Научная статья
УДК 664:532.5:536.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСТРУЗИОННОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ

А.А. Курочкин[1], Д.И. Фролов[1,*], Р.Р. Аширов[1]

[1] Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
* E-mail: surr@bk.ru

Аннотация. Рассмотрена задача численного моделирования сопряжённых тепловых и гидродинамических процессов в одношнековом экструдере с винтовым насосом, предназначенном для переработки пищевого сырья. На основе конструктивной схемы энергосберегающего экструдера разработана мультифизическая модель в среде COMSOL Multiphysics, объединяющая задачу сопряжённого теплопереноса в системе «стенка трубы – экструдируемый материал» и задачу вязкого течения материала в канале под действием давления нагнетания винтового насоса через фильеру в вакуумную камеру. Нагрев в рабочей зоне задан в упрощённой инженерной постановке в виде эквивалентного температурного воздействия на стенку канала. Экструдируемый материал описан как неньютоновская жидкость, подчиняющаяся степенному закону течения с температурно-зависимой вязкостью, а влияние перемешивающего действия шнека учтено посредством эффективной теплопроводности. Получены распределения температуры, скорости и давления по длине рабочего канала и в поперечных сечениях при различных режимных параметрах. Проведена оценка влияния температуры стенки канала и объёмной подачи винтового насоса на термическое и гидродинамическое состояние материала перед фильерой матрицы. Показано, что разработанная модель позволяет определять условия, при которых обеспечиваются требуемый прогрев сырья до температуры 120–170 °C и необходимый перепад давления для формирования декомпрессионного вспучивания экструдата при выходе в вакуумную камеру.

Ключевые слова: *экструдер; винтовой насос; температура стенки; численное моделирование; теплоперенос; гидродинамика; неньютоновская жидкость; вспучивание экструдата.*

Для цитирования: Курочкин А.А., Фролов Д.И., Аширов Р.Р. Моделирование тепловых и гидродинамических процессов при экструзионной переработке пищевого сырья // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2026. Т. 12, № 2. С. 32–47.

Original article

MODELING OF THERMAL AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN EXTRUSION PROCESSING OF FOOD RAW MATERIALS

A.A. Kurochkin[1], D.I. Frolov[1,*], R.R. Ashirov[1]

[1] Penza State Technological University, Penza, Russia
* E-mail: surr@bk.ru

Abstract. This paper examines the numerical simulation of conjugate thermal and hydrodynamic processes in a single-screw extruder with a screw pump designed for processing food

© Курочкин А.А., Фролов Д.И., Аширов Р.Р. 2026

raw materials. Based on the design of an energy-efficient extruder, a multiphysics model has been developed in COMSOL Multiphysics. This model combines the problem of conjugate heat transfer in the "pipe wall – extruded material" system and the problem of viscous material flow in a channel under the action of the screw pump discharge pressure through a die into a vacuum chamber. Heating in the working zone is specified in a simplified engineering formulation as an equivalent temperature effect on the channel wall. The extruded material is described as a non-Newtonian fluid obeying a power-law flow with temperature-dependent viscosity, and the effect of the mixing action of the screw is taken into account through effective thermal conductivity. Temperature, velocity, and pressure distributions along the working channel and in cross sections are obtained for various operating conditions. The influence of channel wall temperature and the volumetric flow rate of a screw pump on the thermal and hydrodynamic state of the material in front of the die was assessed. It was shown that the developed model allows one to determine the conditions that ensure the required heating of the raw material to a temperature of 120–170°C and the necessary pressure drop to cause decompression swelling of the extrudate upon exiting the vacuum chamber.

Keywords: *extruder; screw pump; wall temperature; numerical simulation; heat transfer; hydrodynamics; non-Newtonian fluid; extrudate swelling.*

For citation: Kurochkin A.A., Frolov D.I., Ashirov R.R. Modeling of thermal and hydrodynamic processes during extrusion processing of food raw materials dynamics; non-Newtonian fluid; swelling of the extrudate. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2026. Vol. 12, No. 2, pp. 32–47.

Введение

Экструзионная переработка пищевого сырья представляет собой непрерывный процесс, в котором совмещаются транспортирование, сжатие, нагрев, пластикация и формование материала [1, 2]. Эффективность экструзии и качество готового продукта определяются условиями течения перерабатываемой среды в рабочем канале, температурным режимом обработки и уровнем давления перед фильерой [3]. Для многокомпонентных пищевых систем, обладающих сложными реологическими свойствами, управление указанными параметрами приобретает ключевое значение, поскольку именно они определяют структуру экструдата и устойчивость технологического процесса [4, 5].

В традиционных одношнековых экструдерах функции нагнетания и транспортирования сырья возлагаются на шнековый рабочий орган. Однако такая схема сопряжена с рядом ограничений: нестабильностью давления нагнетания при изменении вязкости материала, зависимостью подачи от противодавления фильеры, повышенными энергозатратами на преодоление внутреннего трения [6]. Альтернативным решением является применение в качестве нагнетательного узла экструдера винтового (героторного) насоса, состоящего из металлического ротора и статора с эластичной обкладкой, между винтовыми поверхностями которых формируются замкнутые рабочие камеры [7]. Принцип работы такого насоса обеспечивает более стабильную объёмную подачу высоковязкого сырья, формирование заданного давления нагнетания и более гибкое управление процессом транспортирования.

Не менее важным элементом рабочего процесса является организация подвода тепла к экструдируемому материалу. Повышение температуры в канале приводит к снижению вязкости пищевой массы, изменяет сопротивление течению и определяет состояние материала перед выходом из фильеры. В ранее предложенной конструкции энергосберегающего экструдера в качестве нагревающего устройства использовался индукционный нагреватель, в котором нагрев обрабатываемого сырья осуществлялся за счёт теплообмена с внутренней стенкой стальной трубы, являющейся ферромагнитным элементом нагревательного узла. Такой способ подвода теплоты имеет ряд недостатков: он приводит к неравномерному нагреву сырья по сечению канала, перегреву пристенных слоёв при недостаточном прогреве более глубоких слоёв потока, повышает вероятность

пригорания материала к внутренней поверхности трубы, увеличивает время его пребывания в рабочем объёме и энергозатраты на нагрев.

Устранение указанных недостатков в предлагаемой конструкции связано с заменой индукционного способа нагрева на диэлектрический сверхвысокочастотный (СВЧ) нагрев. В рассматриваемом экструдере нагревающее устройство выполнено в виде толстостенной трубы из радиопрозрачного термостойкого материала и двух магнетронов, оснащённых системой автоматического управления. В отличие от индукционного нагрева, при котором тепловая энергия сначала выделяется в стенке трубы и затем передаётся материалу посредством теплообмена, при СВЧ-нагреве тепло генерируется непосредственно в объёме обрабатываемого сырья под действием электромагнитного поля сверхвысокой частоты за счёт диэлектрических потерь. Такой способ подвода энергии потенциально обеспечивает более высокую скорость нагрева, более равномерный прогрев материала и снижение тепловых потерь на нагрев элементов конструкции и в окружающую среду. Вместе с тем в настоящей работе СВЧ-нагрев не моделируется как самостоятельный электродинамический процесс, а учитывается в упрощённой инженерной постановке через эквивалентное температурное воздействие на стенку рабочего канала.

Рабочий процесс рассматриваемого экструдера состоит в следующем. Обрабатываемое сырьё с помощью питающего шнека загрузочной камеры поступает в рабочую зону винтового насоса, который нагнетает его в зону нагрева. В нагревающем устройстве температура сырья повышается до 120–170 °С, после чего при давлении нагнетания 0,8–0,9 МПа материал выводится через отверстия фильеры матрицы в вакуумную камеру с давлением 0,05–0,07 МПа. Переход из области высокого давления в зону пониженного давления вызывает декомпрессионное вскипание — мгновенный переход жидкости, содержащейся в сырье, в пар, что обеспечивает вспучивание экструдата. Таким образом, температура и давление в предфильерной зоне выступают определяющими параметрами, от которых зависят эффективность формования и качество готового продукта.

Экспериментальное исследование тепловых и гидродинамических процессов непосредственно в рабочем канале экструдера связано со значительными трудностями: ограниченным доступом к внутренней зоне течения, невозможностью прямого измерения распределений температуры и давления по длине канала, взаимосвязанным влиянием конструктивных и режимных параметров. В этих условиях возрастает роль численного моделирования, позволяющего анализировать сопряжённые процессы нагрева и течения в единой расчётной постановке. В ряде работ численные методы успешно применялись для моделирования течения в шнековых каналах экструдеров, теплопереноса в трубных системах с вязкими средами, а также процессов диэлектрического и СВЧ-нагрева материалов [8–10]. Вместе с тем комплексные мультифизические модели экструдеров с винтовым насосом и СВЧ-нагревателем, учитывающие объёмный подвод энергии к неньютоновской среде и её течение под действием давления нагнетания, в доступной литературе представлены недостаточно. В то же время модели, в которых тепловое воздействие на материал задаётся в упрощённой инженерной постановке через эквивалентную температуру стенки канала, также представляют практический интерес для предварительной оценки теплового и гидродинамического состояния среды в рабочей зоне экструдера.

При построении модели СВЧ-нагрева возможны два подхода: полное решение электродинамической задачи с определением распределения электромагнитного поля и связанного с ним объёмного тепловыделения в материале либо задание результирующего энерговклада в виде распределённого объёмного источника тепла в рабочем канале. Второй подход соответствует инженерной постановке задачи и позволяет сосредоточить внимание на тепловых и гидродинамических процессах в канале экструдера без детального моделирования структуры электромагнитного поля. В настоящей работе использован ещё более упрощённый подход, при котором результирующее тепловое воздействие задаётся через эквивалентную температуру стенки канала. Кроме того, при моделировании

теплопереноса в канале экструдера необходимо учитывать перемешивающее действие шнека, которое интенсифицирует теплообмен по сравнению с чисто ламинарным режимом. В настоящей работе этот эффект учтён посредством введения эффективной теплопроводности экструдируемого материала, значение которой превышает молекулярную теплопроводность и отражает конвективное перемешивание, создаваемое шнековым рабочим органом.

Целью работы является разработка и исследование численной мультифизической модели экструдера с винтовым насосом и нагреваемым рабочим каналом в среде COMSOL Multiphysics, обеспечивающей анализ распределений температуры, скорости и давления в канале течения пищевого материала при различных значениях температуры стенки канала и объёмной подачи насоса, а также оценку условий, способствующих вспучиванию экструдата при выходе из фильеры в вакуумную камеру.

Материалы и методы

Объектом численного исследования является рабочий канал энергосберегающего экструдера, конструктивно-технологическая схема которого описана в патенте [8] и представлена на рис. 1. Экструдер включает мотор-редуктор 1, загрузочную камеру 4 с питающим шнеком 5, составной корпус, винтовой насос, нагревающее устройство, фильеру матрицы 13, вакуумную камеру 14, шлюзовой затвор 15, вакуумный насос 3, вакуум-регулятор 10 и вакуумметр 11. Загрузочная камера выполнена в виде цилиндрической двустенной конструкции, межстенное пространство 8 которой соединено трубопроводами с вакуумным насосом и вакуумной камерой, что обеспечивает предварительный подогрев сырья теплом конденсирующегося пара.

В передней части составного корпуса расположен винтовой (героторный) насос, состоящий из металлического ротора 17 и статора 9 с эластичной обкладкой. Между винтовыми поверхностями ротора и статора формируются замкнутые рабочие камеры (капсулы-шлюзы), которые периодически открываются и закрываются, обеспечивая всасывание и нагнетание перекачиваемой среды. Количество замкнутых полостей на единицу длины винтовой пары определяет максимальное давление насоса, а объём каждой полости – его производительность. Данный тип нагнетательного механизма обеспечивает стабильную объёмную подачу высоковязкого пищевого сырья при давлении нагнетания порядка 0,8–0,9 МПа [8].

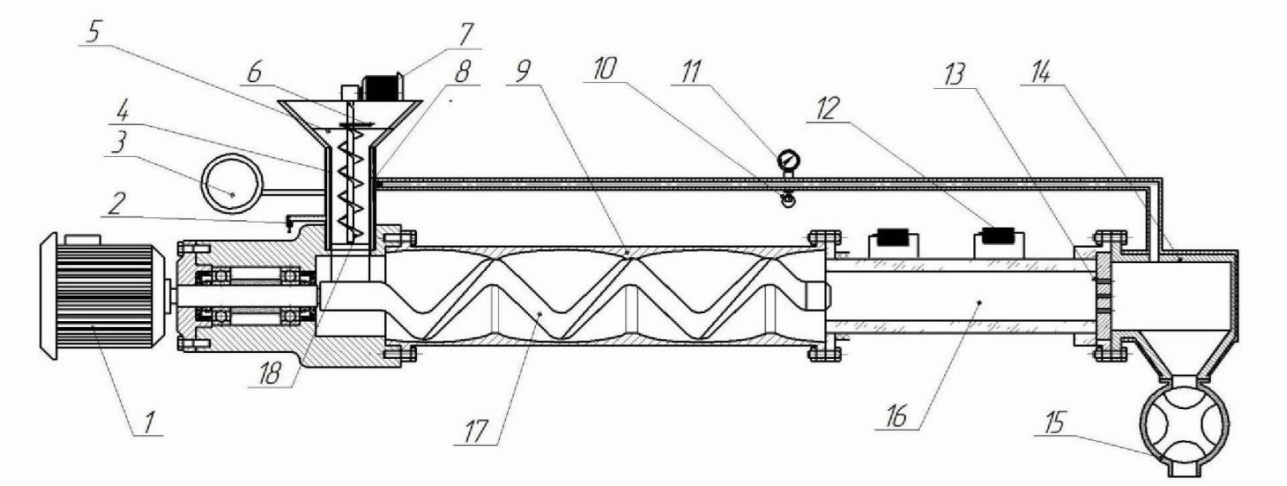


Рисунок 1 – Схема энергоэффективного экструдера

Во второй части составного корпуса расположено нагревающее устройство, выполненное в виде толстостенной трубы из радиопрозрачного термостойкого материала и двух магнетронов. Подвод энергии к рабочей зоне осуществляется СВЧ-излучением,

генерируемым магнетронами. В реальном устройстве нагрев материала связан с диэлектрическим взаимодействием электромагнитного поля с обрабатываемым сырьём, тогда как в расчётной модели этот процесс рассматривается в упрощённой инженерной постановке через эквивалентное температурное воздействие на стенку рабочего канала. Труба выполняет функции рабочего канала и элемента, обеспечивающего прохождение СВЧ-излучения в зону нагрева. Фильера матрицы 13 расположена на выходе из нагревающего устройства и представляет собой пластину с одним или несколькими отверстиями заданного диаметра. Свободный торец трубы упирается в фильеру.

Рабочий процесс экструдера осуществляется следующим образом. Пищевое сырьё с помощью питающего шнека загрузочной камеры поступает в рабочую зону винтового насоса. При контакте с горячими стенками цилиндрической части загрузочной камеры сырьё предварительно подогревается и поступает в винтовой насос при температуре порядка 40–45 °C. В зоне нагрева температура сырья повышается до 120–170 °C, после чего материал при давлении нагнетания выводится через отверстия фильеры в вакуумную камеру, в которой поддерживается давление 0,05–0,07 МПа. Переход из области высокого давления в зону пониженного давления вызывает декомпрессионный взрыв – мгновенный переход жидкости, содержащейся в сырье, в пар, что обеспечивает вспучивание и структурирование экструдата [8].

С точки зрения численного моделирования рабочий процесс в канале экструдера представляет собой сопряжённую задачу, включающую два основных взаимосвязанных физических процесса: теплоперенос в системе «стенка канала – экструдируемый материал» и течение неньютоновской среды под действием перепада давления, создаваемого винтовым насосом. СВЧ-нагрев в настоящей работе не моделируется как самостоятельная электродинамическая задача. Вместо этого его результирующее действие учитывается в упрощённой инженерной постановке в виде эквивалентного температурного воздействия на стенку рабочего канала. Такой подход соответствует задаче анализа тепловых и гидродинамических процессов непосредственно в канале течения и позволяет исключить из рассмотрения детальное моделирование структуры электромагнитного поля.

Для формулировки расчётной задачи введены следующие допущения и упрощения. Геометрия рабочего канала описывается двумерной моделью в декартовой системе координат (x, y), где ось x направлена вдоль оси трубы от входного сечения (выход из винтового насоса) к фильере матрицы, а ось y – в поперечном направлении. Расчётная область представляет собой продольное сечение канала, проходящее через ось трубы, и включает область экструдируемого материала, верхнюю и нижнюю стенки трубы, фильеру матрицы с отверстием и воздушное пространство вокруг трубы. Рассматривается участок канала, соответствующий зоне тепловой обработки, длиной L, ограниченный входным сечением ($x = 0$) и фильерой ($x = L$). Труба характеризуется внутренним радиусом R_1 и наружным радиусом R_2. Фильера моделируется как пластина толщиной L_{die} с центральным отверстием радиуса R_{die}.

Экструдируемый материал рассматривается как несжимаемая вязкая жидкость, подчиняющаяся степенному реологическому закону (модель Оствальда де Виля) с температурно-зависимой консистенцией:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = K(T) \cdot \dot{\gamma}^{n-1}, \quad (1)$$

где η – эффективная динамическая вязкость, Па·с; $\dot{\gamma}$ – интенсивность скорости сдвига, $с^{-1}$; $K(T)$ – коэффициент консистенции, зависящий от температуры, Па·$с^n$; n – индекс течения ($n < 1$ для псевдопластичных сред).

Температурная зависимость коэффициента консистенции описывается экспоненциальной функцией:

$$K(T) = K_0 \cdot e^{(-\beta(T-T_0))}, \quad (2)$$

где K_0 – значение коэффициента консистенции при референсной температуре T_0, Па·с^n; β – температурный коэффициент, К$^{-1}$.

Выбор степенной модели обусловлен тем, что для широкого класса пищевых масс, перерабатываемых методом экструзии, данная модель адекватно описывает поведение материала в диапазоне скоростей сдвига, характерных для рабочего канала экструдера. Для предотвращения сингулярности при малых скоростях сдвига в численной реализации вводится ограничение $\dot{\gamma} \geq 0{,}01$ с$^{-1}$.

Течение материала в канале описывается стационарными уравнениями Навье–Стокса для несжимаемой среды с переменной вязкостью:

$$\rho(v\,\nabla)v = -\nabla p + \nabla\,[\eta(\dot{\gamma}, T)(\nabla v + (\nabla v)^T)] \quad (3)$$

$$\nabla\, v = 0 \quad (4)$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3; v – вектор скорости, м/с; p – давление, Па.

Уравнение энергии для экструдируемого материала, учитывающее конвективный перенос теплоты потоком и кондуктивный теплообмен, записывается в виде:

$$\rho c_p(v\,\nabla T) = \nabla\,(\lambda_{eff}\,\nabla T) + \eta(\dot{\gamma}, T)\dot{\gamma}^2, \quad (5)$$

где c_p – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); λ_{eff} – эффективная теплопроводность материала, Вт/(м·К).

Существенной особенностью теплопереноса в канале экструдера является перемешивающее действие шнекового рабочего органа, которое значительно интенсифицирует теплообмен в поперечном сечении по сравнению с чисто ламинарным режимом течения. Собственная (молекулярная) теплопроводность пищевого сырья составляет $\lambda_0 = 0{,}4$ Вт/(м·К), что при характерных скоростях течения и размерах канала приводит к глубине теплового проникновения, составляющей лишь доли процента от радиуса трубы, и к нагреву только тонкого пристенного слоя. В реальном экструдере шнековый рабочий орган обеспечивает интенсивное поперечное перемешивание, многократно увеличивающее эффективный теплоперенос. Для учёта этого эффекта в модели используется эффективная теплопроводность λ_{eff}, значение которой существенно превышает молекулярное и отражает суммарный вклад молекулярной теплопроводности и конвективного перемешивания, создаваемого шнеком. В работе принято $\lambda_{eff} = 25$ Вт/(м·К), что соответствует режиму интенсивного перемешивания в одношнековом экструдере.

Для стенки трубы уравнение теплопроводности в стационарной постановке имеет вид:

$$\nabla\,(\lambda_s\,\nabla T_s) = 0, \quad (6)$$

где λ_s – теплопроводность материала трубы, Вт/(м·К); T_s – температура стенки, °С.

Отсутствие объёмного источника теплоты в уравнении (6) обусловлено принятым подходом к моделированию СВЧ-нагрева в упрощённой инженерной постановке. Вместо расчёта распределения электромагнитного поля и связанного с ним пространственного тепловыделения результирующее действие СВЧ-нагрева задаётся в виде эквивалентного температурного воздействия на внутренней поверхности трубы. На границе раздела «стенка – материал» выполняются условия сопряжения – непрерывность температуры и теплового потока.

Граничные условия задачи формулируются следующим образом. На входе в расчётную область (x = 0) задаётся равномерный профиль скорости, определяемый объёмной

подачей винтового насоса $Q_н$, и температура материала $T_{вх}$ = 40 °C (313,15 К). На выходе из отверстия фильеры (x = L + L_{die}) ставится условие заданного давления $p_{вых}$ = 0,06 МПа, соответствующего давлению в вакуумной камере. На внутренней поверхности стенки трубы (y = ±R_1) задаётся температура T_w, интерпретируемая как эквивалентное температурное воздействие СВЧ-нагрева в упрощённой инженерной постановке и условие прилипания для скорости (v = 0). На наружной поверхности стенки трубы (y = ±R_2) задаётся условие конвективного теплообмена с окружающей средой с коэффициентом теплоотдачи h = 10 Вт/(м²·К) и температурой окружающего воздуха $T_{окр}$ = 20 °C (293,15 К). На стенках фильеры принимается условие прилипания для скорости.

Для численной реализации поставленной задачи используется программный комплекс COMSOL Multiphysics 6.3, обеспечивающий решение связанных мультифизических задач методом конечных элементов. В модели задействованы следующие модули: Heat Transfer in Solids and Fluids (решение задачи теплопереноса в стенке, фильере и в экструдируемом материале) и Laminar Flow (решение гидродинамической задачи течения неньютоновской среды). Связь между модулями осуществляется через встроенный мультифизический интерфейс Nonisothermal Flow, обеспечивающий двустороннюю связь: температурное поле определяет вязкость материала через зависимость (1)–(2), а поле скоростей определяет конвективный перенос теплоты в уравнении (5). Расчётная область дискретизируется неструктурированной треугольной сеткой конечных элементов с локальным измельчением в области экструдируемого материала и в стенках трубы. Задача решается в стационарной постановке.

Параметры моделирования приняты в соответствии с патентным описанием [8] и литературными данными по свойствам пищевого сырья. Основные геометрические, теплофизические и реологические параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры численной модели

Параметр	Обозначение	Значение	Единица
Внутренний радиус трубы	R_1	0,04	м
Наружный радиус трубы	R_2	0,05	м
Длина зоны нагрева	L	0,4	м
Толщина фильеры	L_{die}	0,01	м
Радиус отверстия фильеры	R_{die}	0,005	м
Плотность экструдируемого материала	ρ	1200	кг/м³
Удельная теплоёмкость	c_p	2500	Дж/(кг·К)
Эффективная теплопроводность	λ_{eff}	25	Вт/(м·К)
Коэффициент консистенции при T_0	K_0	1500	Па·с^n
Индекс течения	n	0,35	–
Температурный коэффициент вязкости	β	0,02	К$^{-1}$
Референсная температура	T_0	313,15 (40)	К (°C)
Температура на входе	$T_{вх}$	313,15 (40)	К (°C)
Давление в вакуумной камере	$p_{вых}$	0,06	МПа
Объёмная подача насоса (базовая)	$Q_н$	0,085	м³/ч
Температура стенки (базовая)	T_w	180	°C

В рамках параметрического исследования варьировались два основных режимных параметра: температура стенки трубы T_w в диапазоне 120–200 °C (как эквивалентный расчётный параметр, характеризующий интенсивность СВЧ-нагрева в упрощённой

инженерной постановке) и объёмная подача винтового насоса $Q_н$ в диапазоне 0,031–0,113 м^3/ч (что соответствует различным частотам вращения ротора насоса).

Таким образом, сформулированная мультифизическая модель позволяет в рамках единой расчётной постановки определить распределения температуры, скорости и давления по длине и сечению рабочего канала экструдера, оценить степень неравномерности прогрева материала в предфильерной зоне, а также проанализировать влияние температуры стенки канала и режимов подачи винтового насоса на тепловое и гидродинамическое состояние среды перед выходом из фильеры.

Результаты и обсуждение

Численное решение сформулированной мультифизической задачи выполнено в программном комплексе COMSOL Multiphysics 6.3. Расчёты проведены для базового набора параметров, соответствующего конструктивно-технологической схеме энергосберегающего экструдера. На рис. 2 представлено двумерное поле температуры в продольном сечении рабочего канала экструдера при базовых параметрах моделирования (T_w = 180 °C, $Q_н$ = 0,085 м^3/ч). Нагрев стенки трубы приводит к формированию выраженного поперечного градиента температуры, пристенные слои материала нагреваются значительно быстрее, чем центральная часть потока. Максимальная температура в расчётной области достигает 188,4 °C (вблизи стенки на выходном участке), а минимальная составляет 31,6 °C (в центре потока вблизи входа). Средняя температура экструдируемого материала в канале составляет 110,7 °C.

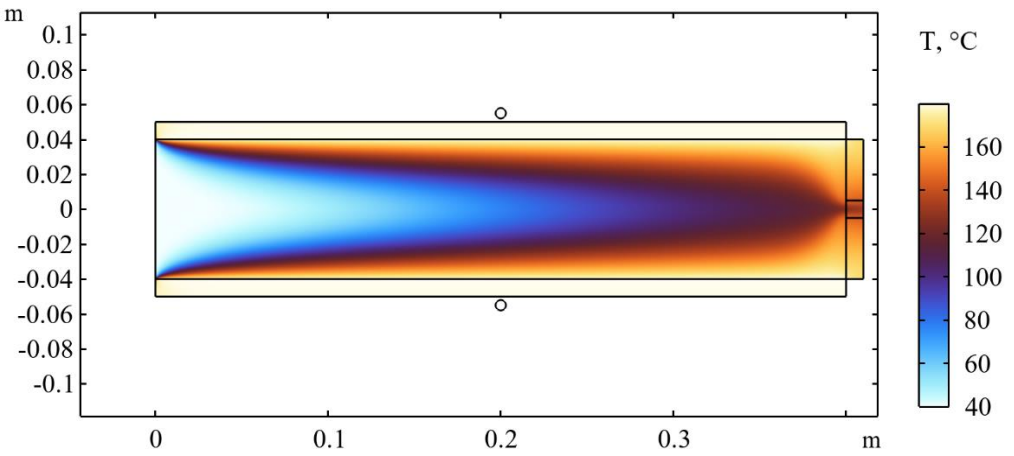


Рисунок 2 – Поле температуры в продольном сечении рабочего канала экструдера при T_w = 180 °C, $Q_н$ = 0,085 м^3/ч.

Несмотря на использование в модели эффективной теплопроводности λ_{eff} = 25 Вт/(м·К), учитывающей перемешивающее действие шнека, неравномерность прогрева по сечению остаётся заметной, что принятым способом задания теплового воздействия через температуру стенки канала.

Для количественной оценки прогрева материала по длине канала на рис. 3 приведены профили температуры вдоль оси трубы (y = 0) и вблизи внутренней стенки (y = 0,038 м, т.е. на расстоянии 2 мм от стенки) в зависимости от координаты x. Температура у стенки возрастает существенно быстрее, чем на оси потока. В сечении перед фильерой (x = 0,4 м) температура пристенного слоя достигает значений порядка 175 °C, тогда как температура на оси составляет около 126 °C. Перепад температуры в поперечном направлении ΔT в сечении перед фильерой составляет около 49 °C. В отверстии фильеры (x = 0,4–0,41 м) происходит дополнительный прогрев материала за счёт резкого сужения канала и увеличения скорости сдвига, и температура в центре на выходе из фильеры достигает 131,2 °C.

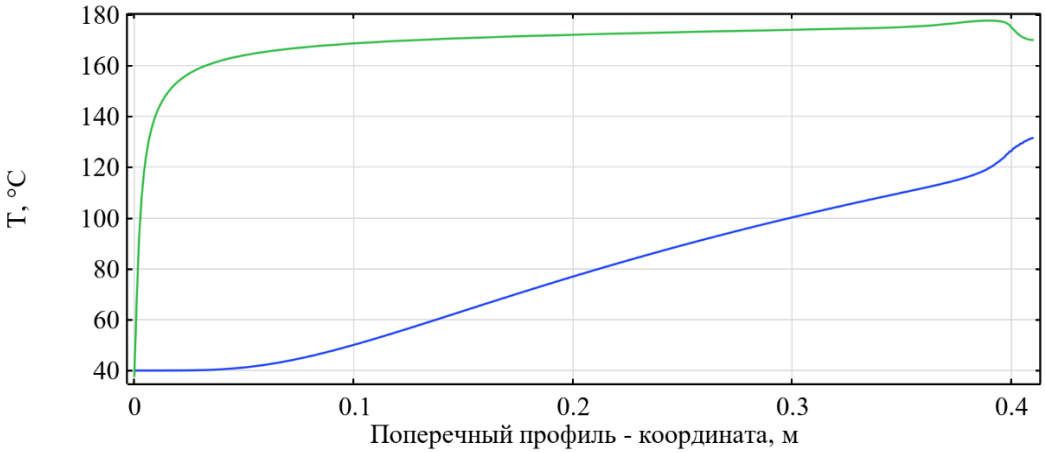


Рисунок 3 – Распределение температуры вдоль канала на оси (y = 0) и вблизи стенки (y = 0,038 м) при базовых параметрах

На рис. 4 показаны поперечные профили температуры в трёх характерных сечениях канала: вблизи входа (x = 0,02 м ≈ 0,05L), в средней части (x = 0,2 м = 0,5L) и перед фильерой (x = 0,38 м ≈ 0,95L). Во входном сечении профиль температуры практически равномерный, близкий к температуре поступающего сырья (40 °C). По мере продвижения к фильере формируется выраженный профиль с максимумом у стенки, причём неравномерность нарастает с увеличением координаты x.

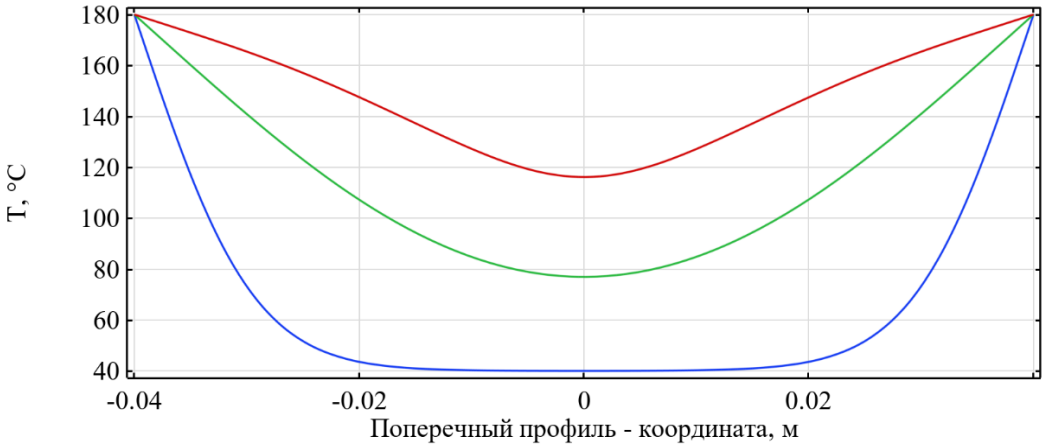


Рисунок 4 – Поперечные профили температуры в сечениях x = 0,02 м; x = 0,2 м; x = 0,38 м

В сечении перед фильерой разность температур между пристенной зоной и осью потока является наибольшей, что в рамках принятой расчётной постановки отражает неравномерность прогрева материала при эквивалентном температурном воздействии, заданном на стенке канала.

Поле модуля скорости в продольном сечении канала представлено на рис. 5. Течение материала носит ламинарный характер; средняя скорость в основном канале составляет 0,00477 м/с, что соответствует времени пребывания материала в зоне нагрева порядка 84 секунд. В отверстии фильеры скорость резко возрастает вследствие сужения канала: максимальная скорость достигает 0,049 м/с, что превышает среднюю скорость в канале примерно в 10 раз. Профиль скорости в поперечных сечениях основного канала имеет форму, характерную для напорного течения псевдопластичной жидкости: уплощённый в центральной части потока по сравнению с параболическим профилем ньютоновской жидкости. Это обусловлено степенным реологическим законом (n = 0,35 < 1): при малых

скоростях сдвига в центре канала эффективная вязкость возрастает, что ведёт к выравниванию профиля скорости в ядре потока.

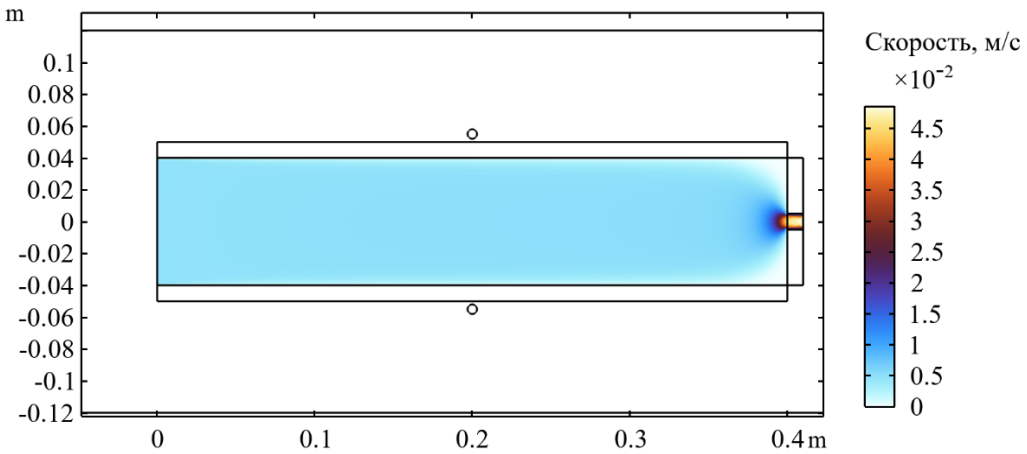


Рисунок 5 – Поле модуля скорости (м/с) в продольном сечении рабочего канала

На рис. 6 приведены поперечные профили осевой скорости в сечениях x = 0,02 м, x = 0,2 м и x = 0,38 м. По мере продвижения материала к фильере наблюдается перестройка профиля скорости: по мере прогрева пристенные слои становятся менее вязкими, что ведёт к увеличению градиента скорости вблизи стенки. При этом объёмный расход через любое поперечное сечение остаётся постоянным в силу несжимаемости материала и неизменной подачи насоса.

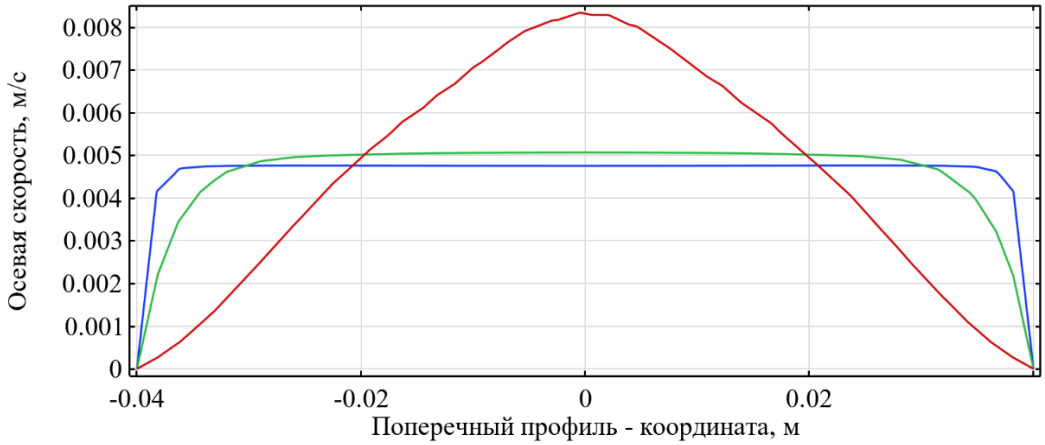


Рисунок 6 – Поперечные профили осевой компоненты скорости в сечениях x = 0,02 м; x = 0,2 м; x = 0,38 м

На рис. 7 представлено распределение давления вдоль оси канала. В базовом расчёте с заданной скоростью на входе давление определяется из решения гидродинамической задачи и составляет на входе в канал порядка 0,064 МПа, монотонно убывая к значению 0,06 МПа на выходе из фильеры (давление в вакуумной камере). Относительно малый перепад давления (около 0,004 МПа) обусловлен низкой средней скоростью течения при высокой вязкости материала и заданных граничных условиях.

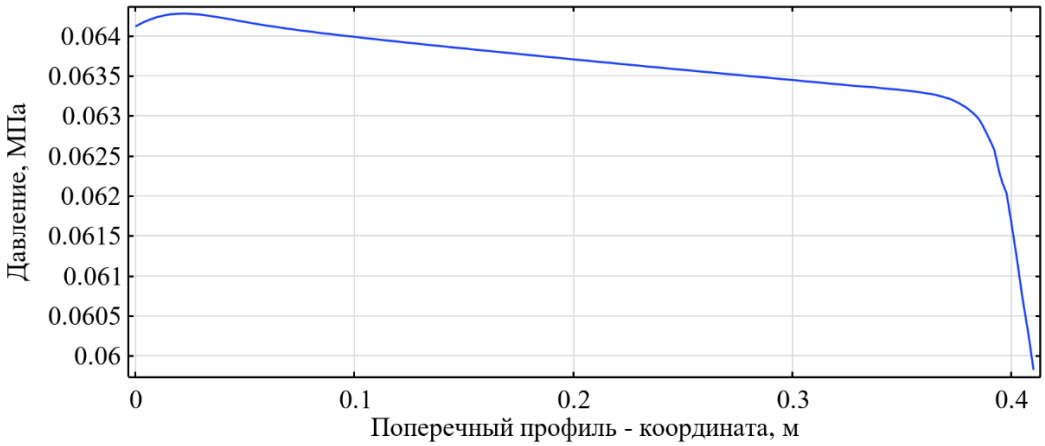


Рисунок 7 – Распределение давления вдоль оси канала (y = 0). По оси X – координата x (м), по оси Y – давление p (МПа)

Поле эффективной вязкости материала в продольном сечении канала представлено на рис. 8. Вязкость существенно неоднородна как в поперечном, так и в продольном направлении. Средняя вязкость в расчётной области составляет 8740 Па·с. Вблизи стенки, где температура высока, а скорость сдвига максимальна, эффективная вязкость принимает минимальные значения. В центральной части потока, где температура ниже, а скорость сдвига мала, вязкость остаётся высокой. По мере продвижения материала к фильере вязкость в целом снижается вследствие прогрева, однако поперечная неоднородность сохраняется на всей длине канала. В отверстии фильеры вязкость снижается резко вследствие значительного увеличения скорости сдвига.

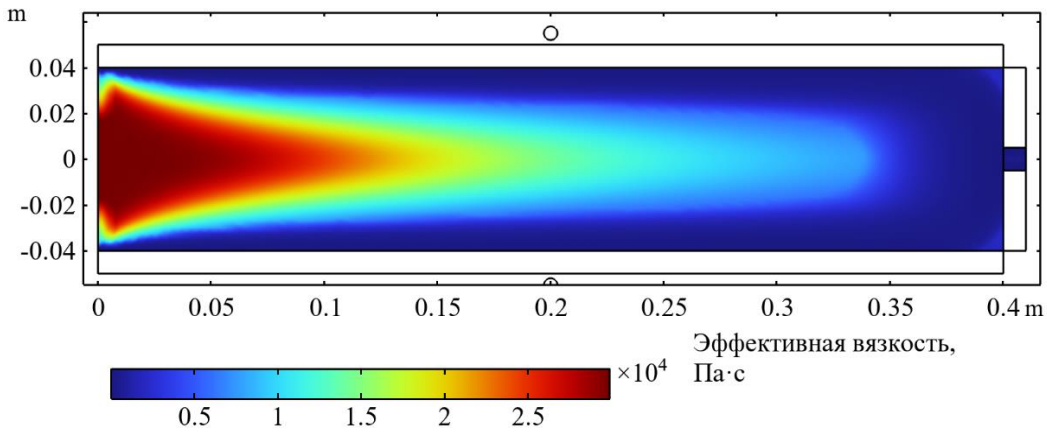


Рисунок 8 – Поле эффективной вязкости (Па·с) в продольном сечении рабочего канала

Для оценки влияния интенсивности нагрева на тепловое состояние материала выполнена серия расчётов при различных значениях температуры стенки T_w в диапазоне 120–200 °C, которая в рамках упрощённой инженерной постановки рассматривается как эквивалентный расчётный параметр, характеризующий интенсивность СВЧ-нагрева, при фиксированной объёмной подаче $Q_н$ = 0,085 м^3/ч. Результаты сведены в табл. 2.

С ростом температуры стенки средняя температура материала увеличивается практически линейно – примерно на 10 °C при увеличении T_w на каждые 20 °C. Температура материала на оси потока на выходе из фильеры возрастает от 91,2 °C при T_w = 120 °C до 144,6 °C при T_w = 200 °C.

Таблица 2 – Влияние температуры стенки на параметры материала при Q_н = 0,085 м^3/ч

T_w, °C	$T_{средняя}$, °C	T, перед фильерой (ось), °C	T, на выходе фильеры (ось), °C	Средняя вязкость, Па·с
120	80,4	88,2	91,2	10435
140	90,5	100,7	104,4	9910
160	100,6	113,2	117,8	9352
180	110,7	125,8	131,2	8740
200	120,8	138,4	144,6	8115

Средняя вязкость монотонно снижается вследствие экспоненциальной температурной зависимости коэффициента консистенции (2). На рис. 9 представлены профили температуры вдоль оси канала для всех рассмотренных значений T_w.

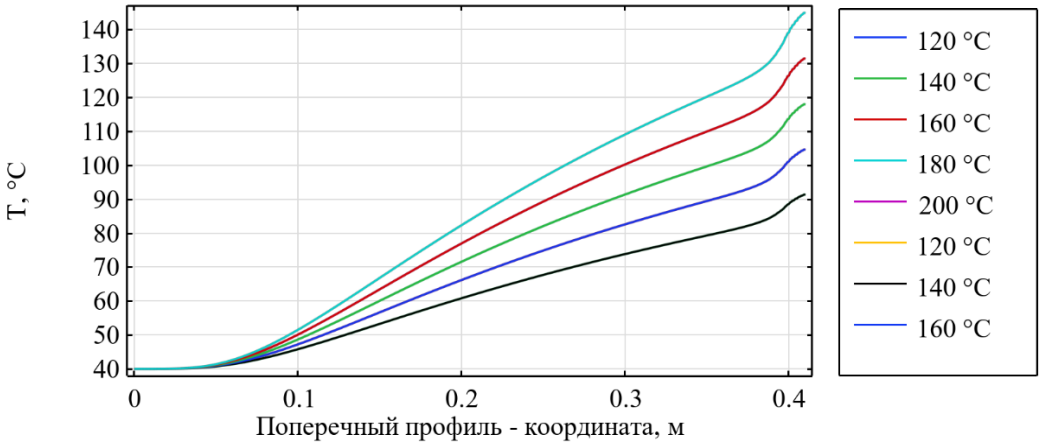


Рисунок 9 – Распределение температуры вдоль оси канала (y = 0) при различных значениях T_w

Для обеспечения декомпрессионного вспучивания температура материала на выходе из фильеры должна превышать температуру кипения воды при давлении в вакуумной камере. При давлении 0,06 МПа температура насыщения водяного пара составляет приблизительно 86 °C. Из табл. 2 следует, что данное условие выполняется при всех рассмотренных значениях $T_w \geq 120$ °C: даже при минимальной температуре стенки температура в центре потока на выходе из фильеры (91,2 °C) превышает температуру кипения. Однако для обеспечения интенсивного вспучивания и глубокой желатинизации крахмала необходима температура порядка 120–150 °C, что достигается при $T_w \geq 160$ °C.

Объёмная подача винтового насоса определяет среднюю скорость материала в канале и, следовательно, время его пребывания в зоне нагрева. Увеличение подачи сокращает время пребывания материала в зоне нагрева и снижает степень его прогрева, тогда как уменьшение подачи увеличивает время теплового воздействия, но может привести к локальному перегреву пристенных слоёв. Результаты параметрического исследования при фиксированной температуре стенки $T_w = 180$ °C представлены в табл. 3.

Влияние объёмной подачи на температуру материала является весьма значительным. При снижении подачи с 0,1133 до 0,0314 м³/ч средняя температура возрастает с 102,5 до 141,4 °C, а температура на выходе из фильеры – с 115,8 до 169,8 °C.

Таблица 3 – Влияние объёмной подачи насоса на параметры материала при T_w = 180 °C

$Q_н$, м³/ч	$V_{средняя}$, м/с	$T_{средняя}$, °C	T, перед фильерой (ось), °C	T, на выходе фильеры (ось), °C	Средняя вязкость, Па·с
0,0314	0,00176	141,4	169,0	169,8	4 780
0,0503	0,00282	127,1	152,8	155,1	6 388
0,0629	0,00353	120,0	142,3	145,7	7 331
0,0850	0,00477	110,7	125,8	131,2	8 740
0,1133	0,00636	102,5	108,7	115,8	10 130

Время пребывания материала в зоне нагрева при этом увеличивается с 63 до 227 секунд (оценка по отношению L/V), что обеспечивает существенно более глубокий прогрев. При минимальной подаче $Q_н$ = 0,0314 м³/ч температура в центре потока на выходе из фильеры (169,8 °C) приближается к температуре стенки (180 °C), что свидетельствует о практически полном прогреве материала по сечению. Средняя вязкость при этом снижается более чем в два раза – с 10130 до 4780 Па·с. На рис. 10 представлены профили температуры вдоль оси канала для всех рассмотренных значений подачи.

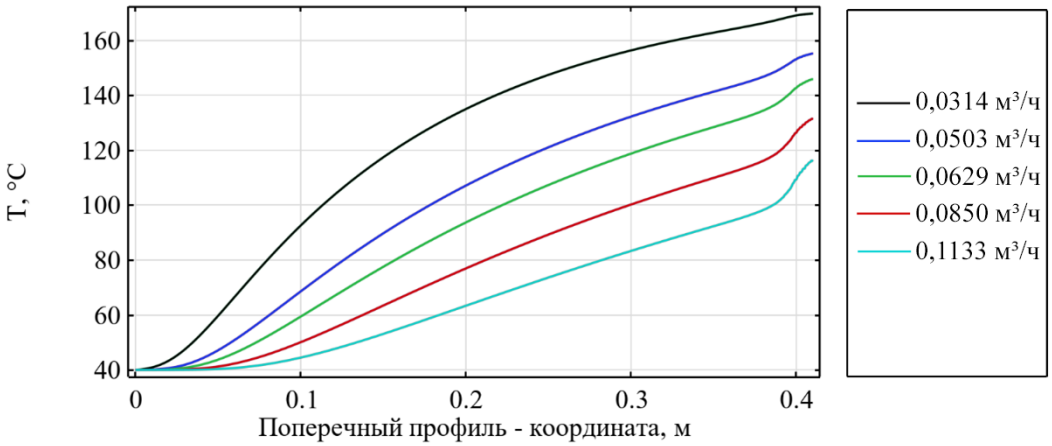


Рисунок 10 – Распределение температуры вдоль оси канала (y = 0) при различных значениях $Q_н$

Сопоставление рис. 9 и рис. 10 показывает, что объёмная подача насоса оказывает более сильное влияние на температуру материала по сравнению с температурой стенки: при варьировании $Q_н$ от 0,031 до 0,113 м³/ч диапазон изменения температуры на выходе из фильеры составляет 54 °C, тогда как при варьировании T_w от 120 до 200 °C – 53,4 °C. Однако при варьировании подачи одновременно изменяется и производительность экструдера, что необходимо учитывать при оптимизации технологического режима.

Декомпрессионное вспучивание происходит при переходе материала из области повышенного давления через фильеру в вакуумную камеру. Необходимым условием для протекания этого процесса является превышение температурой материала в предфильерной зоне температуры кипения воды при давлении в вакуумной камере [8]. При давлении в вакуумной камере 0,06 МПа температура насыщения водяного пара составляет приблизительно 86 °C. Из результатов параметрического исследования (табл. 2, 3) следует, что данное условие выполняется во всех рассмотренных режимах: температура материала в центре потока на выходе из фильеры превышает 86 °C при любых исследованных сочетаниях T_w и $Q_н$.

Вместе с тем для обеспечения интенсивного вспучивания и формирования развитой пористой структуры экструдата, а также для полной желатинизации крахмала,

содержащегося в зерновом сырье, необходима температура материала порядка 120–150 °C. Анализ данных табл. 2 показывает, что при номинальной подаче $Q_н$ = 0,085 м^3/ч данный диапазон достигается при $T_w \geq 160$ °C (Т на выходе фильеры 117,8–144,6 °C). При снижении подачи до 0,0314 –0,0629 м^3/ч (табл. 3) температура на выходе из фильеры попадает в диапазон 145,7–169,8 °C, что превышает необходимый уровень и обеспечивает благоприятные условия для вспучивания.

Следует отметить, что при высоких значениях температуры стенки и малой подаче материала (T_w = 200 °C, $Q_н$ = 0,0314 м^3/ч) температура пристенного слоя может существенно превышать 170 °C, что создаёт риск локального перегрева сырья и деградации термолабильных компонентов. Это обстоятельство определяет верхнюю границу допустимого диапазона режимных параметров.

Полученные результаты подтверждают, что сочетание винтового насоса и нагревающего устройства, представленного в расчётной модели в виде эквивалентного температурного воздействия на стенку канала, позволяет достичь в рабочем канале температурных условий, необходимых для последующего декомпрессионного вспучивания экструдата. Управление температурой стенки как эквивалентным расчётным параметром интенсивности теплового воздействия и объёмной подачей насоса (частотой вращения ротора) обеспечивает возможность гибкой настройки теплового режима в широком диапазоне. Вместе с тем поперечная неравномерность прогрева материала в рамках принятой упрощённой инженерной постановки остаётся заметной даже с учётом перемешивающего действия шнека, что указывает на целесообразность дальнейшего развития модели с более полным учётом объёмного характера СВЧ-подвода энергии.

Выводы

Разработана двумерная мультифизическая модель рабочего канала одношнекового экструдера с винтовым насосом и нагревающим устройством, представленным в расчётной постановке в виде эквивалентного температурного воздействия на стенку канала, объединяющая сопряжённый теплоперенос и вязкое течение неньютоновской среды с температурно-зависимой вязкостью и учётом перемешивающего действия шнека через эффективную теплопроводность. Установлено, что при базовых параметрах T_w=180 °C и $Q_н$= 0,085 м^3/ч средняя температура материала в канале составляет 110,7 °C, температура в центре потока на выходе из фильеры достигает 131,2 °C, средняя скорость течения 0,00477 м/с, а средняя эффективная вязкость 8740 Па·с, что подтверждает возможность декомпрессионного вспучивания экструдата, поскольку температура превышает 86 °C (температуру кипения воды при давлении 0,06 МПа в вакуумной камере). Показано, что при повышении температуры стенки от 120 до 200 °C температура на выходе из фильеры возрастает от 91,2 до 144,6 °C, а диапазон 120–150 °C, необходимый для интенсивного вспучивания и желатинизации крахмала, достигается при $T_w \geq 160$ °C. Снижение объёмной подачи винтового насоса с 0,1133 до 0,0314 м^3/ч приводит к росту температуры на выходе из фильеры с 115,8 до 169,8 °C вследствие увеличения времени пребывания материала в зоне нагрева с 63 до 227 с. При $Q_н$= 0,0314 м^3/ч температура в центре потока приближается к температуре стенки, что свидетельствует о практически полном прогреве сырья. Вместе с тем при высоких значениях T_w и малой подаче температура пристенного слоя может превышать 170 °C, создавая риск локального перегрева сырья и деградации термолабильных компонентов. Разработанная модель может быть использована для предварительного расчёта и оптимизации режимных параметров экструдера, а также для сравнительного анализа способов подвода теплоты к экструдируемому материалу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Экструзионная технология пищевых текстуратов / А. Н. Остриков, М. А. Глухов, А. С. Рудометкин, Е. Г. Окулич-Казарин // Пищевая промышленность. 2007. № 9. С. 18–20.

2. Шариков А.Ю., Степанов В.И., Иванов В.В. Термопластическая экструзия в процессах пищевой биотехнологии // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 3(30). С. 447–460.

3. Возможности повышения качества экструдированных кукурузных крахмалов / Г. В. Алексеев, А. П. Савельев, А. А. Бирченко, Е. Н. Ивлева // Ползуновский вестник. 2024. № 3. С. 55–61.

4. Термопластическая экструзия в биотехнологии крахмалсодержащего сырья / А. Ю. Шариков, В. В. Иванов, М. В. Амелякина, Д. В. Поливановская // Пищевая промышленность. 2021. № 9. С. 60–61.

5. Агеев О. В. Обоснование реологической модели фаршевой системы из рыбного сырья при производстве экструдированной продукции // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т. 11. № 3. С. 6–25.

6. Шухов А.А., Коновалов В.И., Сергунцов А.С. Анализ перспективных направлений конструктивно-технологического совершенствования экструдеров / // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2023. № 191. С. 312–348.

7. Патент 192684 РФ, МПК B29C 48/00. Экструдер с вакуумной камерой / А. А. Курочкин, П. К. Гарькина, Д. И. Фролов, А. А. Блинохватов, М. А. Потапов, 2019. Бюл. № 27. 7 с.

8. Патент 2807219 C1 РФ, МПК A23P 30/20. Энергоэффективный экструдер / А. А. Курочкин, Д. И. Фролов, М. А. Потапов, 2023. 8 с.

9. Marschik C., Roland W., Osswald T. A. Melt conveying in single-screw extruders: Modeling and simulation // Polymers. 2022. Т. 14. №. 5. С. 875.

10. Adekola K. A. Engineering review food extrusion technology and its applications // Journal of Food Science and Engineering. 2016. Т. 6. №. 3. С. 149-168.

REFERENCES

1. Ostrikov A.N., Glukhov M.A., Rudometkin A.S., Okulich-Kazarin E.G. *Ekstruzionnaya tekhnologiya pishchevykh teksturatov* [Extrusion technology of food texturates]. *Pishchevaya promyshlennost'*. 2007. No. 9, pp. 18–20.

2. Sharikov A.Yu., Stepanov V.I., Ivanov V.V. *Termoplasticheskaya ekstruziya v protsessakh pishchevoy biotekhnologii* [Thermoplastic extrusion in food biotechnology processes]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*. 2019. Vol. 9, No. 3(30), pp. 447–460.

3. Alekseev G.V., Savel'ev A.P., Birchenko A.A., Ivleva E.N.*Vozmozhnosti povysheniya kachestva ekstrudirovannykh kukuruznykh krakhmalov* [Possibilities for improving the quality of extruded corn starches]. *Polzunovskiy vestnik*. 2024. No. 3, pp. 55–61.

4. Sharikov A.Yu., Ivanov V.V., Amelyakina M.V., Polivanovskaya D.V. *Termoplasticheskaya ekstruziya v biotekhnologii krakhmalsoderzhashchego syr'ya* [Thermoplastic extrusion in biotechnology of starch-containing raw materials]. *Pishchevaya promyshlennost'*. 2021. No. 9, pp. 60–61.

5. Ageev O. V. *Obosnovanie reologicheskoy modeli farshevoy sistemy iz rybnogo syr'ya pri proizvodstve ekstrudirovannoy produktsii* [Substantiation of the rheological model of a minced fish raw material system in the production of extruded products]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2025. Vol. 11, No. 3, pp. 6–25.

6. Shukhov A.A., Konovalov V.I., Serguntsov A.S. *Analiz perspektivnykh napravleniy konstruktivno-tekhnologicheskogo sovershenstvovaniya ekstruderov* [Analysis of promising

directions for the design and technological improvement of extruders]. *Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023. No. 191, pp. 312–348.

7. Kurochkin A.A., Gar'kina P.K., Frolov D.I., Blinokhvatov A.A., Potapov M.A. Patent RF 192684. IPC B29C 48/00. *Ekstruder s vakuumnoy kameroy* [Extruder with vacuum chamber], 2019. Byul. No. 27. 7 p.

8. Kurochkin A.A., Frolov D.I., Potapov M.A. Patent RF 2807219 C1. IPC A23P 30/20. *Energoeffektivnyy ekstruder* [Energy-efficient extruder], 2023. 8 p.

9. Marschik C., Roland W., Osswald T. A. Melt conveying in single-screw extruders: Modeling and simulation. Polymers. 2022. Vol. 14, No. 5, pp. 875.

10. Adekola K. A. Engineering review food extrusion technology and its applications. Journal of Food Science and Engineering. 2016. Vol. 6, No. 3, pp. 149–168.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Анатолий Алексеевич Курочкин – доктор технических наук, профессор, Пензенский государственный технологический университет (440039, Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail: anatolii_kuro@mail.ru).	*Kurochkin Anatoly Alekseevich* – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Penza State Technological University (440039, Russia, Penza, Baidukova Passage / Gagarina St, 1a/11, e-mail: anatolii_kuro@mail.ru)
Фролов Дмитрий Иванович – кандидат технических наук, доцент, Пензенский государственный технологический университет (440039, Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail: surr@bk.ru).	*Frolov Dmitriy Ivanovich* – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Penza State Technological University (440039, Russia, Penza, Baidukova Passage / Gagarina St, 1a/11, e-mail: surr@bk.ru).
Аширов Равиль Ринатович – аспирант кафедры «Пищевые производства», Пензенский государственный технологический университет (440039, Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail: ashirovr19@mail.ru).	*Ashirov Ravil Rinatovich* – postgraduate student of the Department of Food Production, Penza State Technological University (440039, Russia, Penza, Baidukova Passage / Gagarina St, 1a/11, e-mail: ashirovr19@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 07.04.2026; одобрена после рецензирования 11.05.2026, принята к публикации 20.05.2026.
The article was submitted 07.04.2026; approved after reviewing 11.05.2026; accepted for publication 20.05.2026.