

Денис Александрович Алесенко<sup>1✉</sup>, Василий Викторович Матюшев<sup>2</sup>,

Ирина Александровна Чаплыгина<sup>3</sup>, Алексей Андреевич Беляков<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск. Россия

<sup>1</sup>korven-dalas@rambler.ru

<sup>2</sup>don.matyusheff2015@yandex.ru

<sup>3</sup>ledum\_palustre@mail.ru

<sup>4</sup>bellimfor@mail.ru

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОХЛАДИТЕЛЯ ЭКСТРУДАТА

*Цель исследования – совершенствование технологического процесса получения экструдата посредством модификации звена охлаждения материала и определения оптимальных режимов его работы для повышения эффективности системы в целом. Задачи: выполнить модификацию звена охлаждения экструдата; раскрыть закономерности, связанные с продолжительностью и энергетической эффективностью (энергоёмкостью) процесса охлаждения материала. Анализ системы «экструдирование – охлаждения экструдата» выявил факторные и результатные показатели данной системы, позволяющие получить числовые оценки статистических характеристик. Факторные показатели системы «экструдирование – охлаждение экструдата» определяют технико-технологические условия и режимы процесса охлаждения. Схемы определения продолжительности и энергоёмкости процесса охлаждения представляются полиномами второй степени. Погрешность приближения показателей продолжительности и энергоёмкости по вариантам опытов не превосходила 5 %, а коэффициент детерминации был выше 95 %. Отсутствие систематических погрешностей и несмещённость оценок, получаемых с помощью предложенной схемы, гарантируют, что выявленные закономерности могут быть использованы как для сглаживания опытных данных, так и для прогностических целей исследования системы «экструдирование – охлаждение экструдата», а также для модельного представления результатного показателя продолжительности и энергоёмкости процесса охлаждения экструдата. Предложена и обоснована научная гипотеза оптимизации процесса охлаждения экструдата. Определены оптимальные конструктивно-режимные характеристики работы охладителя экструдата, которые формируются посредством выбора загружаемого веса в охладитель 9 кг, скорости вращения вала 17,111 об/мин, угла наклона лопастей 9,9999 град., температуры хладагента 1,1666 °С, скорости потока хладагента 4,2777 м/с, градиента температур экструдата 38,9666 °С. В области эффективности процесса охлаждения полуфабриката величины продолжительности и энергоёмкости оцениваются соответственно значениями 0,0728 ч и 0,0039 кВтч/кг. Реализованный подход может быть использован для разработки нового оборудования, включаемого в технологическую линию.*

**Ключевые слова:** технологический процесс получения экструдата, конструкция охладителя экструдата, экструдат, система «экструдирование – охлаждения экструдата», продолжительность охлаждения экструдата, энергоёмкость охлаждения экструдата

**Для цитирования:** Алесенко Д.А., Матюшев В.В., Чаплыгина И.А., и др. Совершенствование конструкции и оптимизация режимов работы охладителя экструдата // Вестник КрасГАУ. 2025. № 3. С. 229–245. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-3-229-245.

Denis Aleksandrovich Alesenko<sup>1✉</sup>, Vasily Viktorovich Matyushev<sup>2</sup>,  
Irina Aleksandrovna Chaplygina<sup>3</sup>, Alexey Andreevich Belyakov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. Russia

<sup>1</sup>korven-dalas@rambler.ru

<sup>2</sup>don.matyusheff2015@yandex.ru

<sup>3</sup>ledum\_palustre@mail.ru

<sup>4</sup>bellimfor@mail.ru

## IMPROVING THE DESIGN AND OPTIMIZING THE OPERATING MODES OF THE EXTRUDATE COOLER

*The objective of the study is to improve the technological process of obtaining an extrudate by modifying the material cooling link and determining the optimal modes of its operation to improve the efficiency of the system as a whole. Tasks: to modify the extrudate cooling link; to reveal the patterns associated with the duration and energy efficiency (energy intensity) of the material cooling process. The analysis of the "extrusion – extrudate cooling" system revealed the factor and result indicators of this system, allowing to obtain numerical estimates of the statistical characteristics. The factor indicators of the "extrusion – extrudate cooling" system determine the technical and technological conditions and modes of the cooling process. The schemes for determining the duration and energy intensity of the cooling process are represented by second-degree polynomials. The error in approximating the duration and energy intensity indicators for the experimental variants did not exceed 5 %, and the determination coefficient was higher than 95 %. The absence of systematic errors and the unbiasedness of the estimates obtained using the proposed scheme guarantee that the identified patterns can be used both for smoothing the experimental data and for predictive purposes of studying the "extrusion – extrudate cooling" system, as well as for the model representation of the resulting duration and energy intensity indicator of the extrudate cooling process. A scientific hypothesis for optimizing the extrudate cooling process is proposed and substantiated. The optimal design and operating characteristics of the extrudate cooler have been determined, which are formed by selecting the cooler loading weight of 9 kg, shaft rotation speed of 17.111 rpm, blade inclination angle of 9.9999 degrees, coolant temperature of 1.1666 °C, coolant flow rate of 4.2777 m/s, and extrudate temperature gradient of 38.9666 °C. In the area of the efficiency of the semi-finished product cooling process, the duration and energy consumption values are estimated at 0.0728 h and 0.0039 kWh/kg, respectively. The implemented approach can be used to develop new equipment included in the process line.*

**Keywords:** extrudate production process, extrudate cooler design, extrudate, "extrusion – extrudate cooling" system, extrudate cooling duration, extrudate cooling energy consumption

**For citation:** Alesenko DA, Matyushev VV, Chaplygina IA, et al. Improving the design and optimizing the operating modes of the extrudate cooler. *Bulletin of KSAU*. 2025;(3):229-245. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-3-229-245.

**Введение.** Согласно маркетинговым исследованиям, с 2021 г. отмечается рост спроса на здоровые продукты. Среди населения растет интерес к фермерским продуктам, выпечке без сахара, натуральным пробиотикам, растительным продуктам, витаминам и добавкам для иммунитета. В развитых странах популярнее становятся органические и натуральные продукты [1, 2].

На российском рынке функциональные продукты делятся преимущественно на четыре категории: изделия на основе злаков (каши, хлопья), включая хлебопекарные и кондитерские товары; безалкогольные напитки; молочная продукция; а также продукция масложирового сектора. Про-

дукция других сегментов пищевой промышленности представлена в меньшем объеме [3]. Активно развивается направление получения современных пищевых ингредиентов [4] для использования при производстве не только новых, но и традиционных видов продуктов питания. Такие компоненты позволяют создавать готовую продукцию с улучшенными характеристиками, обогащенную полезными веществами и обладающую функциональной направленностью [5, 6].

Процесс экструзии широко используется в пищевой промышленности как для производства готовых продуктов питания [7, 8], так и для получения пищевых ингредиентов [9–13], в т. ч.

функциональной направленности [14–16]. Экструзионные процессы, которые применяются для переработки растительного сырья при производстве пищевых продуктов, приводят к изменению характеристик исходного сырья и позволяют получать готовую продукцию с заранее определенными свойствами [17–22].

Для осуществления непрерывности технологического процесса производства экструдатов, исключения спекания белковой составляющей требуется его охладить до температуры, не более чем на 10 °С превышающей температуру окружающего воздуха [23, 24]. Эффективное охлаждение позволяет контролировать такие параметры, как влажность, плотность и структура продукта, что напрямую определяет его качество и потребительские свойства [25].

Качество получаемого экструдата определяется не только характером температурного воздействия во время процесса экструзии, но также и продолжительностью последующего этапа его охлаждения [25, 26]. В работе В.А. Коваленка и соавторов [27] дано описание охлаждения экструдата как двухэтапного процесса. На первом этапе, длительностью не более 10 с, происходит интенсивное самоиспарение влаги от 25 до 50 % от ее первоначального содержания. Второй этап является более продолжительным по времени, в течение данного этапа происходит завершение формирования окончательной структуры экструдата. Согласно исследованиям Д.И. Фролова и коллег [26], скорость снижения температуры экструдата сразу после выхода из экструдера существенно зависит от длины его частиц.

Охлаждение экструдата необходимо не только для предотвращения деформации, улучшения стабильности формы и сохранения свойств материала, но и позволяет снизить время обработки продукта, повысить производительность поточно-технологической линии [28].

В процессе охлаждения экструдированных продуктов ключевую роль играет используемое для этих целей оборудование [25, 29]. Как правило, с целью охлаждения стренга, выходящего из ствола экструдера, применяются устройства, направленные на использование потоков воздуха для снижения температуры экструдата. При этом могут применяться как пассивные, так и активные системы вентилирования, с использованием или без использования предварительного понижения температуры охлаждающего агента.

Например, известно, что использование шахтного охладителя с установленными значениями конструктивных и технологических параметров позволяет при нормальных атмосферных условиях охладить полножирную экструдированную сою с температуры 80 °С до температуры, не превышающей температуру окружающей среды на 10 °С, за 25–30 мин [25].

В результате проведенного анализа технических средств, применяемых в существующих поточно-технологических линиях для охлаждения экструдатов [25, 29], установлено, что они, вследствие недостатков конструкции теплообменного аппарата, имеют низкую интенсивность охлаждения готового продукта.

В связи с этим исследования, направленные на создание нового и совершенствование существующего оборудования для охлаждения экструдатов, установление закономерностей процесса охлаждения с целью определения рациональных конструктивно-режимных параметров и режимов работы охладителей, являются актуальными.

Охлаждение экструдата является одним из ключевых этапов в производстве, который влияет на качество конечного продукта, его физические и механические свойства. В статье рассматриваются методы и подходы к совершенствованию технологического процесса охлаждения экструдата. В результате анализа существующих технологий и методов охлаждения предлагаются рекомендации по оптимизации данного процесса.

**Цель исследования** – совершенствование технологического процесса получения экструдата посредством модификации звена охлаждения материала и определения оптимальных режимов его работы для повышения эффективности системы в целом.

**Задачи:** выполнить модификацию звена охлаждения экструдата; раскрыть закономерности, связанные с продолжительностью и энергетической эффективностью (энергоемкостью) процесса охлаждения материала; выявить причинно-следственные связи между различными факторами, влияющими на процесс охлаждения экструдата; разработать теоретическую модель для описания и оптимизации процесса охлаждения по показателям продолжительности, энергоемкости и обобщенному показателю; создать расчетные схемы, позволяющие прогнозировать продолжительность и энергоемкость процесса охлаждения полуфабриката в выбранной области.

ти эффективности, включающей окрестность точки условного оптимума (минимума).

Предложенный обобщенный показатель эффективности модифицированного звена охлаждения, представленный сверткой результатных показателей продолжительности и энергоёмкости процесса охлаждения полуфабриката, позволяет определить оптимальные конструктивно-режимные параметры работы установки.

#### Методы, результаты и их обсуждение.

В процессе выполнения данной работы использованы различные методы исследования и анализа данных. Для оптимизации условий проведения исследований и повышения точности результатов при выполнении работы использованы методы планирования эксперимента и математического моделирования для создания моделей изучаемых процессов и явлений. С целью выявления взаимосвязи между различными переменными и построения регрессионных моделей был проведен корреляционно-регрессионный анализ. Проверка гипотез о наличии статистических закономерностей и значимости полученных результатов осуществлялась с использованием таких статистических тестов, как тест Пирсона (для оценки соответствия эмпирического распределения теоретическому), тест Стьюдента (для сравнения средних значений выборок) и тест Дарбина–Вотсона (для выявления автокорреляции остатков в регрессионной модели). Реализацию указанных методов и статистическую обра-

ботку данных проводили с применением пакета регрессионного анализа DataFit и специализированного программного пакета Statistics в составе системы компьютерной алгебры Maple, что позволило повысить точность и надежность полученных результатов [30–33].

Технологический процесс производства экструдата из зерновых культур состоит из нескольких последовательных операций (рис. 1). Зерно доставляется на производственную площадку и проходит этап подготовки к дальнейшей обработке: очистку от примесей и увлажнение (при необходимости) для достижения оптимальной для экструзии влажности. Подготовленное зерно подается в экструдер, где под воздействием баротермического воздействия преобразуется в продукт с новой структурой. После выхода из экструдера горячий стренг подвергается охлаждению до температуры, предотвращающей дальнейшее разложение высокомолекулярных компонентов для обеспечения стабильности конечного продукта. В зависимости от требований к дальнейшему использованию готового продукта экструдат подвергается либо дроблению на фракции различного размера, либо измельчению до состояния порошка. Готовый экструдат направляется либо на склад для хранения, либо для непосредственного использования в других производственных процессах: изготовления кормов или пищевых продуктов.



Рис. 1. Схема технологического процесса производства экструдата

Diagram of the technological process of extrudate production

Для эффективного охлаждения экструдата учеными Красноярского государственного аграрного университета была разработана специальная конструкция охладителя для сыпучих

материалов. На данную конструкцию, внешний вид которой представлен на рисунке 2, был получен патент на полезную модель [34].



*Рис. 2. Общий вид оборудования для охлаждения экструдата*

*General view of the equipment for cooling the extrudate*

Технологический процесс охлаждения экструдата на разработанной установке протекает следующим образом.

После экструдера горячий экструдат длиной до 42 мм (после отсекающего стренга) поступает в загрузочную горловину охладительной установки и затем в рабочую камеру (рабочую зону) установки. Пока рабочая зона полностью не заполнится экструдатом, разгрузочное окно остается закрытым заслонкой. После полного заполнения рабочей камеры экструдатом запускается привод вала установки с закрепленными на нем лопастями, вытяжной вентилятор и система охлаждения, открывается заслонка выгрузного окна.

Экструдат под воздействием лопастей перемещается от внутренней стенки рабочей камеры установки к валу охладителя с жалюзийной поверхностью и от вала в противоположном направлении. Лопасти установлены по спирали вдоль оси вала. При этом каждая вторая лопасть изогнута радиально в сторону, противоположную направлению вращения вала, тогда как остальные лопасти изогнуты в сторону вращения. Холодный воздух из установки с хладагентом поступает в рабочую камеру охладителя, а горячий воздух, образующийся при контакте с

экструдатом, отводится через жалюзийную поверхность вала вытяжным вентилятором.

Возвратно-поступательное перемещение продукта в горизонтальной плоскости способствует увеличению интенсивности охлаждения экструдата. Этот процесс также усиливается благодаря снижению температуры хладагента и повышению скорости отвода горячего воздуха.

Исследованиями В.В. Бледных с коллегами [35] установлено, что оптимальная толщина слоя полножирной экструдированной сои в шахтном охладителе должна составлять 0,4 м. Увеличение толщины слоя экструдата способствует увеличению энергоемкости и продолжительности процесса охлаждения продукта. В экспериментальной установке диаметр рабочей камеры охладителя составляет 0,4 м.

В связи с тем, что температура в производственном помещении производства экструдатов в зависимости от периода года может изменяться от 35 °С и ниже, то готовый продукт необходимо охладить до температуры, не превышающей температуру окружающей среды на 10 °С.

Для исследований в качестве факторов были взяты вес экструдата ( $x_1$ , кг), предназначенный для охлаждения, скорость вращения вала ( $x_2$ , об/мин), угол наклона лопастей ( $x_3$ , град.)

относительно вертикальной плоскости, температура ( $x_4$ , °C) и скорость охлаждающего агента (воздуха) ( $x_5$ , м/с), градиент (разность) температур экструдата после экструдера и охладителя ( $x_6$ , °C). В качестве критериев оптимизации выбраны продолжительность ( $y_1$ , ч) и энергоёмкость процесса охлаждения экструдата ( $y_2$ , кВт ч/кг).

Предварительный анализ системы «экструдирование – охлаждение экструдата» выявил факторные и результатные показатели данной системы, позволяющие получить числовые оценки статистических характеристик.

Факторные показатели системы «экструдирование – охлаждение экструдата» определяют технико-технологические условия и режимы процесса охлаждения.

Так, показатель веса экструдата ( $x_1$ , кг) варьируется в диапазоне 3,35–9,00 кг с коэффициентом вариации 23,18 %, оценивается средним значением 6,6156 кг и стандартным отклонением 1,5338 кг.

Показатель скорости вращения вала ( $x_2$ , об/мин) варьируется в диапазоне 10–26 об/мин, имеет коэффициент вариации 45,90 %, среднее значение 18 об/мин и стандартное отклонение 8,2624 об/мин.

Показатель угла наклона лопастей ( $x_3$ , град.) варьируется в диапазоне 0–30 град. с коэффициентом вариации 91,08 %, средним значением 16,8750 град. и стандартным отклонением 15,3704 град.

Показатель температуры охлаждающего агента (воздуха) ( $x_4$ , °C) изменяется от –2,5 до 3,5 °C, имеет коэффициент вариации 283,47 %, среднее значение 0,9375 °C при стандартном отклонении 2,6575 °C.

Показатель скорости охлаждающего агента ( $x_5$ , м/с) изменяется в пределах от 2,5 до 4,5 м/с, имеет коэффициент вариации 24,71 %, среднее значение 3,8750 м/с и стандартное отклонение 0,9574 м/с.

Показатель градиента (разности) температур экструдата ( $x_6$ , °C) варьируется в пределах 32,3–52,3 °C, имеет коэффициент вариации 13,46 % и стандартное отклонение 5,3853 °C.

Результатные показатели системы «экструдирования – охлаждения экструдата» описывают динамику процесса охлаждения и его временную и энергетическую эффективность.

Так, показатель продолжительности процесса охлаждения экструдата ( $y_1$ , ч) варьируется в диапазоне 0,0759–0,2517 ч, имеет коэффициент

вариации 36,97 % при стандартном отклонении 0,0551 ч.

Показатель энергоёмкости процесса охлаждения экструдата ( $y_2$ , кВт ч/кг) варьируется в диапазоне 0,0038–0,0066 кВтч/кг, имеет коэффициент вариации 12,93 % при стандартном отклонении 0,0006 кВтч/кг.

Для исследования тесноты связи (силы взаимодействия) между группой факторных показателей и группой результатных показателей системы «экструдирование – охлаждение экструдата» вычисляются коэффициенты корреляции  $\rho_{ij}$  для каждой пары показателей и анализируют их близость к нулю, что указывает на отсутствие взаимосвязи между показателями, либо к значениям  $\pm 1$ , что свидетельствует о наличии зависимости между соответствующими показателями.

Поскольку значимые коэффициенты корреляции показателей оказались далеки от 0 и  $\pm 1$ , то закономерность изменения пары результатных показателей  $y = (y_1, y_2)$  в зависимости от шести факторных показателей  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  является нелинейной и поэтому можно ожидать, что общий вид уравнения регрессии содержит некоторые члены  $b_{ij}$ ,  $x_i$ ,  $x_j$  с регрессорами 2-й степени.

Для ранжирования влияния факторных показателей  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  на результатный показатель продолжительности процесса охлаждения экструдата ( $y_1$ , ч) воспользуемся абсолютной величиной коэффициента корреляции. На первом месте по силе корреляционной связи находится показатель веса экструдата ( $x_1$ , кг) с коэффициентом корреляции  $\rho(x_1, y_1) = 0,6107$ . На втором месте – показатель скорости подачи охлаждающего агента ( $x_5$ , м/с) с коэффициентом  $\rho(x_5, y_1) = -0,4084$ , формирующим отрицательную корреляционную связь. На третьем месте находится корреляционная связь с показателем угла наклона лопастей ( $x_3$ , град.), которая оценивается коэффициентом  $\rho(x_3, y_1) = 0,2320$ .

Аналогично выполним ранжирование влияния факторных показателей  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  на результатный показатель энергоёмкости процесса охлаждения экструдата ( $y_2$ , кВт ч/кг). На первом месте находится показатель скорости подачи охлаждающего агента ( $x_5$ , м/с) с коэффициентом  $\rho(x_5, y_2) = 0,5463$ , формирующим положительную корреляционную связь. На втором месте – показатель скорости вращения вала ( $x_2$ , об/мин), с коэффициентом корреляции

$\rho(x_2, y_2) = -0,5367$ , формирующим отрицательную корреляционную связь. На третьем месте находится показатель угла наклона лопастей ( $x_3$ , град.), имеющий с результатным показателем положительную корреляционную связь с оценкой  $\rho(x_3, y_2) = 0,3963$ .

Между результатными показателями продолжительности процесса охлаждения экстру-

дата ( $y_1$ , ч) и энергоемкости процесса охлаждения экструдата существует отрицательная корреляция с оценкой  $\rho(y_1, y_2) = -0,1537$ . Это означает, что коэффициент линейной корреляции является небольшим. Тем не менее коэффициент нелинейной корреляции  $R = 0,8604$  достаточно высок, что можно наблюдать по корреляционному полю (рис. 3).

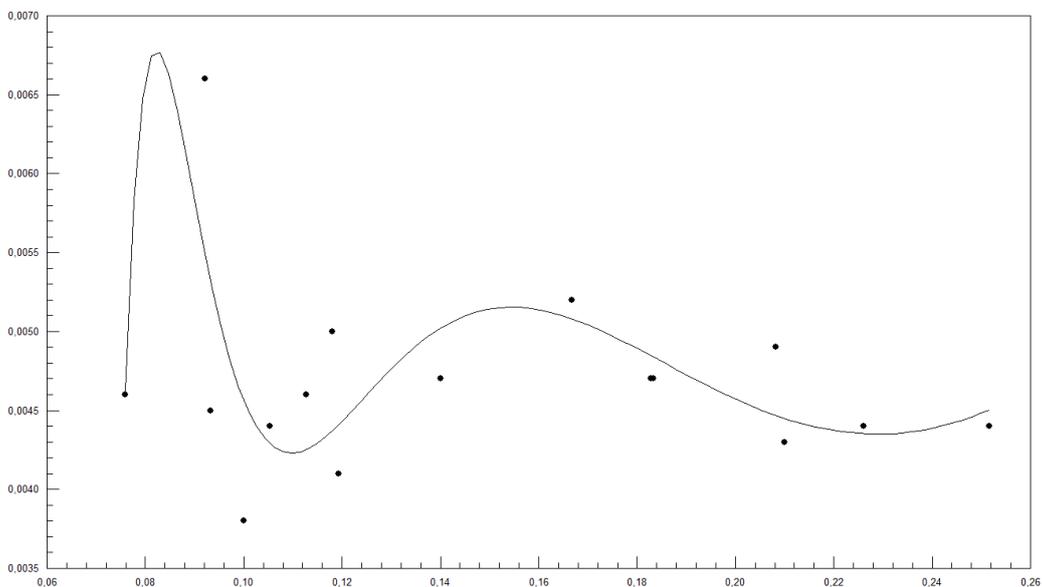


Рис. 3. Корреляционное поле показателей продолжительности ( $y_1$ , ч) и энергоемкости ( $y_2$ , (кВт · ч)/кг) процесса охлаждения экструдата

*Correlation field of indicators of duration ( $y_1$ , h) and energy intensity ( $y_2$ , (kW · h)/kg) of the cooling process of the extrudate*

Следовательно, в системе «экструдирование – охлаждение экструдата» можно ожидать, что результатные показатели процесса охлаждения экструдата являются подобными: задаются уравнением общего вида, но значения коэффициентов у каждого свои.

Схема определения продолжительности процесса охлаждения экструдата ( $y_1$ , ч) в зависимо-

сти от веса экструдата ( $x_1$ , кг), скорости вращения вала ( $x_2$ , об/мин), угла наклона лопастей ( $x_3$ , град.), температуры охлаждающего агента (воздуха) ( $x_4$ , °С), скорости подачи охлаждающего агента ( $x_5$ , м/с), градиента (разности) температур экструдата ( $x_6$ , °С) на уровне детерминации 98,10 % представляется следующей полиномиальной функцией 2-й степени (рис. 4):

$$f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = L(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) + Q(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6),$$

где  $L(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \sum_k b_k x_k$ ,  $Q(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j$  – соответственно линейная и квадратичная формы, составляющие регрессионную функцию;

$$\begin{aligned} b_0 &= -3,983450397, b_1 = 1,554552288, b_2 = -0,016721343, \\ b_3 &= -0,175709377, b_4 = -0,117734973, b_5 = 0,114801852, \\ b_6 &= 0,103766035, b_{12} = 0, b_{13} = 0, b_{14} = -0,033210459, \\ b_{15} &= 0,036761966, b_{16} = -0,036993336, b_{23} = 0,007927395, \\ b_{25} &= 0, b_{26} = 0, b_{34} = 0,000568238, b_{35} = 0, b_{36} = 0,004812296, \end{aligned}$$

$b_{45} = -0,020773662$ ,  $b_{46} = 0,007416259$ ,  $b_{56} = 0$  – коэффициенты регрессии, отыскиваемые методом наименьших квадратов с помощью компьютерного пакета, причем незначимые коэффициенты, выявленные по критерию Стьюдента (Госсета), оказались равными нулю.

Относительная погрешность приближения не превосходит 4,44 %, а среднее отклонений оценивается числом, близким к нулю, – 0,0000, что указывает на достаточную точность и отсутствие систематических погрешностей – независимость остатков (отклонений) регрессии, которая дополнительно проверена по критерию Дарбина–Ватсона.

Средние значения фактической и вычисленной продолжительности охлаждения экструдата, в пределах принятой точности вычислений, совпадают и равны 0,1491 ч, что указывает на несмещенность оценок, получаемых с помощью предложенной схемы.

Таким образом, выявленная закономерность может быть использована как для сглаживания опытных данных, так и для прогностических целей исследования системы «экструдирование – охлаждение экструдата», а также для модельного представления резульатного показателя продолжительности процесса охлаждения экструдата.

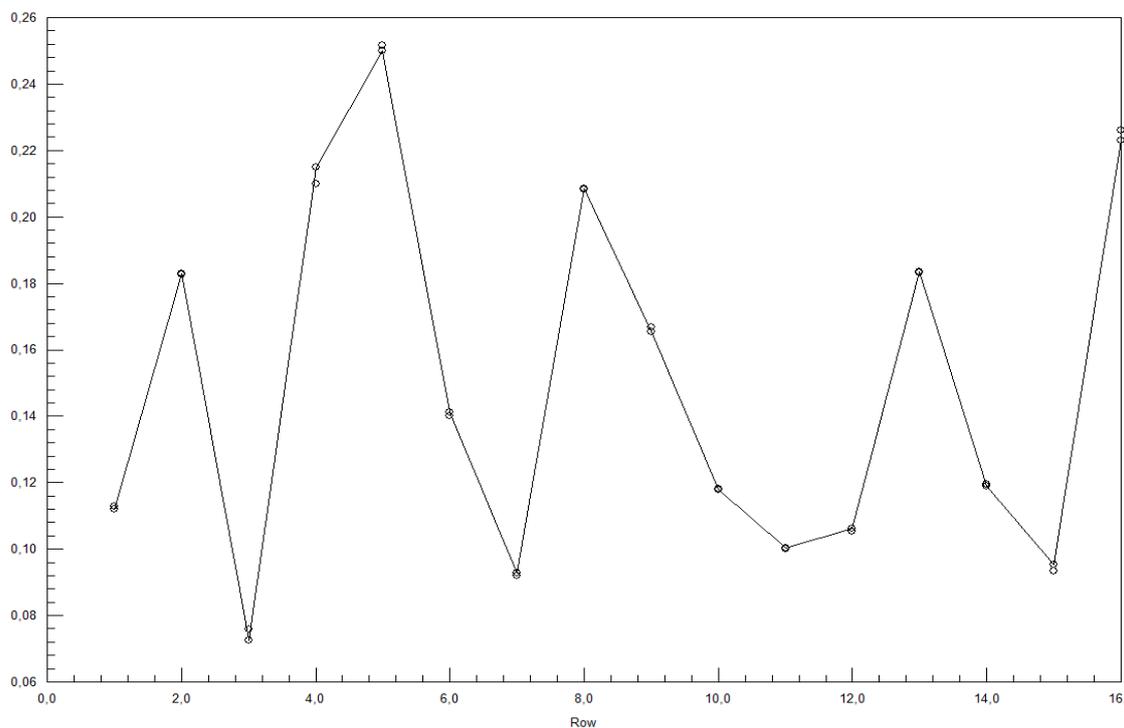


Рис. 4. Изменение продолжительности охлаждения экструдата ( $y_1$ , ч) по вариантам опытов при изменении группы факторных показателей  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$

*Change in the cooling time of the extrudate ( $y_1$ , h) according to the experimental variants with a change in the group of factor indicators  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$*

Схема определения энергоемкости процесса охлаждения экструдата ( $y_2$ , (кВт · ч)/кг) в зависимости от веса экструдата ( $x_1$ , кг), скорости вращения вала ( $x_2$ , об/мин), угла наклона лопастей ( $x_3$ , град.), температуры охлаждающего агента

(воздуха) ( $x_4$ , °С), скорости подачи охлаждающего агента ( $x_5$ , м/с), градиента (разности) температур экструдата ( $x_6$ , °С) на уровне детерминации 98,04 % представляется следующей функцией (рис. 5):

$$f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = L(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) + Q(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6),$$

где  $L(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \sum_k b_k x_k$ ,  $Q(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j$  – соответственно линейная и квадратичная формы, составляющие регрессионную функцию;

$$\begin{aligned}
 b_0 &= 0,04357766717, b_1 = -0,007824658077, b_2 = 0,00001394191777, \\
 b_3 &= 0,0002952191697, b_4 = 0,0001678896017, b_5 = -0,00364743629, \\
 b_6 &= -0,0006013147131, b_{12} = 0, b_{13} = 0, b_{14} = 0,0001627643487, \\
 b_{15} &= 0,000532994597, b_{16} = 0,0001419859305, b_{23} = 0, \\
 b_{24} &= -0,0001772883349, b_{25} = 0, b_{26} = 0, b_{34} = 0, b_{35} = 0, \\
 b_{36} &= -0,000008179705779, b_{45} = 0,0001527390323,
 \end{aligned}$$

$b_{46} = -0,00003945983094, b_{56} = 0$  – коэффициенты регрессии, отыскиваемые методом наименьших квадратов с помощью компьютерного пакета.

Заметим, что в уравнении продолжительности  $b_{34} \neq 0$  – значимый коэффициент, а в аналогичном уравнении энергоемкости  $b_{34} = 0$  – незначимый коэффициент регрессии по критерию Стьюдента.

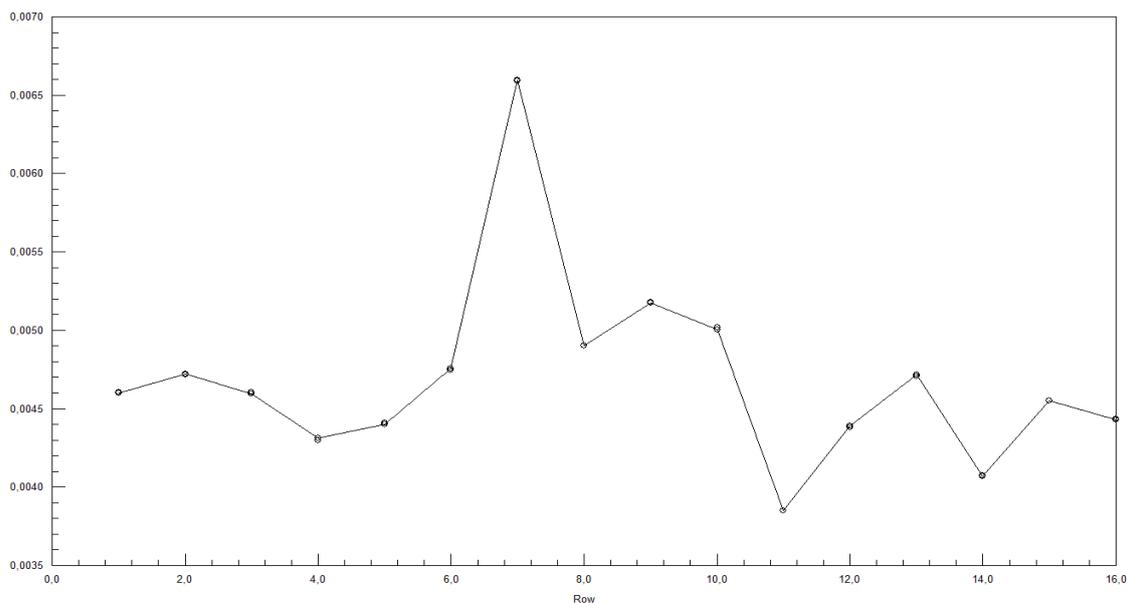


Рис. 5 – Изменение энергоемкости охлаждения экструдата ( $y_2$ , (кВт · ч)/кг) по вариантам опытов при изменении группы факторных показателей  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$

*Change in the cooling energy intensity of the extrudate ( $y_2$ , (kW · h)/kg) according to the experimental variants with a change in the group of factor indicators  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$*

Относительная погрешность приближения не превосходит 0,38 %, среднее отклонений оценивается числом, близким к нулю, оба средних значения фактической и вычисленной энергоемкости равны 0,0047 (кВт · ч)/кг, что указывает на достаточную точность, отсутствие систематических погрешностей и несмещенность оценок, получаемых с помощью предложенной схемы.

Таким образом, выявленные закономерности могут быть использованы как для сглаживания опытных данных, так и для прогностических целей исследования системы «экструдирование – охлаждение экструдата», а также для модельного представления резульатного показателя продолжительности и энергоемкости процесса охлаждения экструдата. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы для

оптимизации производственных процессов, повышения их эффективности и снижения затрат на энергоресурсы и разработки практических рекомендаций по оптимизации процесса охлаждения экструдата.

Схема определения обобщенного показателя процесса охлаждения экструдата ( $y$ , ед.) в зависимости от веса экструдата ( $x_1$ , кг), скорости вращения вала ( $x_2$ , об/мин), угла наклона лопастей ( $x_3$ , град.), температуры охлаждающего агента (воздуха) ( $x_4$ , °C), скорости подачи охлаждающего агента ( $x_5$ , м/с), градиента (разности) температур экструдата ( $x_6$ , °C) представляется сверткой показателей продолжительности ( $y_1$ , ч) и энергоемкости ( $y_2$ , кВт ч/кг) исследуемого процесса, взятых с весовыми коэффициентами соответственно ( $a_1$ , ч<sup>-1</sup>) и ( $a_2$ , кг/кВт ч):

$$y = a_1 y_1 + a_2 y_2,$$

$$y = f(a_1, a_2, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = a_1 f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) + a_2 f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6),$$

где  $y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ ,  $y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  – выявленные ранее закономерности продолжительности и энергоёмкости процесса.

В частности, при  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 0$  из обобщенного показателя получаем продолжительность процесса

$$y_1 = f(1, 0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6),$$

а при  $a_1 = 0$ ,  $a_2 = 1$  получаем энергоёмкость этого же процесса

$$y_2 = f(0, 1, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6).$$

Очевидно, при любом  $a_1 \neq 0$

$$f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = (1/a_1) f(a_1, 0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$$

и аналогично при любом  $a_2 \neq 0$  имеем

$$f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = (1/a_2) f(0, a_2, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6).$$

С учетом известных (полученных выше) коэффициентов функций продолжительности и энергоёмкости запишем числовую оценку обобщенного показателя процесса охлаждения экструдата:

$$f(a_1, a_2, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = a_1 (-3,983450397 + 1,554552288 x_1 - 0,016721343 x_2 - 0,175709377 x_3 - 0,117734973 x_4 + 0,114801852 x_5 + 0,103766035 x_6 - 0,033210459 x_1 x_4 - 0,036761966 x_1 x_5 - 0,036993336 x_1 x_6 + 0,007927395 x_2 x_4 + 0,000568238 x_3 x_4 + 0,004812296 x_3 x_6 - 0,020773662 x_4 x_5 + 0,007416259 x_4 x_6) + a_2 (0,04357766717 - 0,007824658077 x_1 + 0,00001394191777 x_2 + 0,0002952191697 x_3 + 0,0001678896017 x_4 - 0,00364743629 x_5 - 0,0006013147131 x_6 + 0,0001627643487 x_1 x_4 + 0,000532994597 x_1 x_5 + 0,0001419859305 x_1 x_6 - 0,00001772883349 x_2 x_4 - 8,179705779 \cdot 10^{-6} x_3 x_6 + 0,0001527390323 x_4 x_5 - 0,00003945983094 x_4 x_6).$$

Для исследования конкретного процесса выберем такие значения весовых коэффициентов

$$a_1 = 0,03055916775, a_2 = 0,9694408322,$$

что выполняются соотношения

$$a_1 + a_2 = 1, a_1 \geq 0, a_2 \geq 0, M(a_1 f_1) = M(a_2 f_2).$$

Здесь

$$\begin{aligned} a_1 &= \mu_2 / (\mu_1 + \mu_2), a_2 = \mu_1 / (\mu_1 + \mu_2), \\ M(a_1 f_1) &= a_1 M f_1 = \mu_2 / (\mu_1 + \mu_2) \mu_1 = \mu_1 \mu_2 / (\mu_1 + \mu_2) \\ M(a_2 f_2) &= a_2 M f_2 = \mu_1 / (\mu_1 + \mu_2) \mu_2 = \mu_1 \mu_2 / (\mu_1 + \mu_2) \\ \text{и } M(a_2 f_2) &= a_2 M f_2 = \mu_1 / (\mu_1 + \mu_2) \mu_2 = \mu_1 \mu_2 / (\mu_1 + \mu_2) - \end{aligned}$$

математические ожидания частных процессов соответственно  $a_1 f_1$  и  $a_2 f_2$ .

Отсюда непосредственно получаем, что обобщенный показатель ( $y$ , *ед.*) конкретного процесса охлаждения представляется в числовом виде следующей функцией (рис. 6):

$$f(0,03055916775, 0,9694408322, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = 0,03992028111 x_1 - 0,0004974744613 x_2 - 0,005083334809 x_3 - 0,003435123755 x_4 - 0,000027724619 x_5 + 0,002588064634 x_6 - 0,0008570935823 x_1 x_4 - 0,0006067083603 x_1 x_5 - 0,0009928386014 x_1 x_6 + 0,0002250675385 x_2 x_4 + 0,00001736488036 x_3 x_4 + 0,0001391300199 x_3 x_6 - 0,0004867543672 x_4 x_5 + 0,0001883807316 x_4 x_6 - 0,07948495897.$$

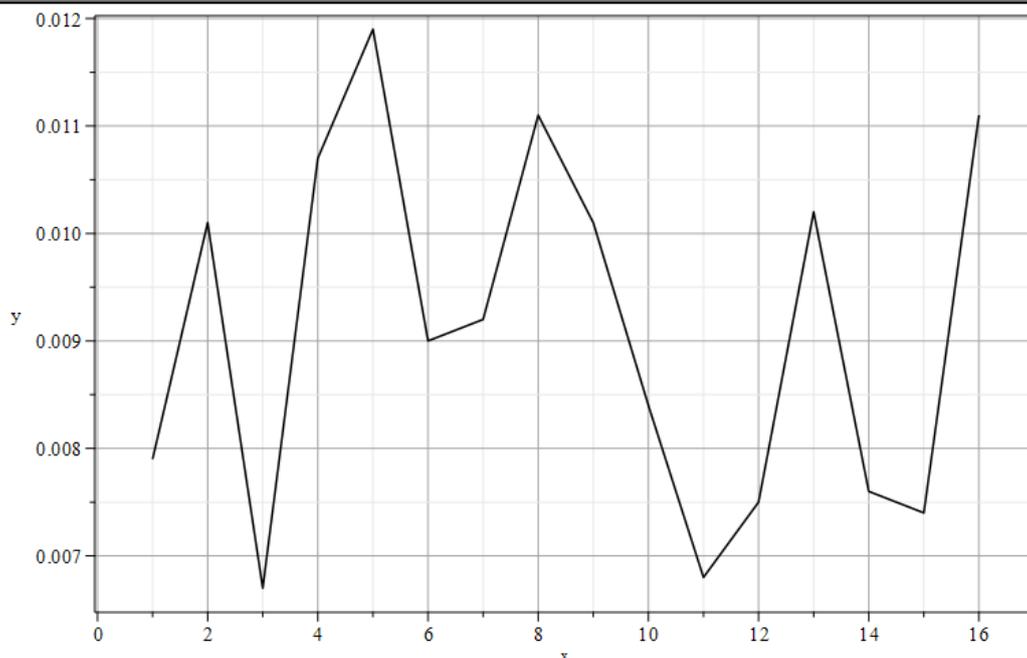


Рис. 6. Изменение обобщенного показателя охлаждения экструдата (y, ед.) по вариантам опытов при изменении группы факторных показателей  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$

Change in the generalized cooling indicator of the extrudate (y, units) according to the experimental variants with a change in the group of factor indicators  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$

По различным комбинациям факторных показателей обобщенный показатель принимает значения в диапазоне 0,0067–0,0119 ед., имеет среднее значение 0,0091 ед.

В случае полного заполнения цилиндра масса экструдата максимально возможная и равна 9 кг. При  $x_1 = 9$  кг обобщенная функция принимает следующий вид:

$$f(0,03055916775, 0,9694408322, 9, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = 0,2797975708 - 0,0004974744613 x_2 - 0,005083334809 x_3 - 0,01114896599 x_4 - 0,005488099860 x_5 - 0,006347482783 x_6 + 0,0002250675385 x_2 x_4 + 0,00001736488036 x_3 x_4 + 0,0001391300199 x_3 x_6 - 0,0004867543672 x_4 x_5 + 0,0001883807316 x_4 x_6.$$

Для удобства введем для функции обобщенного показателя в указанном случае новое обозначение G и получим функцию пяти действительных переменных:

$$G(x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = 0,2797975708 - 0,0004974744613 x_2 - 0,005083334809 x_3 - 0,01114896599 x_4 - 0,005488099860 x_5 - 0,006347482783 x_6 + 0,0002250675385 x_2 x_4 + 0,00001736488036 x_3 x_4 + 0,0001391300199 x_3 x_6 - 0,0004867543672 x_4 x_5 + 0,0001883807316 x_4 x_6.$$

Разбив области изменения факторных показателей процесса равномерно на 9 интервалов с постоянным шагом, получим 10 уровней каждого показателя. Так, для факторного показателя скорости вращения вала ( $x_2$ , об/мин) определены уровни данного фактора

10,; 11,77777778; 13,55555556; 15,33333333; 17,11111111;  
18,88888889; 20,66666667; 22,44444445; 24,22222222;  
26,00000000 с шагом 1,77777778 об/мин.

Для факторного показателя угла наклона лопастей ( $x_3$ , град.) определены уровни

0,; 3,33333333; 6,66666667; 9,99999999; 13,33333333;

16,66666666; 20,00000000; 23,33333333; 26,66666666;  
30,00000000 с шагом 3,33333333 град.

Для факторного показателя температуры охлаждающего агента (воздуха) ( $x_4$ , °C) определены уровни данного фактора

-2,5; -1,833333333; -1,166666667; -0,500000000; 0,166666667;  
0,833333334; 1,500000000; 2,166666667; 2,833333334;  
3,500000000 с шагом 0,666666667 °C.

Для факторного показателя скорости подачи охлаждающего агента ( $x_5$ , м/с) определены уровни данного фактора

2,5; 2,722222222; 2,944444444; 3,166666667; 3,388888889;  
3,611111111; 3,833333333; 4,055555555; 4,277777778;  
4,500000000 с шагом 0,222222222 м/с.

Для факторного показателя градиента (разности) температур экструдата ( $x_6$ , °C) определены уровни данного фактора

32,3; 34,52222222; 36,74444444; 38,96666667; 41,18888889;  
43,41111111; 45,63333333; 47,85555555;  
50,07777778; 52,30000000 с шагом 2,22222222 °C.

При указанном разбиении получаем  $10^5$  различных комбинаций уровней 5 факторов  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_5$ ,  $x_6$ , т. е.  $10^5$  точек в некоторой области 5-мерного пространства. Вычислив и сравнив значения функций  $G(x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ ,  $f_1(9, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ ,  $f_2(9, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ , в этих точках найдем  $G^* = \min G$ ,  $\operatorname{argmin} G^*$  и соответствующие

им значения  $f_1^*$  и  $f_2^*$  (полная расчетная таблица содержит  $10^5$  строк).

По физическому смыслу технологического процесса его продолжительность  $f_1(9, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  и энергоёмкость  $f_2(9, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  ограничены техническими возможностями охладителя и не могут быть уменьшены до нуля

$$f_1 > 0,0725 \text{ ч}, f_2 > 0,0039 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)/кг}.$$

Кроме того, учтем, что отыскиваемая точка минимума лежит в исследуемой подобласти, заданной неравенством

$$0 < G(x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) < h$$

при некотором значении  $h > 0$ . Методом вычислительного эксперимента установлено, что при  $h = 0,0065$  в таблице из  $10^5$  строк останется лишь 31 строка.

В расчетах последовательно задавали значения  $h$ , например

0,0095; 0,0085; 0,0075; 0,0065 с шагом 0,0010.

Следовательно, методом вычислительного эксперимента задача выбора оптимальных параметров процесса охлаждения экструдата сведена к задаче минимизации функции обобщенного показателя  $G(x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  в области

$$\Omega = \{(x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \mid G(x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) < 0,0065 \text{ ед.}, \\ f_1(9, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) > 0,0725 \text{ ч.}, f_2(9, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) > 0,0039 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг},$$

содержащей лишь 31 узел.

Таким образом, функция обобщенного показателя  $G(x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  достигает оптимума

$$G^* = \min G(x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = 0,0060 \text{ ед.}$$

при выборе скорости вращения вала  $x_2^* = 17,1111$  об/мин, угла наклона лопастей  $x_3^* = 9,9999$  град., температуры охлаждающего воздуха  $x_4^* = -1,1666$  °С, скорости потока охлаждающего воздуха  $x_5^* = 4,2777$  м/с, градиента (разности температур) экструдата  $x_6 = 38,9666$  °С,

$$G^* = G(17,1111; 9,9999; -1,1666; 4,2777; 38,9666) = 0,0060.$$

Указанному минимуму функции обобщенного показателя соответствуют оптимальные значения показателей продолжительности  $f_1^* = 0,0728$  ч и энергоёмкости  $f_2^* = 0,0039$  кВтч/кг процесса охлаждения экструдата при установленном его весе  $x_1 = 9$  кг:

$$f_1^* = f_1(9; 17,1111; 9,9999; -1,1666; 4,2777; 38,9666) = 0,0728,$$

$$f_2^* = f_2(9; 17,1111; 9,9999; -1,1666; 4,2777; 38,9666) = 0,0039.$$

**Заключение.** На основе предложенных модификаций звена охлаждения экструдата, научной гипотезы и плана исследования технологии разработана новая конструкция охладителя полуфабриката, позволившая регулировать режимы работы оборудования.

Разработаны расчетные схемы, выявлены закономерности изменения продолжительности, энергоёмкости и обобщенного показателя процесса охлаждения полуфабриката, которые использованы в качестве целевой функции (критерия) оптимизации.

Установлено, что оптимальные конструктивно-режимные характеристики работы охладителя

экструдата формируются посредством выбора загружаемого веса в охладитель 9 кг, скорости вращения вала 17,111 об/мин, угла наклона лопастей 9,9999 град., температуры хладоагента – 1,1666 °С, скорости потока хладоагента 4,2777 м/с, градиента температур экструдата 38,9666 °С. В области эффективности процесса охлаждения полуфабриката величины продолжительности и энергоёмкости оцениваются соответственно значениями 0,0728 ч и 0,0039 (кВт · ч)/кг.

Реализованный подход может быть использован для разработки нового оборудования, включаемого в технологическую линию.

#### Список источников

1. Жакова К.И., Миронова Н.П. Современные тенденции развития технологий пищевых производств // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2022. Т. 15, № 3 (57). С. 6–12. EDN: JDCVYT.
2. Глаголева Л.Э., Иванова О.В. Коррекция углеводного состава продуктов специализированного назначения // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2017. Т. 79, № 1 (71). С. 138–144. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-1-138-144. EDN: YTNUIP.
3. Лисицын А.Б., Чернуха И.М., Лунина О.И. Современные тенденции развития индустрии функциональных пищевых продуктов в России и за рубежом // Теория и практика переработки мяса. 2018. Т. 3, № 1. С. 29–45. DOI: 10.21323/2414-438X-2018-3-1-29-45. EDN: YUDWYR.
4. Пивченко А.Р. Потенциал растительного сырья для производства функциональных ингредиентов. В сб.: Пищевые здоровьесберегающие технологии: сборник тезисов II Международного симпозиума, посвященного 50-летию КемГУ (Кемерово, 2–3 ноября 2023 г.). Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2023. С. 100–102. EDN: ADNPGJ.
5. Руденко Р.А., Насирова А.Ю. Новые тенденции в пищевой промышленности // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 6 (132). DOI: 10.23670/IRJ.2023.132.7 EDN: RHPFUE.
6. Аношина Ю.Ф., Макеева В.А. Современное состояние хлебопекарной промышленности России и тенденции ее развития. В сб.: Перспективные направления научных исследований: сборник ста-

- тей по материалам IV ежегодной научно-практич. конференции (Москва, 27 февраля 2018 г.). М.: Научный консультант, 2018. EDN: YVWVJJ.
7. Матюшев В.В., Миржигот А.С., Семенов А.В., и др. Совершенствование технологии производства текстурированной муки // Вестник КрасГАУ. 2023. № 5 (194). С. 240–245. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-5-240-245. EDN: JBFUVB.
  8. Аксенова О.И., Алексеев Г.В., Сырокоренский И.С. Исследование процесса получения экструдированных снеков на основе картофеля // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер.: Процессы и аппараты пищевых производств. 2019. № 4. С. 55–66. EDN: KDFGLV.
  9. Курочкин А.А., Шабурова Г.В., Фролов Д.И. Моделирование процесса получения экструдатов на основе нового технологического решения // Нива Поволжья. 2014. № 1 (30). С. 70–76. EDN: SEPOP.
  10. Матюшев В.В., Чаплыгина И.А., Шпирук Ю.Д., и др. Использование экструдата из смеси зерна пшеницы и картофеля в хлебопечении // Достижения науки и техники в АПК. 2017. Т. 31, № 8. С. 80–84. EDN: ZHRFZP.
  11. Чаплыгина И.А., Матюшев В.В., Семенов А.В., и др. Результаты исследований и перспективы повышения качества экструдатов. В сб.: Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий: сборник III Всероссийской (национальной) научной конференции (Новосибирск, 20 декабря 2018 г.). Новосибирск: Новосибирский государственный аграрный университет, 2018. С. 521–523. EDN: VBTNDK.
  12. Ваншин В.В., Туктамышева А.Р., Новикова Л.В., и др. Экструдирование поликомпонентной смеси крахмалосодержащего сырья и мезги плодоовощных культур // Вестник ОГУ. 2014. № 1 (162). С. 156–160. EDN: RWUDVV.
  13. Жиркова Е.В., Малкина В.Д. Перспективы применения отечественных экструзионных ингредиентов в хлебопекарном производстве // Хлебопродукты. 2016. № 2. С. 54–59.
  14. Курочкин А.А., Шматкова Н.Н. Алгоритм разработки модели экструдата смеси семян расторопши и зерна пшеницы // Инновационная техника и технология. 2023. Т. 10, № 3. С. 10–15. EDN: SVTAPQ.
  15. Курочкин А.А., Шабурова Г.В., Фролов Д.И., и др. Экструдаты из растительного сырья с повышенным содержанием липидов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 4. С. 70–74. EDN: SQJBGJ.
  16. Фролов Д.И. Современные тенденции и перспективы использования экструдатов в функциональных пищевых продуктах // Инновационная техника и технология. 2018. № 3 (16). С. 10–15. EDN: YNQJSX.
  17. Шабурова Г.В., Шешницан И.Н. Экструзионная обработка растительного сырья как способ повышения пищевой ценности продуктов питания // Инновационная техника и технология. 2019. № 2 (19). С. 14–20. EDN: ZEKSVN.
  18. Курочкин А.А., Шабурова Г.В., Фролов Д.И. Получение экструдатов крахмалосодержащего зернового сырья с заданной пористостью // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2014. № 6 (22). С. 109–114. EDN: RLYCKK.
  19. Остриков А.Н., Магомедов Г.О., Дерканосова Н.М., и др. Технология экструзионных продуктов: учебное пособие. СПб.: Проспект Науки, 2018. 202 с. EDN: HQVVHN.
  20. Бахчевников О.Н., Брагинец С.В. Экструдирование растительного сырья для продуктов питания (обзор) // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50, № 4. С. 690–706. DOI: 10.21603/2074-9414-2020-4-690-706. EDN: CDJMBD.
  21. Матюшев В.В., Миржигот А.С., Семенов А.В., и др. Совершенствование технологии производства текстурированной муки // Вестник КрасГАУ. 2023. № 5 (194). С. 240–245. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-5-240-245. EDN: JBFUVB.
  22. Курочкин А.А., Шабурова Г.В., Фролов Д.И., и др. Моделирование процесса получения экструдатов на основе нового технологического решения // Нива Поволжья. 2014. № 1 (30). С. 70–76. EDN: SEPOP.
  23. Алесенко Д.А. Анализ теоретических исследований охлаждения прессованных продуктов. В сб.: Инновационные тенденции развития Российской науки: материалы XVII международной

- научно-практической конференции молодых ученых (Красноярск, 4–6 марта 2024 г.). Красноярск: Красноярский ГАУ, 2024. С. 397–400. EDN: WADEJR.
24. Матюшев В.В., Чаплыгина И.А., Алесенко Д.А. Совершенствование конструкции охладителя экструдатов. В сб.: Научно-практические аспекты развития АПК: материалы национальной научной конференции (Красноярск, 18 ноября 2022 г.). Красноярск: Красноярский ГАУ, 2023. С. 214–216. EDN: PWRAAI.
  25. Алексеев С.В., Михайлюк Е.Н., Фомина С.В., и др. Эксплуатационные показатели линии охлаждения и пневмотранспорта полножирной экструдированной сои // Вестник Курганской ГСХА. 2020. № 2 (34). С. 48–52. EDN: FHZDDK.
  26. Фролов Д.И., Курочкин А.А. К вопросу совершенствования экструзионных технологий // Инновационная техника и технология. 2015. № 2 (3). С. 18–23. EDN: UGQNNL.
  27. Коваленок В.А., Лукин Н.Д., Карпов В.Г. Изменение температуры и массовой доли влаги у экструдатов крахмала и крахмалсодержащего сырья // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31, № 11. С. 94–96. EDN: YMEMSD.
  28. Курочкин А.А., Воронина П.К., Зимняков В.М., и др. Научное обеспечение актуального направления в развитии пищевой термопластической экструзии. Пенза: Копи-Ризо, 2015. 181 с. EDN: UJRWJR.
  29. Фоминых А.В., Овчинников Д.Н., Фомина С.В. Линия производства полножирной экструдированной сои с рекуперацией тепловой энергии // Вестник Курганской ГСХА. 2014. № 3 (11). С. 83–85. EDN: TEJBSX.
  30. Корпорации Waterloo Maple: официальный сайт. URL: <https://maplesoft.com> (дата обращения: 10.12.2024).
  31. Мицель А.А. Прикладная математическая статистика: учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2016. 113 с.
  32. Алексеев Г.В., Вороненко Б.А., Гончаров М.В., и др. Численные методы при моделировании технологических машин и оборудования: учебное пособие. СПб.: ГИОРД, 2014. 200 с.
  33. Энатская Н.Ю., Хакимуллин Е.Р. Теория вероятностей и математическая статистика для инженерно-технических направлений: Учебник и практикум. М.: Юрайт, 2024. 393 с.
  34. Матюшев В.В., Семенов А.В., Чаплыгина И.А., и др. Охладитель сыпучих материалов. Патент РФ на полезную модель № 212621 U1. 01.08.2022.
  35. Бледных В.В., Фоминых А.В., Савельев А.В. Методика расчета конструктивных и технологических параметров шахтного охладителя полножирной экструдированной сои // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 11. С. 66–68. EDN: OJMTXH.

## References

1. Zhakova KI, Mironova NP. Modern trends in the development of food production technologies. *Food industry: science and technologies*. 2022;15(3):6-12. (In Russ.). DOI: 10.47612/2073-4794-2022-15-3(57)-6-12. EDN: JDCVYT.
2. Glagoleva LE, Ivanova OV. Correction of the carbohydrate composition of specific foods. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2017;79(1):138-144. (In Russ.). DOI: 10.20914/2310-1202-2017-1-138-144. EDN: YTNIUP.
3. Lisitsyn AB, Chernukha IM, Lunina OI. Modern trends in the development of the functional food industry in russia and abroad. *Theory and practice of meat processing*. 2018;3(1):29-45. (In Russ.). DOI: 10.21323/2414-438X-2018-3-1-29-45. EDN: YUDWYR.
4. Pivchenko AR. Potential plant raw materials for the production of functional ingredients. In: *Pishchevye zdorov'esberegayushchie tekhnologii: sbornik tezisov II Mezhdunarodnogo Simpoziuma, posvyashchennogo 50-letiyu KemGU, Kemerovo, 2–3 Nov 2023*. Kemerovo: Kemerovskij gosudarstvennyj universitet, 2023. P. 100–102. (In Russ.). EDN: ADNPGJ.
5. Rudenko RA, Nasirova AY. New tendencies in the food industry. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2023;(6). (In Russ.). DOI: 10.23670/IRJ.2023.132.7. EDN: PHPFUE.
6. Anoshina YuF, Makeeva VA. Modern condition of the bakery industry of russia and trends in its development. *Perspektivnye napravleniya nauchnyh issledovanij: sbornik statej po materialam IV*

- ezhegodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Moscow, 27 Feb 2018. Moscow: Nauchnyj konsultant, 2018. (In Russ.). EDN: YVWVJJ.*
7. Matyushev VV, Mirzhigot AS, Semenov AV. Improvement of textured flour production technology. *Bulletin of KSAU*. 2023;(5):240-245. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-5-240-245. EDN: JBFUVB.
  8. Aksenova OI, Alekseev GV, Sirokorensky IS. Obtaining potato based extruded snacks. *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya: Processy i apparaty pishchevyh proizvodstv*. 2019;(4):55-66. (In Russ.). DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-4-55-66. EDN: KDFGLV.
  9. Kurochkin AA, Shaburova GV, Frolov DI. Modeling the process of getting extrudates on the basis of new technological solutions. *Niva Povolzh'ya*. 2014;(1):70-76. (In Russ.). EDN: SEPOPN.
  10. Matyushev VV, Chaplygina IA, Shpyruk YuD, et al. Usage of extrudate from a mixture of wheat grain and potato in bread baking. *Dostizheniya nauki i tekhniki v APK*. 2017;31(8):80-84. (In Russ.). EDN: ZHRFZP.
  11. Chaplygina IA, Matyushev VV, Semenov AV, et al. Rezul'taty issledovaniy i perspektivy povysheniya kachestva ekstrudatov. *Rol' agrarnoy nauki v ustojchivom razvitii sel'skih territorij: sbornik III Vserossijskoj (nacional'noj) nauchnoj konferencii, Novosibirsk, 20 Dec 2018*. Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2018. P. 521-523. (In Russ.). EDN: VBTHDK.
  12. Vanshin VV, Tuktamisheva AR, Novikova LV, et al. Multicomponent mixture extruding of starch-containing raw material and fruit and vegetable crops pulp. *Vestnik OGU*. 2014;(1):156-160. (In Russ.). EDN: RWUDVV.
  13. Zhirkova EV, Malkina VD. Perspektivy primeneniya otechestvennyh ekstruzionnyh ingredientov v hlebopekarnom proizvodstve. *Hleboprodukty*. 2016;(2):54-59. (In Russ.).
  14. Kurochkin AA, Shmatkova NN. Algorithm for developing an extrudate model of a mixture of milk thistle seeds and wheat grain. *Innovative machinery & technology*. 2023;10(3):10-15. (In Russ.). EDN: CBTAPQ.
  15. Kurochkin AA, Shaburova GV, Frolov DI. Extrudates from vegetable raw materials with a high content of lipids. *Bulletin Samara state agricultural academy*. 2014;(4):70-74. (In Russ.). EDN: SQJBGJ.
  16. Frolov DI. Current trends and prospects for the use of extrudates in functional foods. *Innovative machinery & technology*. 2018;(3):10-15. (In Russ.). EDN: YNQJSX.
  17. Shaburova GV, Sheshnitsan IN. Extrusion treatment of plant raw materials as a method of increasing the food value of food products. *Innovative machinery & technology*. 2019;(2):14-20. (In Russ.). EDN: ZEKSVN.
  18. Kurochkin AA, Shaburova GV, Frolov DI. The resulting extrudate starch grain material with predetermined porosity. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*. 2014;(6):109-114. (In Russ.). EDN: RLYCKK.
  19. Ostrikov AN, Magomedov GO, Derkanosova NM, et al. *Tekhnologiya ekstruzionnyh produktov: uchebnoe posobie*. Saint-Petersburg: Prospekt Nauki, 2018. 202 p. (In Russ.). EDN: HQVVHH.
  20. Bakhchevnikov ON, Braginets SV. Extrusion of Plant Raw Materials in Food Production: A Review. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(4):690-706. (In Russ.). DOI: 10.21603/2074-9414-2020-4-690-706. EDN: CDJMBD.
  21. Matyushev VV, Mirzhigot AS, Semenov AV. Improvement of textured flour production technology. *Bulletin of KSAU*. 2023;(5):240-245. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-5-240-245. (In Russ.). EDN: JBFUVB.
  22. Kurochkin AA, Shaburova GV, Frolov DI. Modeling the process of getting extrudates on the basis of new technological solutions. *Niva Povolzh'ya*. 2014;(1):70-76. (In Russ.). EDN: SEPOPN.
  23. Alesenko DA. Analysis of theoretical studies of cooling pressed products. In: *Innovacionnye tendencii razvitiya Rossijskoj nauki: materialy XVII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh, Krasnoyarsk, 4–6 Mar 2024*. Krasnoyarsk: Krasnoyarskij GAU, 2024. P. 397–400. (In Russ.). EDN: WADEJR.
  24. Matyushev VV, Chaplygina IA, Alesenko DA. Improving the design of the extrudate cooler. In: *Nauchno-prakticheskie aspekty razvitiya APK: materialy nacional'noj nauchnoj konferencii, Krasnoyarsk, 18 Nov 2022*. Krasnoyarsk: Krasnoyarskij GAU, 2023. P. 214–216. (In Russ.). EDN: PWRAAI.
  25. Alekseev SV, Mikhailyuk EN, Fomina SV. Cooling line operating indicators and full-fat pneumatic transport extruded soybean. *Vestnik Kurganskoj GSHA*. 2020;(2):48-52. (In Russ.). EDN: FHZDDK.

26. Frolov DI, Kurochkin AA. To the question of improvement of extrusion technologies. *Innovative machinery & technology*. 2015;(2):18-23. (In Russ.). EDN: UGQNNL.
27. Kovalenok VA, Lukin ND, Karpov VG. Change of temperature and weight fraction of moisture in extrudates of starch and starch-containing raw materials. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2017;31(11):94-96. (In Russ.). EDN: YMEMSD.
28. Kurochkin AA, Voronina PK, Zimnyakov VM, et al. *Nauchnoe obespechenie aktual'nogo napravleniya v razviti pishchevoj termoplasticheskoy ekstruzii*. Penza: Kopi-Rizo, 2015. 181 p. (In Russ.). EDN: UJRWJR.
29. Fominykh AV, Ovchinnikov DN, Fomina SV. Production line of full-fat extruded soya with recovery of the heat energy. *Vestnik Kurganskoj GSHA*. 2014;(3):83-85. (In Russ.). EDN: TEJBSX.
30. Korporacii Waterloo Maple: oficial'nyj sajt. Available at: <https://maplesoft.com>. data Accessed: 10.12.2024.
31. Micel' AA. *Prikladnaya matematicheskaya statistika: uchebnoe posobie*. Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet sistem upravleniya i radioelektroniki, 2016. 113 p. (In Russ.).
32. Alekseev GV, Voronenko BA, Goncharov MV, et al. *Chislennyye metody pri modelirovanii technologicheskikh mashin i oborudovaniya: uchebnoe posobie*. Saint Petersburg: GIOR, 2014. 200 p. (In Russ.).
33. Enatskaya NYu, Hakimullin ER. *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika dlya inzhenerno-tekhnicheskikh napravlenij: uchebnyk i praktikum*. Moscow: Yurajt, 2024. 393 p.
34. Matyushev VV, Semenov AV, Chaplygina IA, et al. *Ohladitel' sypuchih materialov*. Patent RF na poleznuyu model' № 212621 U1. 01.08.2022.
35. Blednykh VV, Fominykh AV, Savel'ev AV. Design procedure of constructive and technological parameters of mine cooler full-fat extruded soy. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2011;(11):66-68. (In Russ.). EDN: OJMTXH.

Статья принята к публикации 13.11.2024 / The article accepted for publication 13.11.2024.

Информация об авторах:

**Денис Александрович Алесенко**<sup>1</sup>, аспирант кафедры товароведения и управления качеством продукции АПК

**Василий Викторович Матюшев**<sup>2</sup>, профессор кафедры товароведения и управления качеством продукции АПК, доктор технических наук, профессор

**Ирина Александровна Чаплыгина**<sup>3</sup>, доцент кафедры товароведения и управления качеством продукции АПК, кандидат биологических наук, доцент

**Алексей Андреевич Беляков**<sup>4</sup>, доцент кафедры агроинженерии, кандидат технических наук, доцент

Information about the authors:

**Denis Aleksandrovich Alesenko**<sup>1</sup>, Postgraduate student at the Department of Commodity Science and Quality Management of Agricultural Products

**Vasily Viktorovich Matyushev**<sup>2</sup>, Professor at the Department of Commodity Science and Quality Management of Agricultural Products, Doctor of Technical Sciences, Professor

**Irina Aleksandrovna Chaplygina**<sup>3</sup>, Associate Professor at the Department of Commodity Science and Quality Management of Agricultural Products, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor

**Alexey Andreevich Belyakov**<sup>4</sup>, Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor