

Научная статья  
УДК 664.8.034  
DOI 10.24888/2541-7835-2023-30-115-126

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА ВАКУУМНОГО НАСЫЩЕНИЯ ПАРАМИ ПРЯНО-КОПТИЛЬНЫХ АРОМАТИЗАТОРОВ ЭКСТРУДИРОВАННЫХ МЯСОРАСТИТЕЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ

Шубкин Сергей Юрьевич<sup>1✉</sup>, Шахов Сергей Васильевич<sup>2</sup>, Бунеев Сергей Сергеевич<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, Липецкая область, Елец, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

<sup>1</sup>shubkin.92@mail.ru✉

<sup>2</sup>s\_shahov@mail.ru

<sup>3</sup>limes88@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлено описание конструкции и принципа действия автоматизированной технологической установки для проведения процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных мясорастительных продуктов функционального назначения. Предложен способ управления исследуемым процессом. Способ имеет следующие преимущества: способствует повышению производительности оборудования благодаря обеспечению согласованной работы парогенератора и копильной камеры; обеспечивает снижение удельных энергетических затрат за счет поддержания наиболее рациональных условий протекания процесса. Разработана математическая модель процесса, которая может применяться при создании копильных установок, а также способа управления технологическими режимами процесса насыщения пряно-копильными ароматизаторами экструдированных мясорастительных продуктов функционального назначения. Получено уравнение, позволяющее определить значение удельных энергозатрат на 1 кг готовой продукции внутри выбранных интервалов варьирования входных факторов. Результаты решенной задачи оптимизации позволили выделить рациональный диапазон изменения входных факторов по трем исследуемым критериям функционирования копильной установки. В качестве субоптимальных интервалов изменения параметров следует принять: давление, создаваемое вакуум-насосом в трубопроводе, 31-35 кПа; скорость подачи паров пряно-копильных ароматизаторов в копильную камеру, 0,65-0,8 м/с; температура в копильной камере, 38-42 °С.

**Ключевые слова:** управление, регулирование, автоматизация, оптимизация, пряно-копильные ароматизаторы, функциональные продукты.

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант № МК-2213.2022.4).

**Для цитирования:** Шубкин С.Ю., Шахов С.В., Бунеев С.С. Автоматизированная технологическая установка для проведения процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных мясорастительных продуктов // Агропромышленные технологии Центральной России. 2023. № 4(30). С. 115-126. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-30-115-126>.

Original article

## AUTOMATED TECHNOLOGICAL INSTALLATION FOR CARRYING OUT THE PROCESS OF VACUUM SATURATION WITH VAPORS OF SPICY AND SMOKY FLAVORS OF EXTRUDED MEAT AND VEGETABLE PRODUCTS

Sergey Yu. Shubkin<sup>1✉</sup>, Sergey V. Shakhov<sup>2</sup>, Sergey S. Buneev<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Bunin Yelets State University, Lipetsk region, Yelets, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

<sup>1</sup>shubkin.92@mail.ru✉

<sup>2</sup>s\_shahov@mail.ru

<sup>3</sup>[limes88@mail.ru](mailto:limes88@mail.ru)

**Abstract.** The article describes the design and principle of operation of an automated technological installation for carrying out the process of vacuum saturation with vapors of spicy and smoky flavors of ex-

*truded meat and vegetable products for functional purposes. A method for controlling the process under study is proposed. The method has the following advantages: helps to increase the productivity of the equipment by ensuring the coordinated operation of the steam generator and the smoking chamber; It provides a reduction in specific energy costs by maintaining the most rational conditions for the process. A mathematical model of the process has been developed that can be used to create smoking installations, as well as a method for controlling the technological modes of the process of saturation with spicy-smoky flavors of extruded meat and vegetable products for functional purposes. An equation is obtained that allows us to determine the value of specific energy consumption per 1 kg of finished products within the selected intervals of variation of input factors. The results of the solved optimization problem made it possible to identify a rational range of changes in input factors according to the three investigated criteria for the functioning of the smoker. As suboptimal intervals for changing parameters, the following should be taken: the pressure created by the vacuum pump in the pipeline, 31-35 kPa; the rate of vapor supply of spicy and smoky flavors to the smoking chamber, 0.65-0.8 m/s; the temperature in the smoking chamber, 38-42 °C.*

**Keywords:** *management, regulation, automation, optimization, spicy and smoky flavors, functional products.*

**Funding:** *the work was carried out with the financial support of the Grants Council of the President of the Russian Federation (grant no. МК-2213.2022.4).*

**For citation:** *Shubkin S.Yu., Shakhov S.V., Buneev S.S. Automated technological installation for carrying out the process of vacuum saturation with vapors of spicy and smoky flavors of extruded meat and vegetable products, 2023, no. 4(30), pp. 115-126. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-30-115-126>.*

## **Введение**

Современное производство продуктов питания является сложным технологическим процессом, который требует эффективного управления [3]. В настоящее время существует множество подходов к созданию систем автоматического управления процессами, проходящими в машинах и аппаратах пищевых производств [1, 5]. Особое внимание уделяют оптимизации данных систем по различным критериям [2].

Анализ существующих методов и технологического оборудования для проведения процессов насыщения пищевых сред копильными компонентами, в частности бездымными средами, показывает, что традиционные способы и методы не обеспечивают в полной мере необходимый уровень эффективности процессов [4]. Это можно объяснить отсутствием программного обеспечения и систем автоматического регулирования для оперативной настройки технологического оборудования.

Несмотря на растущую популярность и широкое применение бездымного способа копчения различных пищевых продуктов, в продовольственном машиностроении практически отсутствует серийное производство автоматизированного технологического оборудования для проведения бездымного копчения [8]. Очевидно, что существует необходимость в разработке рациональных режимов установок, функционирование которых предполагает использование в качестве рабочей среды бездымные копильные агенты. Создание принципиально новых схем организации бездымного копчения подразумевает не только устранение недостатков, которые характерны для существующего оборудования, но и расширение перспектив использования копильного оборудования.

В последние годы особую популярность приобретают функциональные продукты питания, полученные экструзией из сырья растительного и животного происхождения, которые сбалансированы по аминокислотному составу, биологической и пищевой ценности. Перспективным вариантом расширения ассортимента и привлекательности данных продуктов является насыщение их бездымными копильными компонентами – пряно-копильными ароматизаторами, которые, в отличие от традиционных дымовых агентов, полностью очищены от канцерогенных веществ, что позволит убедить потребителя в экологичности и безопасности готовой продукции.

В результате ранее проведенных исследований были предложены конструкторские решения, позволяющие эффективно осуществлять процесс насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных мясорастительных продуктов. В частности, была решена проблема с проникновением копильных агентов в продукт устраниением лимити-

тирующих факторов на их пути. Был предложен и реализован способ, при котором путем удаления вакуумированием из пор экструдированных продуктов воздуха происходит замещение его парами пряно-копильных ароматизаторов [9, 11].

На основании вышеизложенных сведений целью исследования является разработка автоматизированной системы управления эксплуатационными режимами установки для организации и оптимизации процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных мясорастительных продуктов функционального назначения.

### **Материалы и методы исследований**

Исследования проводились в 2022-2023 гг. в рамках реализации гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук (тема исследования «Разработка и научное обеспечение высокотехнологичного производства функциональных продуктов питания на основе сырья животного и растительного происхождения с добавлением бездымных пряно-копильных ароматизаторов», внутренний номер МК-2213.2022.4) на базе агропромышленного института ЕГУ им. И.А. Бунина в научно-исследовательских лабораториях по изучению процессов и аппаратов пищевых производств. С целью снижения объемов экспериментальных исследований и оптимизации режимов процесса насыщения пряно-копильными ароматизаторами функциональных продуктов использовались экспериментально-статистические методы, математическую основу которых составляет теория планирования эксперимента.

Насыщению парами пряно-копильных ароматизаторов подвергали экструдированные мясорастительные продукты под вакуумом. В состав продукта входили следующие компоненты: мука вигны, крупа манная, мясо индейки, порошкообразные молочно-овощные полуфабрикаты, полуфабрикат на желатиновой основе, соль поваренная, мускатный орех, перец красный молотый, перец душистый молотый, чеснок сушеный. Подробное описание рецептур экструдированных продуктов приведено в работах [10, 11].

В качестве копильного агента использовались пары препарата «Жидкий дым-062». Экструдированный продукт подвергался насыщению парами пряно-копильного ароматизатора в течение 10 минут при следующих параметрах в копильной камере – температуре в диапазоне 35-45 °С; давлении, создаваемого вакуум-насосом в трубопроводе 10-50 кПа; скорости подачи паров пряно-копильных ароматизаторов 0,4-0,8 м/с. По окончании процесса продукт отправляли на подсушку с целью снизить влажность до заданных пределов.

Готовый продукт, фасованный в пленочные пакеты без вакуума, хранили при температуре от 0 до 2 °С в сухом, чистом, хорошо вентилируемом помещении при относительной влажности воздуха 70-80%. Срок хранения – не более 9 суток с даты изготовления.

Экспериментально-статистические методы проводили в два этапа. Первый этап заключался в построении регрессионной математической модели, адекватно описывающей зависимость выбранных выходных параметров от изучаемых факторов [6, 10]. На втором этапе была построена в графическом виде модель процесса, позволяющая достаточно точно рассчитать содержание фенольных компонентов на продукте внутри выбранных интервалов варьирования входных факторов.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Высокая эффективность процесса вакуумного насыщения бездымными пряно-копильными ароматизаторами крупнодисперсных мясорастительных продуктов функционального назначения предъявляет особые требования к системе управления процессом, в частности к быстродействию контуров контроля и регулирования. Следовательно, для обеспечения более продуктивного выполнения процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных мясорастительных продуктов необходима разработка автоматизированной технологической установки.

На рис. 1 представлена принципиальная схема технологической установки, реализующая предлагаемый способ автоматического управления процессом.

Схема, реализующая предлагаемый способ автоматического управления, включает: установку для получения экструдированных мясорастительных продуктов функционального назначения с добавлением бездымных пряно-копильных ароматизаторов, содержащую коптильную камеру 1; систему подготовки и подачи паров пряно-копильных ароматизаторов, которая состоит из следующих основных элементов: камеры смешивания 4, парогенератора 2, ротационного насоса 3. В установке также имеется конденсатор 13, рециркулирующий вакуум-насос 12, а также трубопроводы 5, 6, 14, 15.

Установка содержит коптильную камеру 1, для подачи продукта в которую служит вертикальный экструдер 8, в центральном канале которого установлен нагнетающий шнек 7 с возможностью вращения от привода (на рис. 1 не показан). Исходное сырье для производства экструдированных продуктов в экструдер 8 поступает через загрузочное устройство 9.

В парогенераторе 2 находится нагреваемый термоэлементом 16 лоток 17, в который по трубопроводу 18 через камеру смешивания 4 подаются пряно-копильные ароматизаторы. К парогенератору 2 подведен трубопровод 5, соединенный с насосом 3, к которому примыкает трубопровод 6, соединяющий его с коллектором 5 (см. рис. 2), который в свою очередь связан с коптильной камерой 1.

На выходе из экструдера 8 соосно нагнетающему шнеку 7 размещены специальная вставка с проходящим через нее патрубком подачи паров пряно-копильных ароматизаторов.

В коптильной камере 1 установлена насадка 10 в форме сопла Лавалья, которая позволяет создавать паровой затвор, разделяющий зоны подачи продукта в вакуум и его насыщение парами пряно-копильных ароматизаторов. После насадки 10 в нижней части коптильной камеры 1 установлено делительно-упаковочное устройство 11, имеющее шлюзовую затвор для выгрузки готового продукта.

Схема (см. рис. 1), реализующая предлагаемый способ автоматического управления, также включает линию 19 для подачи пряно-копильных ароматизаторов в парогенератор 2, линию 21 для подачи исходного сырья для получения мясорастительных функциональных продуктов в загрузочное устройство 9, линию 20 для подачи хладагента в конденсатор 13, линию 22 выгрузки готового продукта из делительно-упаковочного устройства 11.

Имеются датчики температуры 23, 24 и 25 соответственно расположенные в парогенераторе 2, в коптильной камере 1 и конденсаторе 6; датчик влажности 35, расположенный в коптильной камере 1; датчики расхода 27, 28, 29, 30, 31 соответственно расположенные на линии 19 для подачи пряно-копильных ароматизаторов в парогенератор 2, в трубопроводе 6, на линии 20 для подачи хладагента в конденсатор 13, на линии 21 для подачи исходного продукта в загрузочное устройство 9, на линии 22 выгрузки готового продукта из делительно-упаковочного устройства 11; датчик уровня 26, расположенный в парогенераторе 2; датчик давления 32 в трубопроводе 14; датчики концентрации коптильной смеси 33 и 34, соответственно расположенные в трубопроводе 6 и рециркулирующем трубопроводе 14; датчики частоты вращения 36, 37, 38, соответственно расположенные на приводе экструдера 8, на приводе делительного и упаковочного устройства 11, локальные регуляторы 39, 40, 42, 44, 45, 49, 50, 51, 54, вторичные приборы 41, 43, 46, 47, 48, 52, 53; исполнительные механизмы 55-64, программируемый технологический контролер (ПМК) 65.

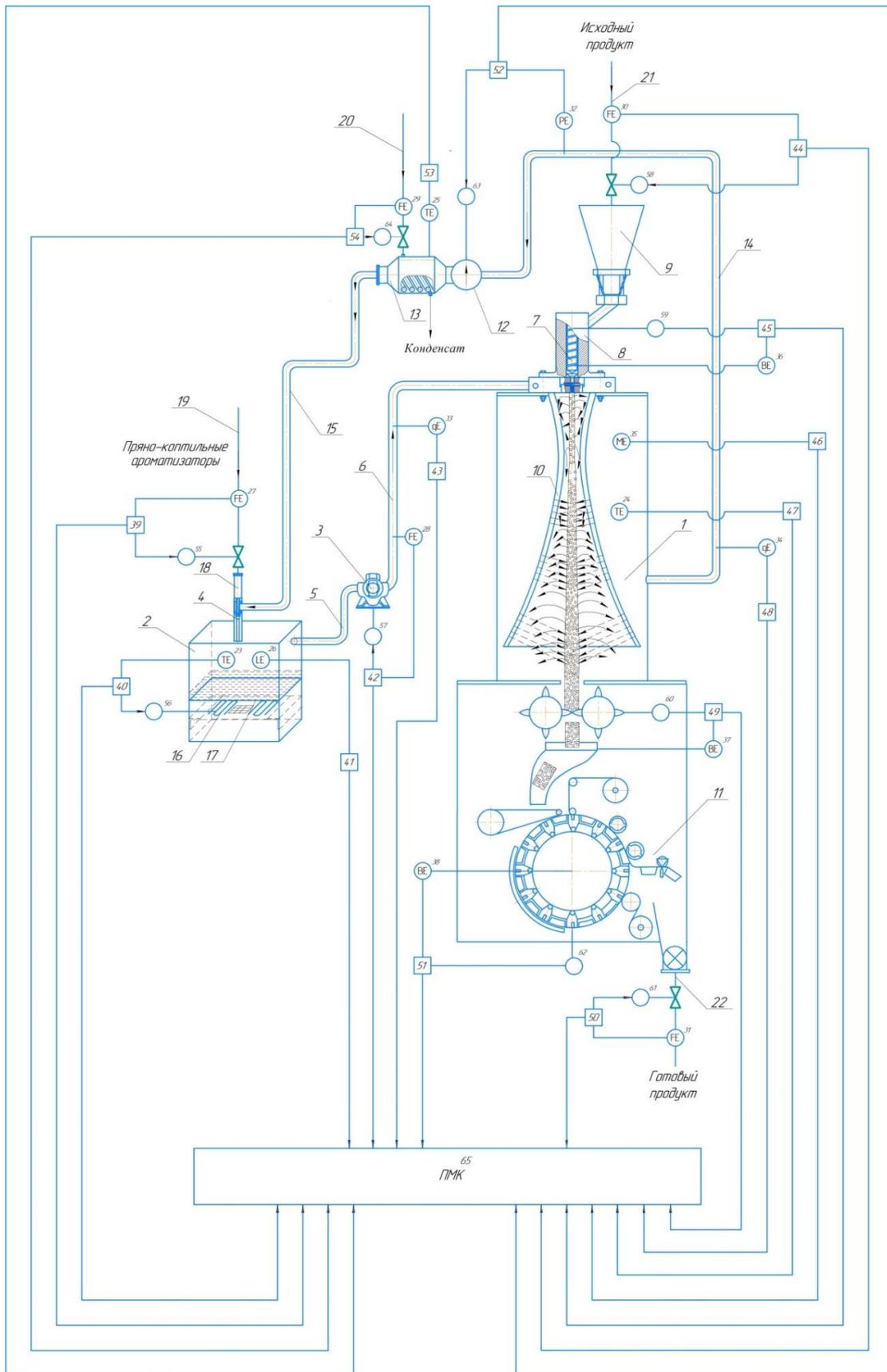


Рисунок 1. Схема, реализующая способ автоматического управления процессом вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных мясорастительных продуктов функционального назначения

Способ автоматического управления процессом вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных мясорастительных продуктов функционального назначения осуществляется следующим образом.

Управление ведётся в супервизорном режиме. При этом стабилизация значений технологических параметров производится локальными регуляторами, задание которым устанавливает программируемый микроконтроллер. Это позволяет существенно повысить надёжность работы системы управления, так как в случае возникновения сбоя в программе или аппаратного отказа самого контроллера локальные регуляторы будут продолжать работать с последними установленными настройками. Применение микроконтроллера позволяет производить анализ поведения объектов управления и выбирать оптимальные настроечные параметры регуляторов исходя из определённых критериев, таких как минимизация затрат энергоресурсов, скорость регулирования (время переходных процессов в системе) и др.

По линии 19 в парогенератор 2 подаются пряно-копильные ароматизаторы, расход которых стабилизируется с помощью датчика расхода 27 и локального регулятора 39 путем воздействия на исполнительный механизм 55.

Пряно-копильные ароматизаторы направляются в лоток 17 и заполняют его до необходимого уровня, который контролируется при помощи датчика 26, подавая сигнал на вторичный прибор 41. После чего включают нагревательный элемент 16 и доводят температуру до установленных значений при помощи датчика 23, который измеряет и контролирует температуру внутри парогенератора 2 на заданном уровне.

Локальный регулятор 40 стабилизирует температуру нагрева в парогенераторе 2, воздействуя на исполнительный механизм 56, изменяющий силу тока, подаваемую на нагревательный элемент 16.

Из парогенератора 2 копильная смесь отсасывается насосом 3, после которого по трубопроводу 6 поступает в каналы копильной установки 1. Через трубопровод 6 копильная смесь, расход которой достигает необходимого значения при помощи датчика 28, подаёт сигнал на локальный регулятор 42 путем воздействия на исполнительный механизм 57.

Исходное сырьё для получения экструдированных мясорастительных продуктов подаётся по линии 21 в загрузочное устройство 9, расход которого стабилизируется с помощью датчика расхода 30 и локального регулятора 44 путем воздействия на исполнительный механизм 58. После прохождения загрузочного устройства 9 продукты поступают в экструдер 8, а затем в копильную камеру 1.

Датчик 35 позволяет производить измерение и контроль влажности внутри копильной камеры 1, подавая сигнал на вторичный прибор 46. С помощью датчика 36 измеряется и контролируется частота вращения шнека 7 экструдера 8. Локальный регулятор 45 стабилизирует измельчение и перемешивание продукта и, соответственно, его перемещение к делительно-упаковочному устройству 11, воздействуя на исполнительный механизм 59, позволяет изменять частоту вращения шнека 7 экструдера 8.

Температурный режим (35...45 °С) внутри копильной камеры 1 контролируется при помощи датчика 24, подавая сигнал на вторичный прибор 47.

Необходимый уровень остаточного давления (10-50 кПа) в трубопроводе 14 достигает необходимого значения при помощи датчика 32, подавая сигнал на локальный регулятор 52 путем воздействия на исполнительный механизм 63.

В конденсатор 13 по линии 20 подается хладагент, расход которого стабилизируется при помощи датчика расхода 29 и локального регулятора 54 путем воздействия на исполнительный механизм 64. Отработанные пары пряно-копильных ароматизаторов переходят в жидкое состояние, после чего направляются в камеру смешивания 4 для повторного использования в процессе копчения.

С помощью датчика 37 измеряется и контролируется частота вращения шнека 7 делительного устройства. Локальный регулятор 49 стабилизирует процесс получения порций продукта, воздействуя на исполнительный механизм 60, что позволяет изменять частоту

вращения валиков делительного устройства. С помощью датчика 38 измеряется и контролируется частота вращения упаковочного устройства. Локальный регулятор 51 стабилизирует процесс упаковки продукта, воздействуя на исполнительный механизм 61, что позволяет изменять частоту вращения упаковочного механизма устройства 11.

Концентрация копильной смеси на входе и выходе из копильной камеры измеряется и контролируется при помощи датчиков 33 и 34 соответственно, подавая сигнал на вторичные приборы 43 и 48.

На линии 22 осуществляется выгрузка готового продукта, расход которого стабилизируется с помощью датчика расхода 31 и локального регулятора 50 путем воздействия на исполнительный механизм 61.

Отработанные пары пряно-копильных ароматизаторов посредством вакуум-насоса 12 перемещаются через рециркулирующий трубопровод 14 в конденсатор 13, температура в котором контролируется при помощи датчика 25, подавая сигнал на вторичный прибор 53.

В качестве основных факторов (см. табл. 1), влияющих и характеризующих процесс насыщения пряно-копильными ароматизаторами крупнодисперсных функциональных продуктов в пересыпающемся слое, выбраны параметры среды внутри копильной камеры:

- 1)  $x_1$  - температура в копильной камере, °С;
- 2)  $x_2$  - давление, создаваемое вакуум-насосом в системе, кПа;
- 3)  $x_3$  - скорость подачи паров пряно-копильных ароматизаторов в копильную камеру, м/с.

В качестве выходных данных используется функция отклика:

$y$  – удельные энергозатраты на 1 кг готовой продукции, которые определяют энергоёмкость процесса и являются одним из важнейших показателей его энергетической эффективности, кДж/кг.

Математическая модель регрессии представляется в виде отрезка ряда Тейлора, в который можно разложить неизвестную функцию в виде:

$$y(x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где  $b_0$  - свободный член;

$b_i$  - линейные эффекты;

$b_{ij}$  - эффекты парного взаимодействия;

$b_{ii}$  - квадратичные эффекты.

Таблица 1. Факторы и интервалы их варьирования

Наименование фактора	Обозначение	Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)	Интервал варьирования
Температура, $t, C^{\circ}$	$x_1$	35	40	45	5
Давление, $p, \text{кПа}$	$x_2$	10	30	50	20
Скорость подачи смеси в копильную камеру $v, \text{м/с}$	$x_3$	0,4	0,6	0,8	0,2

В таблице 2 представлены характеристики планирования и выходные параметры опытов. Выбор интервалов изменения факторов обусловлен технологическими условиями про-

цесса и техническими характеристиками коптильной установки. Программа исследований была заложена в матрицу планирования эксперимента (табл. 2).

Таблица 2. План эксперимента и выходные параметры опытов

Номер опыта ( $u$ )	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Выходной параметр $y(u, I)$ , кДж/кг
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$t, C^0$	$p$ , кПа	$v$ , м/с	
1	-1	-1	-1	35	10	0,4	0,53
2	+1	-1	-1	45	10	0,4	0,8
3	-1	+1	-1	35	50	0,4	1,1
4	-1	-1	+1	35	10	0,8	1,46
5	-1	0,19	0,19	35	33,8	0,638	1
6	0,19	-1	0,19	40,95	10	0,638	1,56
7	0,19	0,19	-1	40,95	33,8	0,4	1,69
8	-0,29	+1	+1	38,55	50	0,8	1,96
9	+1	-0,29	+1	45	24,2	0,8	0,93
10	+1	+1	-0,29	45	50	0,542	1,48

В таблице 3 представлены значения коэффициентов уравнения математической модели процесса.

Таблица 3. Коэффициенты уравнения математической модели

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{22}$	$b_{23}$	$b_{33}$
1,524	0,026	0,207	0,097	-0,633	0,086	-0,204	0,18	-0,172	0,113

В результате статистической обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии, адекватно описывающее рассматриваемый процесс насыщения пряно-коптильными ароматизаторами функциональных продуктов под влиянием исследуемых факторов:

$$y = 1,524 + 0,026x_1 + 0,207x_2 + 0,097x_3 - 0,633x_1^2 + 0,18x_2^2 + 0,113x_3^2 + 0,086x_1x_2 - 0,204x_1x_3 - 0,172x_2x_3 \quad (2)$$

Дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах: 0,003.  
 Число степеней свободы: 10.  
 Табличное значение критерия Стьюдента: 2,23.

Таблица 4. Критерии Стьюдента и значимость коэффициентов модели (1/0 - значимый/незначимый)

Критерии Стьюдента	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{22}$	$b_{23}$	$b_{33}$
$t$ -критерий	27,9	1,113	8,864	4,154	14,02	3,089	7,327	3,988	6,178	2,503
Значимость	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Дисперсия адекватности математической модели: 0,011.  
 Число степеней свободы при значимых коэффициентах: 1.  
 Табличное значение критерия Фишера: 4,96.  
 Расчетное значение критерия Фишера: 3,67.

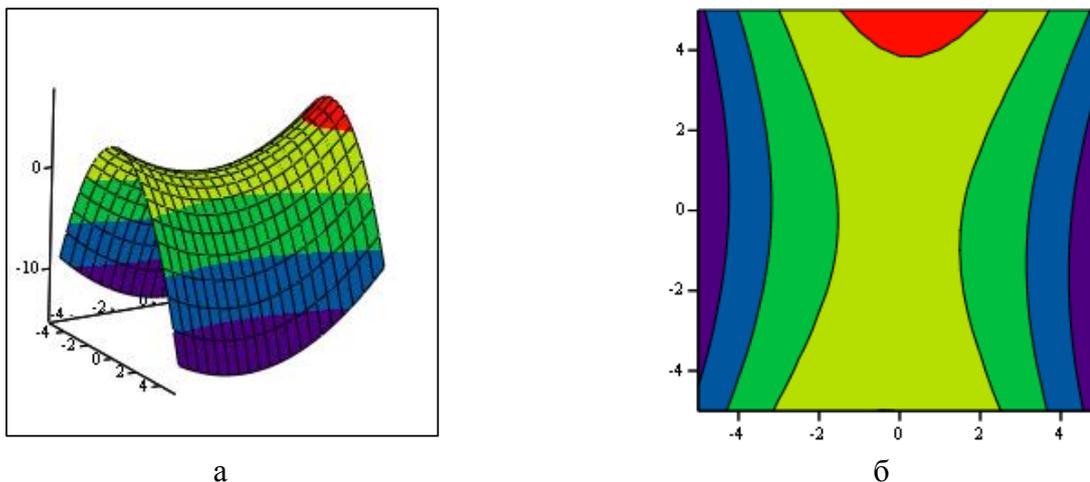


Рисунок 2. Графики зависимости удельных энергозатрат на 1 кг готовой продукции  $y$  от изучаемых факторов (при  $x_3 = 0$ ):  
а – поверхность отклика; б – двумерное сечение поверхности отклика

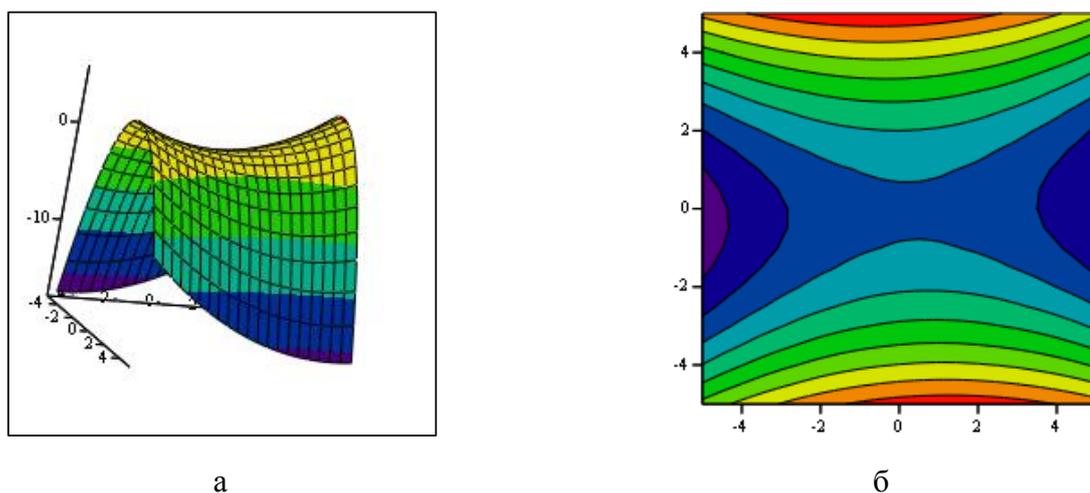


Рисунок 3. Графики зависимости удельных энергозатрат на 1 кг готовой продукции  $y$  от изучаемых факторов (при  $x_2 = 0$ ):  
а – поверхность отклика; б – двумерное сечение поверхности отклика

Анализируя полученное в результате моделирования уравнение (2), можно выделить факторы, которые оказывают наиболее выраженное влияние на рассматриваемый процесс. Таким образом, на удельные энергозатраты наибольшее влияние оказывает давление, создаваемое вакуум-насосом в трубопроводе. В меньшей степени влияет скорость подачи паров пряно-копильных ароматизаторов в копильную камеру и температура в копильной камере. Графическая интерпретация зависимости удельных энергозатрат на 1 кг готовой продукции от изучаемых факторов приведена на рис. 2-4.

Вывод по адекватности математической модели, по критерию Фишера, уравнение математической модели является адекватным. Модель применима для решения производственных задач.

Описанная выше задача решалась с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа с использованием пакета символьной математики Mathcad.

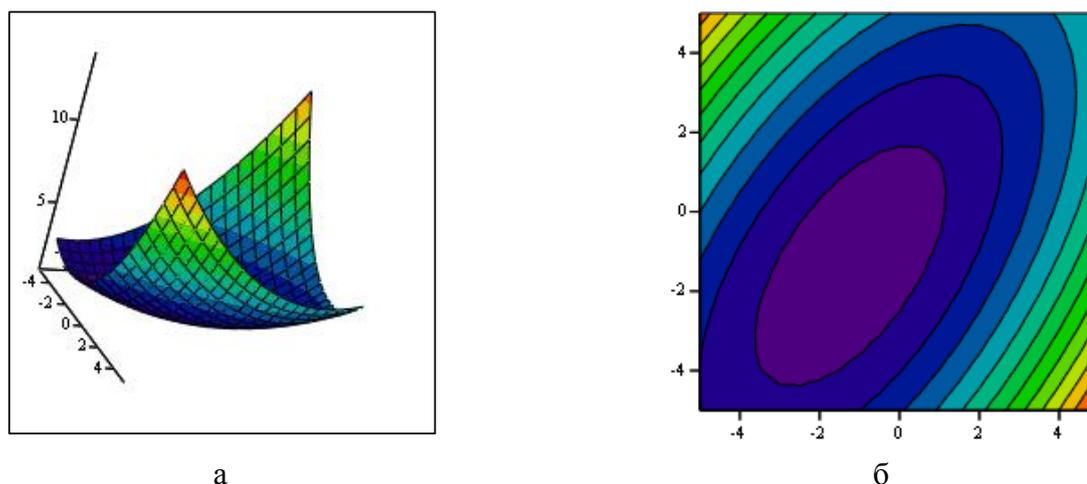


Рисунок 4. Графики зависимости удельных энергозатрат на 1 кг готовой продукции  $y$  от изучаемых факторов (при  $x_1 = 0$ ):  
а – поверхность отклика; б – двумерное сечение поверхности отклика

Для проверки достоверности полученных результатов проводили соответствующее количество параллельных опытов. Полученные данные находились внутри рассчитанных доверительных интервалов по всем выбранным критериям. При этом среднеквадратичная погрешность не превышала 5%.

### Выводы

1. Предлагаемый способ автоматического управления процессом вакуумного насыщения бездымными пряно-копильными ароматизаторами экструдированных мясорастительных продуктов функционального назначения имеет следующие преимущества:

- способствует повышению производительности оборудования благодаря обеспечению согласованной работы технологического оборудования;
- обеспечивает снижение удельных энергозатрат за счет поддержания наиболее рациональных условий протекания процесса.

2. Результаты решенной задачи оптимизации позволили выделить рациональный диапазон изменения входных факторов по трем исследуемым критериям функционирования копильной установки. Полученная математическая модель может применяться при создании копильных установок, а также способе управления технологическими режимами процесса насыщения пряно-копильными ароматизаторами экструдированных продуктов функционального назначения.

3. В качестве субоптимальных интервалов изменения параметров следует принять: давление, создаваемое вакуум-насосом в трубопроводе, 31-35 кПа; скорость подачи паров пряно-копильных ароматизаторов в копильную камеру, 0,65-0,8 м/с; температура в копильной камере, 38-42 °С.

4. В результате математического моделирования процесса насыщения пряно-копильными ароматизаторами крупнодисперсных функциональных продуктов в пересыпающемся слое получено нелинейное уравнение, адекватно описывающее рассматриваемый процесс и приведена его графическая интерпретация.

5. При планировании эксперимента и статистической обработке результатов получена информация о влиянии различных факторов на исследуемый процесс.

6. Построена математическая модель процесса, которая позволяет определить значение удельных энергозатрат на 1 кг готовой продукции внутри выбранных интервалов варьирования входных факторов.

7. Анализируя полученные данные, можно сказать, что процесс вакуумного насыщения пряно-копильными ароматизаторами экструдированных функциональных продуктов про-

ходит по сложному механизму, при этом значительное влияние имеет давление, создаваемое вакуум-насосом в системе, выступающее в роли движущей силы процесса, от которого зависят удельные энергозатраты для получения 1 кг готовой продукции.

#### **Список источников**

1. Вотинов М.В., Маслов А.А. Автоматизация технологического процесса термической обработки сырья в пищевой промышленности на примере малогабаритной сушильной установки // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2012. Т. 10. № 3. С. 15-25.
2. Ершов А.М., Похольченко В.А., Ершов М.А. Числа подобия в процессах сушки, копчения и обжаривания рыбы // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2015. № 4. С. 3-12.
3. Информационные системы в управлении пищевым производством / Д. И. Глушenkova, В. В. Заев, А. В. Кравцова, Е. С. Шелест // Ученые заметки ТОГУ. 2019. Т. 10. № 3. С. 68-73.
4. Кадирбек Е.А., Мусабеков А.А. Проектирование автоматизированной системы управления производства упаковок для пищевых продуктов // Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова. 2018. № 2(46). С. 61-65.
5. Карякин, А. Т. Основы автоматизации технологических процессов в пищевой промышленности // Успехи современной науки. 2016. Т. 4. № 9. С. 112-115.
6. Нейдорф Р.А., Мохсен М.Н. Автоматическая система взаимно инвариантного векторного управления переменными технологического состояния аппарата приготовления раствора // Вестник Донского государственного технического университета. 2016. Т. 16. № 1(84). С. 143-153.
7. Особенности управления многофакторными объектами пищевых производств / В. А. Балюбаш, С. Е. Алешичев, Е. А. Травина, В. Л. Иванов // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2019. Т. 9. № 1-2. С. 840-848.
8. Селунский В.В., Чурин В.Ю. Оптимизация процесса электростатического копчения бездымным способом // Вестник КрасГАУ. 2013. № 1(76). С. 153-159.
9. Шубкин С.Ю. Исследование свойств экструдированных мясорастительных продуктов и процесса их вакуумного насыщения бездымными пряно-копильными ароматизаторами // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022. № 3. С. 243-253.
10. Шубкин С.Ю., Бунеев С.С. Оптимизация процесса получения экструдированных продуктов функционального назначения с добавлением бездымных пряно-копильных ароматизаторов // Агропромышленные технологии Центральной России. 2022. № 4(26). С. 41-47.
11. Шубкин С.Ю., Шахов С.В. Разработка установки для проведения процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов // Агропромышленные технологии Центральной России. 2022. № 4(26). С. 95-101.

#### **References**

1. Votinov M.V., Maslov A.A. Automation of the technological process of heat treatment of raw materials in the food industry on the example of a small-sized drying plant. Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Information Technology, 2012, vol. 10, no. 3, pp. 15-25.
2. Ershov A.M., Pohlchenko V.A., Ershov M.A. Similarity numbers in the processes of drying, smoking and roasting fish. Scientific Journal of the National Research University of ITMO. Series: Processes and devices of food production, 2015, no. 4, pp. 3-12.
3. Information systems in food production management. D. I. Glushenkova, V. V. Zuev, A.V. Kravtsova, E. S. Shelest. Scientific notes of TOGU, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 68-73.
4. Kadyrbek E.A., Musabekov A.A. Designing an automated control system for the production of food packages. Scientific works of M. Auevov SKSU, 2018, no. 2(46), pp. 61-65.

5. Karyakin, A. T. Fundamentals of automation of technological processes in the food industry. *Successes of modern science*, 2016, vol. 4, no. 9, pp. 112-115.

6. Neidorf R.A., Mohsen M.N. Automatic system of mutually invariant vector control of variables of the technological state of the solution preparation apparatus. *Bulletin of the Don State Technical University*, 2016, vol. 16, no. 1(84), pp. 143-153.

7. Features of management of multifactorial food production facilities. V. A. Balyubash, S. E. Alyoshichev, E. A. Travina, V. L. Ivanov. *Economics: yesterday, today, tomorrow*, 2019, vol. 9, no. 1-2, pp. 840-848.

8. Selunsky V.V., Churin V.Yu. Optimization of the process of electrostatic smokeless smoking. *Bulletin of KrasSAU*, 2013, no. 1(76), pp. 153-159.

9. Shubkin S. Yu. Investigation of the properties of extruded meat and vegetable products and the process of their vacuum saturation with smokeless spicy-smoky flavors. *Technologies of the food and processing industry of the agroindustrial complex – healthy food products*, 2022, no. 3. pp. 243-253.

10. Shubkin S.Yu., Buneev S.S. Optimization of the process of obtaining extruded functional products with the addition of smokeless spicy-smoky flavors. *Agro-industrial technologies of Central Russia*, 2022, no. 4(26), pp. 41-47.

11. Shubkin S.Yu., Shakhov S.V. Development of an installation for carrying out the process of vacuum saturation with vapors of spicy-smoky flavors of extruded products. *Agro-industrial technologies of Central Russia*, 2022, no. 4(26), pp. 95-101.

#### **Информация об авторах**

**С.Ю. Шубкин** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических процессов в машиностроении и агроинженерии;

**С.В. Шахов** – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств;

**С.С. Бунеев** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технологических процессов в машиностроении и агроинженерии.

#### **Information about the authors**

**S.Yu. Shubkin** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Processes in Mechanical Engineering and Agroengineering;

**S.V. Shakhov** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Production Machinery and Apparatus;

**S.S. Buneev** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Processes in Mechanical Engineering and Agroengineering.