ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-113-119
УДК 664:66.099.2

Оригинальная статья
http://fptt.ru/

Управление скоростью перемещения вязкоупругих материалов в цилиндрическом канале шнекового питателя формующих устройств

Е. В. Фоменко*, А. Х.-Х. Нугманов

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16

**e-mail:albert909@yandex.ru*

Дата поступления в редакцию: 01.03.2019
Дата принятия в печать: 28.03.2019

© Е. В. Фоменко, А. Х.-Х. Нугманов, 2019

Аннотация: Представленная статья тесно пересекается с проблемами, возникающими при переработке пшеницы, которые имеют свои специфические особенности, в частности со сложностью реализации процесса формования клейковинного штранга, связанной с вязкоупругими и адгезионными свойствами сырой клейковины. В статье рассмотрены результаты применения численного метода конечных разностей для решения уравнения Навье-Стокса в случае одномерной задачи прохождения охлаждаемого вязкоупругого материала внутри фильер круглого сечения. Проанализированы характерные особенности полученной при решении модели поверхности эволюции скоростей. Даны осредненные результаты для возможной автоматизации процесса. Объект исследования выбран не случайно, т. к. вязкостные свойства сырой клейковины являются переменными и зависят от температуры, химического состава и свойств исходного сырья. Работа не с самим объектом (явлением, процессом) исследования, а с его моделью, дает возможность относительно быстро и без существенных материальных затрат охарактеризовать его свойства и поведение в различных ситуациях. Необходимость выявления закономерностей движения сырой клейковины в узле формования штранга, а также выбор наиболее подходящей системы автоматизации контроля скорости его перемещения до узла формования в шнековом питателе аппарата очевидна для последующего физико-математического моделирования тепломассообменных процессов вакуумной заморозки, подсушки и гранулировании клейковинного штранга. Результаты исследований, представленные в статье, согласуются с имеющимися сведениями по данной тематике. Такой подход к решению задачи выбора рациональных гидродинамических режимов применен ввиду сложности экспериментального определения полей скоростей и трудности аналитического решения системы гидродинамических дифференциальных уравнений Навье-Стокса при переменных коэффициентах пропорциональности.

Ключевые слова. Уравнение Навье-Стокса, численные методы, неньютоновские жидкости, технические средства контроля процесса

Для цитирования: Фоменко, Е. В. Управление скоростью перемещения вязкоупругих материалов в цилиндрическом канале шнекового питателя формующих устройств / Е. В. Фоменко, А. Х.-Х. Нугманов // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 1. – С. 113–119. DOI: https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-113-119.

Original article

Available online at http://fptt.ru/

Velocity Control of Visco-Elastic Materials Movement in the Cylindrical Channel of the Grinder Feed Screw of the Former

E.V. Fomenko*, A.H.-H. Nugmanov

Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russia

**e-mail:albert909@yandex.ru*

Received: March 01, 2019
Accepted: March 28, 2019

© E.V. Fomenko, A.H.-H. Nugmanov, 2019

Abstract. The present research features the problems of wheat processing. Wheat processing has its own specific features. For instance, the process of gluten extrusion forming is very complex since it is associated with the visco-elastic and adhesive properties of raw gluten. The article discusses the results of applying the numerical finite difference method to the Navier-Stokes equation in the case of the one-dimensional problem when a cooled viscoelastic material has to pass through circular nozzles. The paper also features the obtained surface model of velocity evolution and some averaged results for the possible automation of the process. The viscosity properties of raw gluten are variable and depend on temperature, chemical composition, and properties of the raw material. Modeling makes it possible to characterize the properties of the material and its behavior in various situations. Such research demands neither additional time nor significant costs. The authors identified patterns of movement for raw gluten in the extrusion molding unit and selected the most appropriate automation system to control the speed of its movement to the

molding assembly in the grinder feed screw. The significance of the research is obvious for subsequent physical and mathematical modeling of heat and mass transfer processes of vacuum freezing and drying and granulating of gluten extrusions. The results of the research presented in the article are consistent with the available information on this topic. The present approach to solving the problem of choosing the best rational hydrodynamic regimes was applied due to the complexity of the experimental determination of velocity fields and the difficulty of analyzing the Navier-Stokes system of hydrodynamic differential equations with variable proportionality coefficients.

Keywords. Navier-Stokes equation, numerical methods, non-Newtonian fluids, technical means of process control

For citation: Fomenko EV, Nugmanov AH-H. Velocity Control of Visco-Elastic Materials Movement in the Cylindrical Channel of the Grinder Feed Screw of the Former. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(1):113–119. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-113-119.

Введение

Уровень и высокие темпы развития вычислительной техники открыли новые возможности для фундаментальных исследований и их приложений в области математического моделирования физических процессов и управления техническими системами. Выявление закономерностей распределения скоростей и расход неньютоновской вязкоупругой жидкости при установившемся ламинарном режиме в прямом канале диска формования на основе решения системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса позволит найти конечную среднюю скорость перемещения сырой клейковины в виде штранга на выходе из цилиндрической фильеры и ее расход при известном перепаде давления [13, 15].

Работа не с самим объектом (явлением, процессом) исследования (например, перемещение сырой клейковины внутри каналов фильеры), а с его моделью, дает возможность относительно быстро, с достаточной полнотой и без существенных материальных затрат исследовать его свойства и поведение в различных ситуациях. Система автоматизации контроля скорости перемещения вязкоупругих материалов до узла формования представляет собой еще один важный этап к рационализации технологическими процессами на основе применения информационных технологий, который позволит осуществлять управление операциями, данными, информацией и ресурсами за счет использования компьютеров и программного обеспечения.

Анализ существующих технологий сухой пшеничной клейковины (СПК) показал, что для повышения эффективности получения СПК перспективным способом является предварительное вакуумное самопроизвольное замораживание сырой клейковины, сформованной в виде штранга и последующая его сушка, где скорость продвижения штранга составляет важный технологический параметр, влияющий на аппаратурное оформление технологии [3, 12].

Таким образом, для достижения рациональных габаритных размеров разрабатываемой конструкции аппарата необходимо провести исследование и моделирование закономерностей движения сырой клейковины в узле формования штранга, а также выбрать наиболее подходящую систему автоматизации контроля скорости его перемещения до узла формования в шнековом питателе аппарата.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выбрана клейковина, отмытая из пшеничного теста [5]. Она представляет собой сильно гидратированный гель, состоящий в основном из белков, но содержащий еще углеводы, липиды и минеральные вещества (рис. 1).

Для реализации поставленных задач применялись общепринятые и специальные методы сбора, обработки и анализа информации: методы моделирования и расчета скорости процесса движения сырой клейковины в узле формования штранга; методы подобных преобразований, а именно, метод анализа размерности в теории подобия; численно-аналитический метод конечных разностей; методы статистической обработки экспериментальных данных.

Применение современных компьютерных математических программ, приборов и разработанных опытных установок для исследования выбранного объекта позволило всесторонне изучить исследуемую проблему все ее аспекты и параметры.

Результаты и их обсуждение

Исследуемая жидкость, а именно сырая пшеничная клейковина, согласно классификации [7], относится к третьей группе вязкоупругих или максвелловских жидкостей, которые текут под воздействием напряжения, но после его снятия частично восстанавливают свою форму подобно упругим твердым телам. Учитывая, что данный материал обладает структурно-механическими и реологическими свойствами неньютоновских вязкоупругих жидкостей, при этом движется внутри канала с круглым сечением (большая вязкость, малые диаметр штранга и скорость его продвижения, для клейкови-

Рисунок 1 – Клейковина, отмытая из пшеничного теста

Figure 1 – Gluten washed from wheat dough

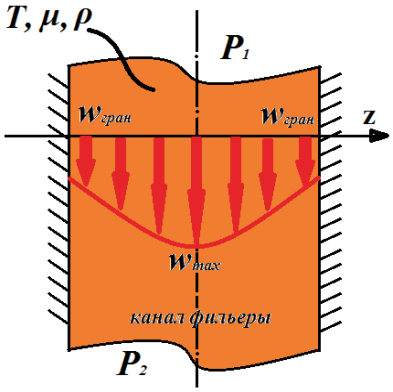

Рисунок 2 – Схема профиля скоростей по сечению потока сырой клейковины в канале фильеры

Figure 2 – Diagram of the velocity profile over the cross section of the flow of raw gluten in the nozzle

ны по предлагаемой технологии), можно однозначно утверждать, что его движение происходит в ламинарном режиме.

При движении исследуемой жидкости в ее потоке кроме сил давления и тяжести возникают силы трения, действие которых проявляется в возникновении внутри потока касательных напряжений. В таком случае для определения эволюции профиля скоростей по сечению потока, который можно принять одномерно плоским (рис. 2), целесообразно тем или иным способом решить систему дифференциальных уравнений Навье-Стокса [8, 11]. При этом проекция скорости w зависит только от расстояния до плоскости отсчета перпендикулярной направлению оси передвижения.

Тогда уравнение движения штранга в канале фильеры можно представить в виде:

$$\rho\frac{dw}{d\tau}=-\rho g-\frac{\partial P}{\partial z}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}, \qquad (1)$$

где τ – время движения, c; z – координата по оси, перпендикулярной направлению оси передвижения, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2; ρ – плотность, кг/м^3; $\frac{\partial P}{\partial z}$ – градиент давления, Па/м; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

При движении сжимаемой, как в нашем случае, жидкости дополнительно возникают силы сжатия и растяжения, вызванные трением. Тогда уравнение движения принимает следующий вид:

$$\rho\frac{dw}{d\tau}=-\rho g-\frac{\partial P}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}+\frac{1}{3}\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right), \qquad (2)$$

где частная производная $\frac{\partial\Theta}{\partial z}$ выражает изменение скорости по оси z, связанное с действием сил тяжести и растяжения, при этом $\Theta=\frac{\partial w}{\partial z}$, ρg – отражает влияние сил тяжести, $\frac{\partial P}{\partial z}$ – влияние изменения статического давления, а $\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}+\frac{1}{3}\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)$ – сил трения, растяжения и сжатия. Каждый член уравнения имеет размерность соответствующей силы, отнесенной к единице объема жидкости.

Таблица 1 – Среднее значение $w_{пр}$ на выходе из канала фильеры

Table 1 – Average value of $w_{пр}$ at the nozzle exit

Наименование	$w_{пр}\cdot 10^3$, м/с
Экспериментальные значения	1,1/1,4/1,2/1,3/1,5
Среднее значение	≈ 1,3

Проведя математические преобразования получим:

$$\frac{dw}{d\tau}=-g\frac{\partial P}{\rho\partial z}+\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}+\frac{1}{3}\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)=-g-\frac{\partial P}{\rho\partial z}+1{,}33\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}. \qquad (3)$$

При моделировании допускаем, что влиянием сил тяжести и изменением статического давления, ввиду малых диаметра и длины штранга (от 3 до 8 мм), можно с достаточной для инженерных расчетов точностью пренебречь, тогда:

$$\frac{dw}{d\tau}=1{,}33\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}=1{,}33\nu\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}, \qquad (4)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости, м^2/с.

Для решения (4) при определении граничных условий П. К. Волков полагает, что из-за сил трения между слоями они будут перемещаться с различными скоростями, причем центральный цилиндрический слой движется с максимальной скоростью [7]. По мере удаления от него к периферии цилиндра скорость элементарных кольцевых слоев будет снижаться, а непосредственно у стенки фильеры жидкость как бы прилипает к ней и скорость на границе $w_{гр}$ обращается в нуль.

Однако в реальности граничная скорость $w_{гр}$ не равна нулю вследствие проскальзывания жидкости вдоль стенки. Скорость проскальзывания $w_{пр}$ определялась путем оценки разности модельной скорости при нулевых граничных условиях и, определенной экспериментальным путем, скорости на выходе из фильеры.

Полученная математическая модель движения сырой клейковины в узле формования штранга (4) разрабатывалась и решалась с применением современных компьютерных математических программ, приборов и разработанных опытных установок.

На основе анализа результатов эксперимента (табл. 1) была определена средняя $w_{пр}$ клейковины на выходе из канала фильеры.

На основе анализа результатов моделирования выяснено, что снижение скорости как на границе, так и по диаметру фильеры происходит по экспоненциальному закону при ее стремлении к нулю. Тогда:

$$w_{гр}=0{,}002-10^{-4}e^{200(\tau_m-\tau_н)}, \qquad (5)$$

где τ_m и $\tau_н$ – текущее и начальное время движения соответственно, с.

Используя для упрощенных расчетов значения средних величин вязкости и скорости передвижения и принимая во внимание, что $\mathrm{Re}=\frac{\rho w d}{\mu}$, целесообразно использовать представленное соотношение [1] для расчета потери напора в виде:

$$\Delta P_П=\frac{64\mu_{ср}w_{ср}l}{2d^2}. \qquad (6)$$

(а) (б)

Рисунок 3 – Контроль регулирования скорости прохождения материала в канале питателя: (а) схема установки оптического датчика и контроль расстояния; (б) оптический датчик контроля

Figure 3 – Control of regulation of the flux in the feeder channel: (a) diagram of the installation of the optical sensor and the distance control; (b) optical control sensor

Согласно проведенным расчетам снижение давления в фильере не превышает 0,5 атм при наихудших в этом аспекте гидродинамических условиях, поэтому разницы между давлением перед фильерой (1 атм даже без подпрессовки в экструдере) и в вакуумной камере достаточно для организации процесса прохождения клейковины через канал фильеры. Наример, если длина фильеры, как в нашем случае, $l = 3$ мм, то потеря давления составляет примерно 1000 Па, что несущественно, но подпрессовка в шнековом питателе необходима при забивании фильеры, например, в случае попадания в исходный материал посторонних включений или отклонения значений характеристик клейковины при изменении технологии ее получения.

В автоматических процессах (объектах) достаточно часто необходимо изменять или поддерживать постоянными какие-либо физические величины, называемыми регулируемыми переменными (например, частоту вращения вала турбины, координаты движущегося объекта, напряжение, температуру, уровень, давление и т. д.). В данном случае поддержание скорости движения клейковины в шнековом питателе (рис. 3).

Контроль регулирования рациональной скорости движения клейковины в шнековом питателе возможен путем оценки степени заполнения полостей между стенками приемного бункера и шнекового питателя (рис. 3а). При стабильной работе аппарата с заданными параметрами и обеспечения постоянства расхода данные полости должны быть не заполнены, поэтому посредством датчика (рис. 3б) контролируется заданное расстояние от верхней внутренней поверхности питателя до поверхности материала. В случае изменения заданного расстояния скорость вращения рабочего шнека необходимо либо увеличить, либо уменьшить.

Конструкция датчиков расстояния разработана для реализации двух задач, выполняемых датчиками: максимальная точность измерений и высокая скорость обработки данных при измерениях в диапазоне нескольких миллиметров. В конструкции датчиков расстояния (рис. 3б) используется метод измерения скорости возврата луча. Световой пучок направляется на поверхность тестируемого объекта (источником света может быть, например, лазерный диод). В корпусе датчика установлена оптика приемника, которая принимает отраженные лучи на светочувствительном элементе. В зависимости от положения отраженного луча и известной геометрии определяется расстояние до тестируемого объекта.

Для достижения поставленной цели, а именно расчета эволюции полей скоростей в процессе движения вязкоупругих материалов (клейковины) по каналу фильеры, разработанная математическая модель (4) была решена численным методом конечных разностей [1].

Такой подход к решению задачи выбора рациональных гидродинамических режимов применен ввиду сложности экспериментального определения полей скоростей и трудности аналитического решения системы гидродинамических дифференциальных уравнений Навье-Стокса при переменных коэффициентах пропорциональности [2, 10, 16]. Для численного решения дифференциального уравнения параболического типа в частных производных при заданных начальных и граничных условиях применен метод конечных разностей по неявной схеме [4, 6].

Реализация математической модели (4) выполнена в среде специализированного программного обеспечения Mathcad Professional при установленных режимных параметрах:

– начальная скорость потока сырой клейковины при входе в канал фильеры $w_{нач} = 0,5$ м/с;

– формовочный диск с каналом фильеры диаметром 8 мм и высотой 3 мм;

– начальная температура сырой клейковины $T_{НАЧ} = 272$ K;

– коэффициент динамической вязкости сырой клейковины $\mu_{кл} \approx 5$ Па, с.

Графическая аппроксимация полученных скоростных полей (рис. 4) при рациональных режимах показывает, что распределение w по глубине штранга имеет экстремальный характер [9]. Также отмечены значительные скоростные градиенты в начале движения при их сглаживании в процессе перемеще-

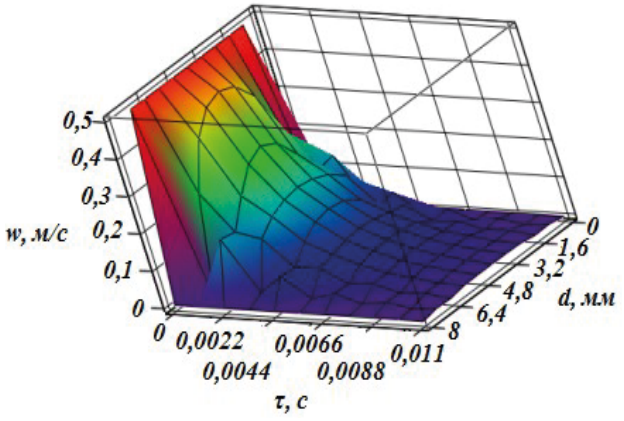

Рисунок 4 – Эволюция полей скоростей в процессе движения вязкоупругих материалов (клейковины) по каналу фильеры

Figure 4 – Evolution of velocity fields in the process of movement of visco-elastic materials (gluten) through the nozzle

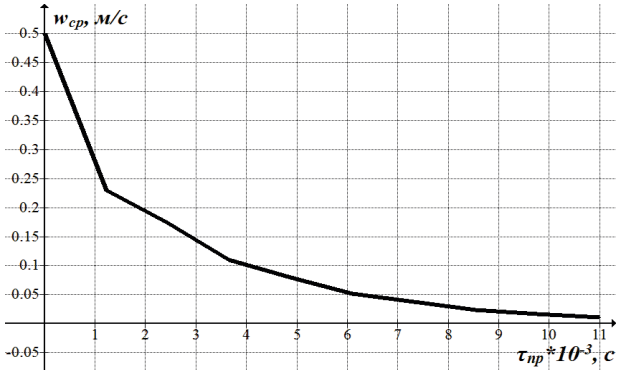

Рисунок 5 – Графическая зависимость $w_{ср}$, м/с от продолжительности процесса движения

Figure 5 – G raphic dependence $w_{ср}$, (m/c) on the duration of the process of movement

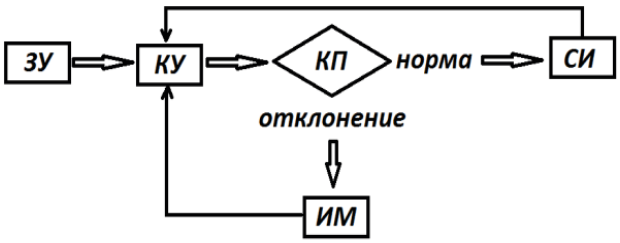

Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма управления

Figure 6 – Control flowchart

ния клейковины по фильере, что подтверждает обоснованность сделанных выводов и допущений.

Для удобства анализа полученной поверхности скоростей (рис. 4) на рисунке 5 представлена графическая зависимость средней объемной скорости $w_{ср}$, м/с от продолжительности процесса формования $\tau_{пр}$, с в канале фильеры шнекового питателя.

На рисунке 6 приведена блок-схема алгоритма управления скорости движения сырой клейковины в шнековом питателе до узла формования с регулируемой величиной: расстояние от верхней внутренней поверхности питателя до поверхности материала. Схема состоит из объекта управления и устройства управления. Объект управления – это основной элемент системы, сырая клейковина, заданный режим движения которой должен поддерживаться устройством управления (оптическим датчиком контроля расстояния) при помощи управляющих (регулирующих) органов. Под управляющим органом подразумевается устройство, обеспечивающие процесс управления, т. е. целенаправленное действие, приводящие к желаемому изменению управляемой переменной. Для уменьшения ошибки регулирования в систему вводят обратную связь.

Задающие устройство (ЗУ) оказывает управляющее воздействие на вход системы, формируя программу изменения регулируемой величины. ЗУ подает сигнал после получения данных с датчика (КУ) и их анализ через контроллер параметра (КП) исполнительному механизму (ИМ) – вариатору, который непосредственно является корректирующим звеном системы.

Выявления соответствий требуемого и полученного значения выполняет сравнивающие устройство (КП). Если величина расстояния не отклоняется от заданного, то через заданный промежуток времени происходит повторный замер сигнала через КУ.

Выводы

Как видно из полученных графических зависимостей (рис. 4, 5), среднеобъемная скорость сырого глютена в начальный период быстро снижается до половины своего первоначального значения, вследствие имеющего местного сопротивления, связанного с резким переходом толщин клейковинного слоя, соответствующими диаметрами питателя и канала фильеры, а затем плавно понижается, что обусловлено его ламинарным движением в канале.

Следует отметить, что рассчитанное среднеобъемное распределение скорости по толщине клейковинного штранга соответствует рекомендованному пороговому его значению на выходе из смесителя, равное 0,011 м/с.

Таким образом, разработанные скоростные режимы прохождения сырой клейковины в канале формования штранга и контроль скорости его перемещения до узла формования в шнековом питателе аппарата могут быть рекомендованы для внедрения в производственную практику.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Алексанян И. Ю. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование / И. Ю. Алексанян, А. А. Буйнов. – Астрахань : АГТУ, 2004. – 380 с.

2. Метод численного решения уравнений Навье-Стокса в переменных скорость–давление / Е. В. Бруяцкий, А. Г. Костин, Е. И. Никифорович [и др.] // Прикладна гідромеханіка. – 2008. – Т. 10, № 2. – С. 13–23.

3. Ванин, С. В. Функциональные свойства сухой пшеничной клейковины разного качества / С. В. Ванин, В. В. Колпакова // Известия вузов. Пищевая технология. – 2007. – Т. 296, № 1. – С. 21–24.

4. Ананьев, П. А. Исследование корректности краевых задач для уравнений Навье-Стокса в естественных переменных / П. А. Ананьев, П. К. Волков, А. В. Переверзев // Математическое моделирование. – 2004. – Т. 16, № 7. – С. 68–76.

5. ГОСТ 31934-2012. Глютен пшеничный. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2013.

6. Демидович, Б. П. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. – СПБ : Лань, 2010. – 400 с.

7. Волков, П. К. О природе движения жидкостей / П. К. Волков // Вестник Югорского государственного университета. – 2011. – Т. 21, № 2. – С. 8–28.

8. Лапчик, М. П. Элементы численных методов / М. П. Лапчик, М. И. Рагулина, Е. К. Хеннер. – М. : Академия, 2007. – 224 с.

9. Исследование физико-химических свойств рыбных фаршей, сухих растительных премиксов и их смесей / А. Х.-Х. Нугманов, Ю. А. Максименко, А. И. Алексанян [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2018. – № 2. – С. 135–148. DOI: https://doi.org/10.24143/2073-5529-2018-2-135-148.

10. Маркин, Е. Е. Решение полной системы уравнений навье стокса с распараллеливанием процесса вычислений / Е. Е. Маркин, П. П. Скачков // Международный студенческий научный вестник. – 2017. – № 2. – С. 70–78.

11. Понтрягин, Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Л. С. Понтрягин. – М. : Ленанд, 2019. – 336 с.

12. Шхалахов, Д. С. Использование растительных белков в мясной промышленности посредством добавления белковожировой эмульсии / Д. С. Шхалахов, А. А. Нестеренко // Молодой ученый. – 2016. – Т. 127, № 23. – С. 109–111.

13. Wang, Z. J. High-order methods for the Euler and Navier-Stokes equations on unstructured grids / Z. J. Wang // Progress in Aerospace Sciences. – 2007. – Vol. 43, № 1–3. – P. 1–41. DOI: https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2007.05.001.

14. Wang, L. Adjoint-based h-p adaptive Discontinuous Galerkin methods for the compressible Euler equations / L. Wang, D. J. Mavriplis // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. – Orlando, USA, 2009.

15. An immersed interface method for solving incompressible viscous flows with piecewise constant viscosity across a moving elastic membrane / Z. Tan, D. V. Le, Z. Li [et al.] // Journal of Computational Physics. – 2008. – Vol. 227, № 23. – P. 9955–9983. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcp.2008.08.013.

16. Powell, C. E. Preconditioning Steady-State Navier--Stokes Equations with Random Data / C. E. Powell, D. J. Silvester // SIAM Journal on Scientific Computing. – 2012. – Vol. 34, № 5. – P. A2482–A2506. DOI: https://doi.org/10.1137/120870578.

References

1. Aleksanyan IYu, Buynov AA. Vysokointensivnaya sushka pishchevykh produktov. Penosushka. Teoriya. Praktika. Modelirovanie [High-intensity food drying. Foam drying. Theory. Practice. Modeling]. Astrakhan: Astrakhan State Technical University; 2004. 380 p. (In Russ.).

2. Bruyatskiy EV, Kostin AG, Nikiforovich EI, Rozumnyuk NV. Metod chislennogo resheniya uravneniy Nav′e-Stoksa v peremennykh skorost′–davlenie [Numerical solution method of the Navier-Stokes equations in velocity – pressure variables]. Prikladna gidromekhanika [Applied Hydromechanics]. 2008;10(2):13–23. (In Russ.).

3. Vanin SV, Kolpakova VV. Funktsional′nye svoystva sukhoy pshenichnoy kleykoviny raznogo kachestva [Functional properties of dry wheat gluten of different quality]. News of Institutes of higher education. Food Technology. 2007;296(1):21–24. (In Russ.).

4. Anan′ev PA, Volkov PK, Pereverzev AV. Issledovanie korrektnosti kraevykh zadach dlya uravneniy Nav′e-Stoksa v estestvennykh peremennykh [Correctness of boundary value problems for the Navier-Stokes equations in natural variables]. Mathematical Models and Computer Simulations. 2004;16(7):68–76. (In Russ.).

5. State Standard 31934-2012. Wheat gluten. Specifications. Moscow: Standartiform; 2013.

6. Demidovich BP, Maron IA, Shuvalova EhZ. Chislennye metody analiza. Priblizhenie funktsiy, differentsial′nye i integral′nye uravneniya [Numerical analysis methods. Approximation of functions, differential and integral equations]. St. Petersburg: Lan; 2010. 400 p. (In Russ.).

7. Volkov PK. On the source of motion of liquids. Yugra State University Bulletin. 2011;21(2):8–28. (In Russ.).

8. Lapchik MP, Ragulina MI, Khenner EK. Ehlementy chislennykh metodov [Elements of numerical methods]. Moscow: Akademia; 2007. 224 p. (In Russ.).

9. Nugmanov AH-H, Maximenko YuA, Aleksanian AI, Aleksanian OA. Investigation of physical and chemical properties of minced fish, dry vegetable premixes and their mixtures. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. 2018;(2):135–148. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24143/2073-5529-2018-2-135-148.

10. Markin EE, Skachkov PP. Solution of the navier stokes complete system of equations with parallelization of the computation process. European Student Scientific Journal. 2017;(2):70–78. (In Russ.).

11. Pontryagin LS. Obyknovennye differentsial′nye uravneniya [Ordinary differential equations]. Moscow: Lenand; 2019. 336 p. (In Russ.).

12. Shkhalakhov DS, Nesterenko AA. Ispol′zovanie rastitel′nykh belkov v myasnoy promyshlennosti posredstvom dobavleniya belkovozhirovoy ehmul′sii [Use of vegetable proteins in meat industry by adding a protein-fat emulsion]. Young Scientist. 2016;127(23):109–111. (In Russ.).

13. Wang ZJ. High-order methods for the Euler and Navier-Stokes equations on unstructured grids. Progress in Aerospace Sciences. 2007;43(1–3):1–41. DOI: https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2007.05.001.

14. Wang L, Mavriplis DJ. Adjoint-based h-p adaptive Discontinuous Galerkin methods for the compressible Euler equations. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition; 2009; Orlando, USA. Orlando, USA, 2009.

15. Tan Z, Le DV, Li Z, Lim KM, Khoo BC. An immersed interface method for solving incompressible viscous flows with piecewise constant viscosity across a moving elastic membrane. Journal of Computational Physics. 2008;227(23):9955–9983. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcp.2008.08.013.

16. Powell CE, Silvester DJ. Preconditioning Steady-State Navier--Stokes Equations with Random Data. SIAM Journal on Scientific Computing. 2012;34(5):A2482–A2506. DOI: https://doi.org/10.1137/120870578.

Фоменко Екатерина Валерьевна
аспирант кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, тел.: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: albert909@yandex.ru

Нугманов Альберт Хамед-Харисович
д-р техн. наук, профессор кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, тел.: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: albert909@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-4093-9982

Ekaterina V. Fomenko
Graduate student of the Department of Technological Machines and Machinery, Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russia, phone: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: albert909@yandex.ru

Albert H.-H. Nugmanov
Dr.Sci.(Eng.), Professor of the Department of Technological Machines and Machinery, Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russia, phone: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: albert909@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-4093-9982