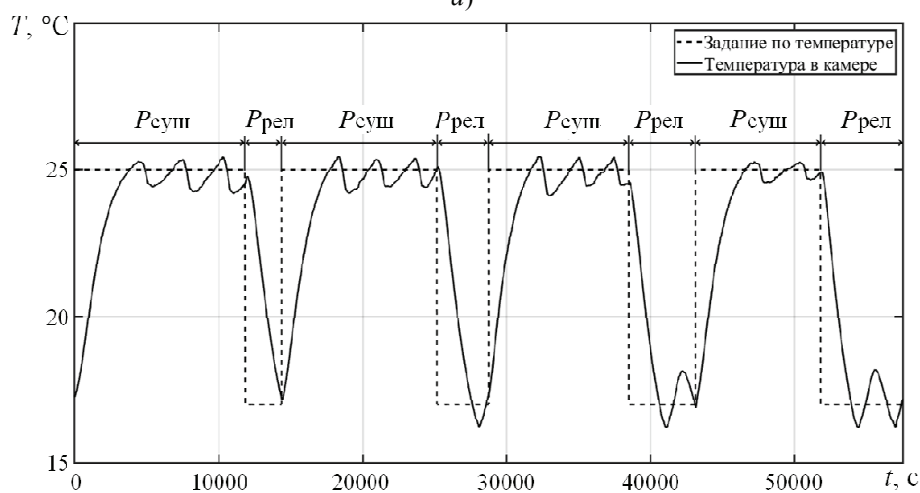
В сушильной камере установлен датчик температуры и относительной влажности ОВЕН ПВТ100, который измеряет значения параметров среды с точностью 3,5 % по влажности и 0,5 °C по температуре. На основании измеренных значений параметров сушильного агента в управляющем контроллере осуществляется расчет текущего значения влагосодержания среды $d_{тек}$ и рассогласования влагосодержания Δd . При $\Delta d > 0$ (недостаточное влагосодержание) регулятором осуществляется воздействие на ультразвуковой увлажнитель с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ), период импульсов $T = 1$ мин, что приводит к увеличению относительной влажности и уменьшению Δd . Избыточное влагосодержание сушильного агента приводит к отрицательному управлению на выходе регулятора $U < 0$. Управляющее воздействие подается на вентилятор, находящийся в воздуховоде, соединяющем камеру подготовки сушильного агента $T_{под}$, $d_{под}$ с камерой обезвоживания. Большее воздействие приводит к увеличению частоты вращения вентилятора, что существенно повышает динамику воздухообмена между камерами подготовки и обезвоживания и приводит к снижению текущего значения влагосодержания среды $d_{тек}$.

В контуре регулирования температуры текущее измеренное значение температуры $T_{тек}$ поступает от датчика. При положительном рассогласовании температуры $\Delta T > 0$ на выходе ПИД-регулятора формируется управляющее воздействие на нагреватель, что приводит к увеличению измеренного значения температуры и уменьшению рассогласования. При превышении заданного значения температуры в камере осуществляется управляющее воздействие на вентилятор аналогично контуру управления влагосодержанием сушильного агента.

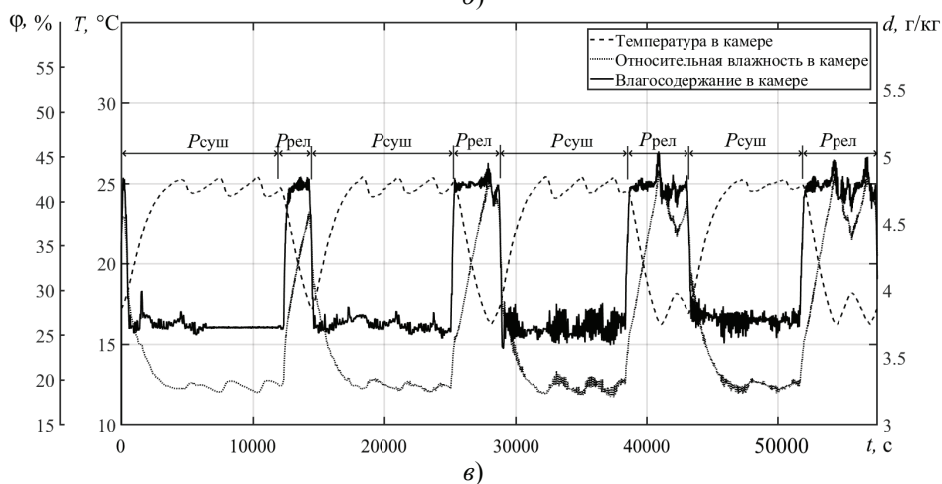
Режимы обезвоживания рыбного сырья (путассу) формировались в соответствии с методикой задания комбинированных режимов обезвоживания с линейно изменяющимся временем релаксации рыбы [10]. Температура T в сушильной камере на этапах обезвоживания ($P_{суш}$, рис. 2) в соответствии с режимом задана равной 25 °C, относительная влажность – 20 %. На этапах релаксации ($P_{рел}$, см. рис. 2) заданное значение температуры составляет 17 °C, относительной влажности – 40 %. Расчет влагосодержания по заданным значениям относительной влажности и температуры позволил получить параметр $d_{зад}$, равным 3,8 г/кг при обезвоживании и 4,8 г/кг при релаксации сырья. Температура и влагосодержание в камере подготовки сушильного агента в течение всего процесса обезвоживания поддерживались постоянными $T_{под} = 17$ °C, $d_{под} = 2,38$ г/кг. Начальный коэффициент релаксации составлял 10 % от периода обезвоживания, конечный коэффициент 40 %.



а)



б)



в)

Рис. 2. Графики временной зависимости влажосодержания (а), температуры (б) относительной влажности, температуры и влажосодержания (в) при проведении эксперимента

На протяжении всего процесса обезвоживания осуществлялся тепловизионный контроль температуры поверхности рыбного сырья в совокупности с видеомониторингом [11] состояния сырья с применением метода количественной термографии [12]. Для контроля эффективности обезвоживания в камере сушки применялась весоизмерительная система с цифровым выходом для передачи данных о потере массы сырья в управляющий контроллер.

Результаты

В результате проведенного эксперимента по обезвоживанию рыбного сырья в течение 16 ч регулятор влагосодержания поддерживал заданные значения 3,7 и 4,8 г/кг (см. рис. 2, а). Регулятор температуры сушильного агента осуществлял стабилизацию температуры с заданными значениями 25 °С на этапах обезвоживания (сушки) и 17 °С на этапах релаксации (см. рис. 2, б). Настройка ПИД-регулятора температуры проводилась инженерными методами и требовала дополнительной донастройки. Сушильная установка обеспечила заданные параметры режимов релаксации сырья, увеличивая коэффициент с 10 до 40 %.

На графике, представленном на рис. 2, в, влагосодержание в начале и конце каждого этапа релаксации изменяется практически безинерционно, при этом относительная влажность изменяется плавно со скоростью изменения температуры среды. Таким образом, управление процессом обезвоживания рыбного сырья при регулировании температуры и влагосодержания сушильного агента обеспечивает выполнение заданного режима обезвоживания и не требует дополнительного развязывания контуров температуры и относительной влажности.

Контроль параметров сушильного агента (температуры, относительной влажности и влагосодержания) позволил представить технологический процесс обезвоживания рыбного сырья на *id*-диаграмме (рис. 3). На диаграмме выделяются четыре характерные точки процесса А, В, С и D. Точка А соответствует заданию режима на этапе релаксации (17 °С – температура и 40 % – относительная влажность). Точка С соответствует заданию режима на этапах обезвоживания (25 °С – температура и 20 % – относительная влажность). При переходе от этапа релаксации к этапу обезвоживания на диаграмме выделяется точка В, в которой значительно уменьшается влагосодержание (АВ) и осуществляется нагрев сушильного агента (ВС) в камере. При переходе от этапа обезвоживания к этапу релаксации выделяется точка D. В начале этапа происходит значительное увеличение влагосодержания (CD) с последующим охлаждением среды в камере обезвоживания (DA).

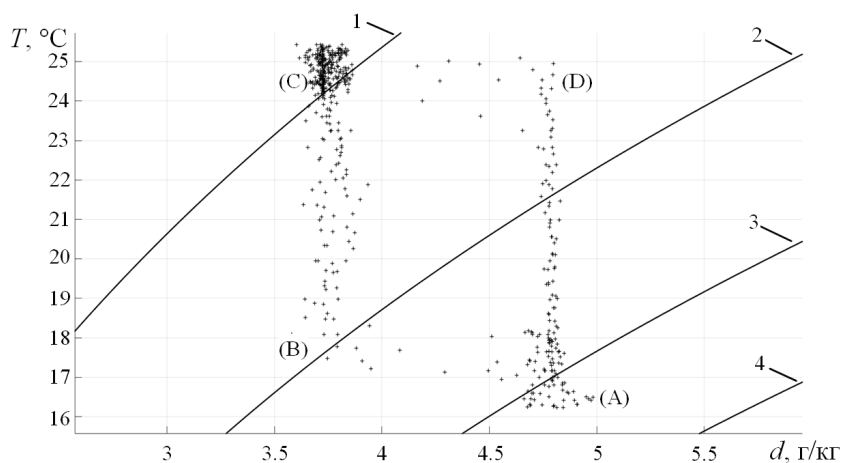


Рис 3. *id*-диаграмма при проведении эксперимента при относительной влажности, %:
1 – 20; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 50

Основными параметром, характеризующим процесс обезвоживания, является скорость удаления влаги из рыбного сырья [13]. Данный параметр косвенно можно оценить через потерю массы. Для оценки эффективности исследуемого режима используется комплексная оценка, состоящая из двух параметров: скорости обезвоживания (она должна быть не медленнее непрерывного процесса) и затрат энергии на процесс.

В рамках проведенных экспериментов проводилась оценка температуры поверхности рыбного сырья. В процессе обработки результатов экспериментов появилась гипотеза о возможной зависимости температуры поверхности рыбы от скорости удаления влаги и потери массы. На рисунке 4 представлен график изменения температуры поверхности рыбы в процессе сушки. На этапах обезвоживания циркуляционный вентилятор, обеспечивающий скорость потока 2 м/с, включен, и температура сушильного агента в камере составляет 25 °С. На этапах релаксации циркуляционный вентилятор выключен, и температура в камере составляет 17 °С. Для этапа непосредственного обезвоживания подобран полином методом наименьших квадратов, описывающий зависимость температуры поверхности сырья от времени процесса для данного эксперимента:

$$T_{\text{тек}} = -0,0000000027 t^2 + 0,0002617201 t + 17,4417040341, \quad (1)$$

где t – время процесса обезвоживания, с; $T_{\text{тек}}$ – текущая температура поверхности сырья, °С.

Формула (1) адаптирована для описания графика потери массы рыбного сырья (рис. 5) и выглядит следующим образом:

$$M_{\text{тек}} = (k(T_{\text{кон}} - T_{\text{тек}}) + M_{\text{кон}}) \cdot 1,06, \quad (2)$$

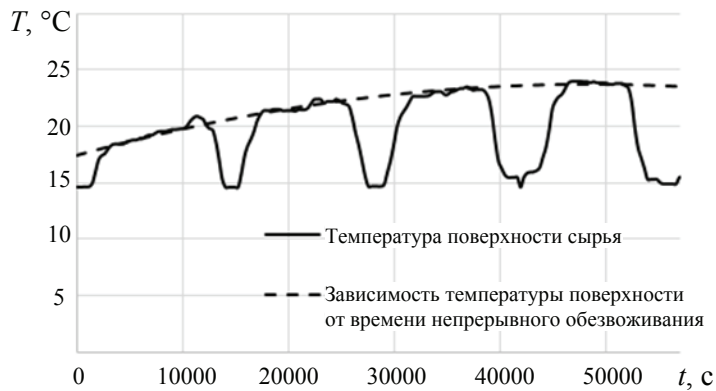


Рис. 4. Температура поверхности рыбного сырья

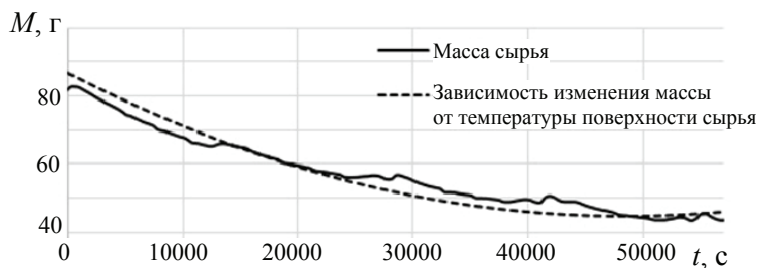


Рис. 5. График изменения массы M рыбного сырья в процессе обезвоживания

где k – коэффициент пропорциональности, $г/°C$; $M_{тек}$, $M_{нач}$, $M_{кон}$ – масса сырья соответственно текущая, начальная и конечная, $г$; $T_{тек}$, $T_{нач}$, $T_{кон}$ – температура поверхности сырья соответственно текущая, начальная и конечная, $°C$;

$$k = \frac{M_{нач} - M_{кон}}{T_{кон} - T_{нач}}. \quad (3)$$

Отклонение значений, полученных по расчетной формуле от экспериментальных данных изменения массы, не превышает 5 %. Таким образом, измерение температуры поверхности рыбного сырья в процессе непрерывного обезвоживания позволяет оценить скорость удаления влаги и потерю массы сырья.

Заключение

В результате проведенных экспериментов и обработки полученных данных, установлено, что управление процессом обезвоживания рыбного сырья при регулировании температуры и влагосодержания сушильного агента обеспечивает выполнение заданного режима сушки и не требует дополнительного развязывания контуров температуры и относительной влажности.

Дополнительные каналы контроля по массе сырья, температуре поверхности рыбы посредством тепловизионного контроля в совокупности с видеомониторингом состояния рыбы позволят повысить динамическую точность, оптимизировать энергетические и временные затраты на управление.

Список литературы

1. Wang, L. Research on Temperature and Humidity Decoupling Control of Constant Temperature and Humidity Test Chamber / L. Wang, Z. Zhu // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 711, No. 1. – P. 012104.
2. Zhang, W. A Neuro-Fuzzy Decoupling Approach for Real-Time Drying Room Control in Meat Manufacturing / W. Zhang, H. Ma, S. X. Yang // Expert Systems with Applications. – 2015. – Vol. 42, No. 3. – P. 1039 – 1049.
3. Liu, X. W. Design for Fuzzy Decoupling Control System of Temperature and Humidity / X.W. Liu, T. F. Dai // In Advanced Research on Computer Science and Information Engineering: International Conference, CSIE 2011, Zhengzhou, China, May 21-22, 2011. – 2011. – Part I. – P. 231 – 236.
4. Hosseinpour, S. Application of Fuzzy Logic in Drying: A review / S. Hosseinpour, A. Martynenko // Drying Technology. – 2022. – Vol. 40, No. 5. – P. 797 – 826.
5. Анализ многосвязного технологического процесса как объекта управления на примере пищевых производств / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 534 – 543. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.534-543
6. Кайченoв, А. В. Комплексная модернизация систем управления процессами тепловой обработки водных биоресурсов Арктики с использованием интеллектуальных технологий / А. В. Кайченoв, И. Г. Благовещенский. – Курск : Университетская книга, 2022. – 251 с.
7. Математическое моделирование тепловых и влажностных процессов в камере обезвоживания пищевых продуктов / А. В. Кайченoв, В. В. Ерещенко, В. В. Яценко, И. Г. Благовещенский // Вестник Тверского государственного технического университета. Сер.: Техн. науки. – 2022. – № 4(16). – С. 76 – 87.
8. Программно-аппаратный комплекс для автоматического управления процессом подготовки сушильного агента с заданными параметрами температуры

и влажности / А. В. Кайченков, В. В. Ерещенко, В. В. Яценко, И. Г. Благовещенский // Вестник Тверского государственного технического университета. Сер. Техн. науки. – 2023. – № 1 (17). – С. 41 – 53.

9. Разработка математической модели малогабаритной установки для поиска оптимальных режимов / И. Ю. Селяков, А. А. Маслов, А. В. Кайченков [и др.] // Рыбное хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 108 – 113.

10. Реализация программы управления сушильной установкой для обеспечения комбинированных режимов обезвоживания с линейно изменяющимся временем релаксации рыбы / И. Ю. Селяков, А. А. Маслов, М. А. Ершов [и др.] // Рыбное хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 126 – 128.

11. Обухов, А. Д. Алгоритмы обработки данных в автоматических системах управления на основе компьютерного зрения / А. Д. Обухов, К. И. Пагутин, А. О. Назарова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 573 – 585. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.573-585.

12. Vlasov, A. Development of a Continuous Thermal Control Device for Highvoltage Equipment / A. Vlasov, V. Ereschenko, T. Volkova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 5th International Conference "Arctic: History and Modernity" 18–19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia. – 2020. – Vol. 539. – P. 012135. doi: 10.1088/1755-1315/539/1/012135

13. Optimization of Mass-Transfer Processes of Fish Convective Dehydration / M. A. Ershov, I. Y. Selyakov, V. V. Ereshchenko, A. M. Ershov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 5th International Conference "Arctic: History and Modernity" 18–19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia. – 2020. – Vol. 539. – P. 012190. doi: 10.1088/1755-1315/539/1/012190

A Multi-Loop Control System for the Process of Convective Dehydration of Fish Raw Materials

A. V. Kaychenov, V. V. Ereshchenko, V. V. Yatsenko, I. Yu. Selyakov

*Department of Automation and Computer Engineering, kaychenovav@mstu.edu.ru;
Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia*

Keywords: automated drying plant; multi-loop control system; the process of convective dehydration; moisture content regulator; mode efficiency.

Abstract: A control system for the process of dehydration of fish raw materials with control over the moisture content and temperature of the drying agent, which implements a combined drying mode with a linearly changing fish relaxation time, is considered. Descriptions of experiments on the installation for searching for optimal technological regimes of dehydration (UPOR-M) and analysis of the obtained data are given.

References

1. Wang L., Zhu Z. Research on Temperature and Humidity Decoupling Control of Constant Temperature and Humidity Test Chamber, In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 711, no. 1, pp. 012104.

2. Zhang W., Ma H., Yang S. X. A Neuro-Fuzzy Decoupling Approach for Real-Time Drying Room Control in Meat Manufacturing, *Expert Systems with Applications*, 2015, vol. 42, no. 3, pp. 1039-1049.

3. Liu X.W., Dai T.F. Design for Fuzzy Decoupling Control System of Temperature and Humidity, In *Advanced Research on Computer Science and Information Engineering: International Conference, CSIE 2011, Zhengzhou, China, May 21-22, 2011, Part I*, pp. 231-236.
4. Hosseinpour S., Martynenko A. Application of Fuzzy Logic in Drying: A review, *Drying Technology*, 2022, vol. 40, no. 5, pp. 797-826.
5. Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Terekhova A.A., Al' Knfer S.N.A., Al'-Amidi M.A.D., Al'-Khamami O.KH.YA., Gogoryan M.L., Dmitriyev D.G. [Analysis of a multiply connected technological process as a control object on the example of food production,], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 534-543. doi: 10.17277/vestnik.2022.04.pp.534-543 (In Russ., abstract in Eng.).
6. Kaychenov A.V., Blagoveshchenskiy I.G. *Kompleksnaya modernizatsiya sistem upravleniya protsessami teplovoy obrabotki vodnykh bioresursov Arktiki s ispol'zovaniyem intellektual'nykh tekhnologiy* [Comprehensive modernization of control systems for thermal treatment of aquatic bioresources in the Arctic using intelligent technologies], Kursk: Universitetskaya kniga, 2022, 251 p. (In Russ.).
7. Kaychenov A.V., Yereshchenko V.V., Yatsenko V.V., Blagoveshchenskiy I.G. [Mathematical modeling of thermal and humidity processes in the food dehydration chamber], *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Tekhn. nauki* [Bulletin of the Tver State Technical University. Ser. Tech. Sciences], 2022, no. № 4(16), pp. 76-87. (In Russ., abstract in Eng.).
8. Kaychenov A.V., Yereshchenko V.V., Yatsenko V.V., Blagoveshchenskiy I.G. [Software and hardware complex for automatic control of the drying agent preparation process with specified temperature parameters and humidity], *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhn. nauki* [Bulletin of the Tver State Technical University. Ser. Tech. Sciences], 2023, no. № 1 (17), pp. 41-53. (In Russ., abstract in Eng.).
9. Selyakov I.Yu., Maslov A.A., Kaychenov A.V. [et al.]. [Development of a mathematical model of a small-sized installation for the search for optimal regimes], *Rybnoye khozyaystvo* [Fish farm], 2014, no. 3, pp. 108-113. (In Russ., abstract in Eng.).
10. Selyakov I.Yu., Maslov A.A., Yershov M.A. [et al.]. [Implementation of the drying plant control program to provide combined dehydration modes with a linearly changing fish relaxation time], *Rybnoye khozyaystvo* [Fish farm], 2014, no. 3, pp. 126-128. (In Russ., abstract in Eng.).
11. Obukhov A.D., Patutin K.I., Nazarova A.O. [Data processing algorithms in automatic control systems based on computer vision], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 573-585. doi 10.17277/vestnik.2022.04.pp.573-585 (In Russ., abstract in Eng.).
12. Vlasov A., Ereschenko V., Volkova T. Development of a Continuous Thermal Control Device for Highvoltage Equipment, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 5th International Conference "Arctic: History and Modernity"* 18-19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia, 2020, vol. 539, pp. 012135. doi: 10.1088/1755-1315/539/1/012135
13. Ershov M.A., Selyakov I.Y., Ereshchenko V.V., Ershov A.M. Optimization of Mass-Transfer Processes of Fish Convective Dehydration, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 5th International Conference "Arctic: History and Modernity"* 18-19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia, 2020, vol. 539, pp. 012190. doi: 10.1088/1755-1315/539/1/012190

Das mehrkreisige System für den Prozess der konvektiven Entwässerung von Fischrohstoffen

Zusammenfassung: Es ist ein Steuerungssystem für den Prozess der Trocknung von Fischrohstoffen mit Regelung des Feuchtigkeitsgehalts und der Temperatur des Trocknungsmittels betrachtet, das einen kombinierten Trocknungsmodus mit einer sich linear ändernden Fischentspannungszeit implementiert. Es sind Beschreibungen von Experimenten an der Anlage zur Suche nach optimalen technologischen Dehydrierungsregimen (UPOR-M) und die Analyse der erhaltenen Daten gegeben.

Système de contrôle multi-circuit de la déshydratation par convection des matières premières de poisson

Résumé: Est examiné le système de contrôle du processus de déshydratation des matières premières de poisson avec la régulation de la teneur en humidité et de la température de l'agent de séchage, qui réalise un mode de séchage combiné avec un temps de relaxation linéairement variable du poisson. Sont données les descriptions des expériences sur l'installation pour la recherche des modes technologiques optimaux de déshydratation (OUPORT-M) et l'analyse des données obtenues.

Авторы: *Кайченoв Александр Вячеславoвич* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики и вычислительной техники; *Ерещенко Виктор Валерьевич* – старший преподаватель кафедры автоматики и вычислительной техники; *Яценко Виктория Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и вычислительной техники; *Селяков Илья Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и вычислительной техники, ФГАОУ ВО «Мурманский государственный технический университет», Мурманск, Россия.
