

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ ВНУТРИ СТВОЛА ТЕРМОВАКУУМНОГО ЭКСТРУДЕРА

Курочкин Анатолий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые производства»

Фролов Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые производства»

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»
440039, г. Пенза, проезд Байдукова, ул. Гагарина, 1а/11; тел.: 8(8412)49-56-99;
e-mail: anatolij_kuro@mail.ru

Ключевые слова: экструдер, энергоэффективность, термовакуумная экструзия, моделирование, тепломассоперенос, крахмал, температура, давление.

Выполнено численное моделирование транспортных процессов, протекающих в одношнековом экструдере при переработке кукурузного крахмала и характерных для поведения неньютоновских жидкостей. Исследование направлено, в основном, на моделирование тепломассопереноса внутри винтового канала для вязкой жидкости. Изученная модель применяется в конструктивно-технологической схеме термовакуумного экструдера, где в качестве вещества для массового обмена взята вода. Вычисления конечных разностей выполнены для решения основной системы дифференциальных уравнений в частных производных для полей скорости и температуры в широком диапазоне определяющих параметров, в том числе с учетом изменения вязкости экструдруемого материала в зависимости от его температуры и влажности. Изложен основной физический подход к моделированию сложных процессов тепломассопереноса, причем реактивная природа пищевых компонентов принята во внимание путем учета скорости реакции (желатинизации) между влагой и крахмалом. Результаты представлены в виде контуров скорости, температуры и давления. Обнаружено, что для типичных условий эксплуатации экструдера возникают сильные эффекты вязкой диссипации. Влияние различных определяющих параметров на повышение давления в канале экструдера определено и обсуждено с точки зрения лежащих в основе физических процессов. Проведена экспериментальная проверка некоторых численных результатов.

Введение

Экструзионная обработка в последние годы стала важной операцией в пищевой промышленности, где сырые пищевые ингредиенты подвергают сдвигу и воздействию высоких температур. Это приводит к смешиванию и химическим реакциям, составляющим процесс приготовления пищи. Типичный одношнековый экструдер можно разделить на три секции, как показано на рис. 1.

Термовакуумный эффект в технологии экструзии пищевого сырья улучшает рабочий процесс и обеспечивает нужный коэффициент взрыва экструдата при меньших давлении и температуре [1, 2]. На рисунках 2 и 3 изображены термовакуумный экструдер и его шнек, разработанные авторами на основе модернизации одношнекового экструдера ЭК-40. Ранее выполненные исследования свидетельствуют о влиянии различных переменных процесса экструзии

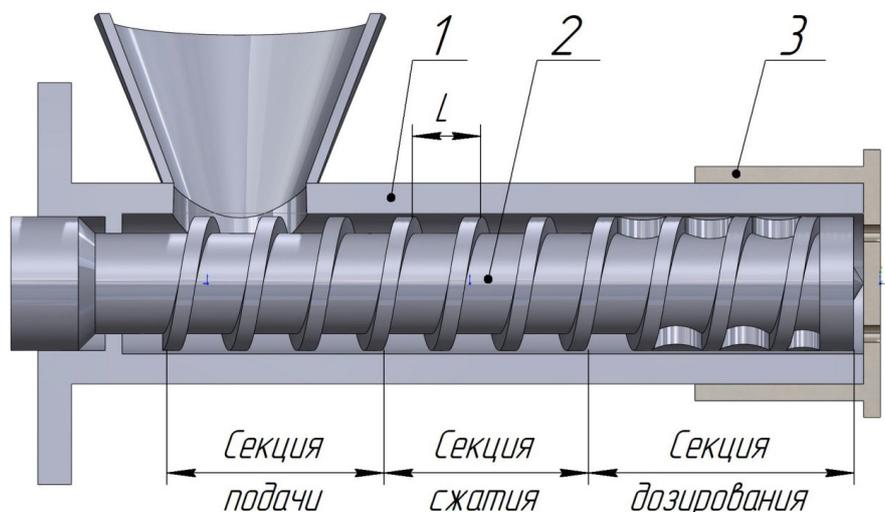


Рис. 1 – Схема типичного одношнекового экструдера: 1 – ствол; 2 – шнек; 3 – матрица

и конфигурации этого экструдера на свойства композитных смесей экструдатов [3 - 16].

Ряд исследователей изучали течение полимеров в рабочих секциях экструдера, применяя различные численные или аналитические методы [17, 18]. В этих работах изучен температурный профиль, формирующийся по длине винтового канала, а также вариант, при котором температура обрабатываемого сырья изменяется вдоль канала шнека. Численные результаты по течению и теплообмену полимерных материалов в одношнековых экструдерах с адиабатическим граничным условием на шнеке представлены в работе [5]. В ней показано, что производительность экструдера существенно влияет на поле течения и распределение температуры, а диссипация вязкости играет важную роль в данном процессе и приводит к передаче теплоты от жидкости к стенке цилиндра. Количество теплоты зависит от используемых материалов и условий эксплуатации.

С другой стороны, лишь ограниченное число исследований посвящено изучению реального потока обрабатываемых материалов в одношнековом экструдере. Таким образом, для целей данного моделирования предполагается использовать вязкий материал степенного типа с переменной вязкостью. В связи с этим было рассмотрено течение биополимеров в экструдере.

Приведенный выше краткий обзор соответствующей литературы указывает на необходимость широкого подхода к моделированию комбинированных эффектов течения, тепло- и массопереноса при экструзии.

Целью работы является исследование скорости потока сырья и теплообмена внутри винтового канала модернизированного термовакуумного экструдера с последующей проверкой его работоспособности.

Задачей исследования является численный анализ теплообмена и нахождение полей течения материала в канале ствола экструдера путем компьютерного моделирования.

Материалы и методы исследований

Упрощенная геометрия одношнекового экструдера и поперечное сечение канала шнека показаны на рис. 4. Для простоты визуализации и анализа система координат закреплена за началом шнека. Для моделируемой неглубокой измерительной секции эффектами кривизны пренебрегли, в результате чего получается прямоугольная расчетная область, показанная на рис. 5.



Рис. 2 – Общий вид термовакуумного экструдера



Рис. 3 – Шнек модернизированного термовакуумного экструдера

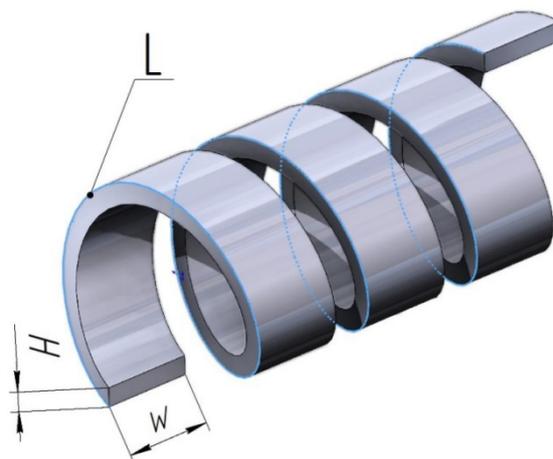


Рис. 4 – Схема канала шнека: W, H и L – ширина, глубина и длина канала соответственно

При выводе основных уравнений для упрощения расчетов сделаны следующие предположения:

- 1) кривизна винтового канала мала, что

позволяет «раскрыть» спираль канала, чтобы получить более простую геометрию для облегчения вычислений;

2) профиль шнека прямоугольный, а ширина его канала W намного больше глубины H ;

3) для режима течения с высокой вязкостью, рассматриваемого здесь для типичных пищевых материалов, число Рейнольдса равно 0,0002, что показывает, что инерционные условия пренебрежимо малы по сравнению с вязкими условиями;

4) обратный поток в поперечном сечении канала очень ограничен, а характеристика потока материала внутри экструдера связана с наличием головки на конце канала;

5) зазор между витком шнека и стволом считается достаточным, чтобы можно было пренебречь утечкой материала по виткам из одного канала шнека в соседний;

6) диффузия влаги в пищевой материал и ее поглощение за счет кластеризации моделируется как реакция нулевого порядка.

Для устойчивого развивающегося двумерного потока однородной жидкости в одношнековом экструдере с неглубоким каналом, т.е. где $H \ll W$, можно пренебречь инерционными членами в направлениях x и z . При этом уравнения сохранения импульса принимают вид:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} \quad (1)$$

где p – местное давление, Па; τ – напряжение сдвига, Па; x , y и z – текущие координаты, м.

Приближение вязкого течения справедливо, потому что инерционные члены малы по сравнению с другими членами для небольших чисел Рейнольдса (обычно менее 0,001), которые характерны для высоковязкого течения пищевых материалов. Для этого случая уравнение энергии принимает вид:

$$\rho C w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2)$$

где ρ – плотность, кг/м³; C – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); w – составляющая скорости в направлении z , м/с; T – температура, К; k – теплопроводность жидкости, Вт/(м·К).

Касательные напряжения τ_{yx} и τ_{yz} определим из выражений:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \tau_{yz} = \mu \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (3)$$

где μ – динамическая вязкость материала, Па·с; u – компонента скорости в направлении x , м/с.

Для неньютоновских жидкостей μ является функцией скорости деформации $\dot{\gamma}$.

В данном исследовании предполагается использовать модель степенного закона. Основное уравнение для вязкости крахмальных материалов можно записать как

$$\mu = \mu_0 (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_0)^{(n-1)} \exp(b/T) \exp(-B_m C_m) \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = \left[(\partial u / \partial y)^2 + (\partial w / \partial y)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

где μ_0 – эталонная динамическая вязкость, Па·с; $\dot{\gamma}_0$ – эталонная скорость деформации, с⁻¹; b – температурный коэффициент вязкости по Аррениусу; B_m – коэффициент концентрации влаги; C_m – концентрация влаги, г/м³; n – индекс степенного закона.

Нижний индекс «0» в формуле (5) обозначает исходные условия.

Уравнение диффузии массы также необходимо учитывать в дополнение к уравнениям неразрывности, импульса и энергии для пищевых систем. С учетом этого запишем уравнение массообмена:

$$w \frac{\partial c_m}{\partial z} = \frac{\partial^2 c_m}{\partial y^2} + S' (c_m)^m, \quad S' = 0 \text{ для } T < T_{\text{gel}}, \quad (6)$$

где S' – скорость реакции, моль·м⁻³·с⁻¹; T_{gel} – температура начала желатинизации, К.

Сложные структурные изменения, происходящие во время клейстеризации пищевого материала, приводят к потере свободной влаги со скоростью, которая зависит от преобладающей концентрации влаги, скорости сдвига и температуры.

Для проведения численного моделирования и расчета полей скорости и теплопередачи был использовано программное обеспечение COMSOL Multiphysics. Для расчета полей скорости был использован модуль Creeping Flow («ползучий» поток). «Ползучий» поток описывает течение жидкости, в котором инерция незначительна. В жидкостях «ползучий» поток представляет собой ламинарный тип вязкого течения, в котором линии тока параллельны друг другу, и скорость течения очень мала. «Ползу-

чий» поток в жидкости может быть математически выражен с помощью уравнения Навье-Стокса. Для этого случая левые члены уравнения Навье-Стокса, определяющие скорость изменения количества движения жидкости, не учитывают.

Теплопередачу рассчитывали в модуле Heat Transfer in Fluids (теплопередача в твердых телах и жидкостях). Его используют для моделирования теплопередачи в твердых телах и жидкостях путем теплопроводности, конвекции и излучения.

Граничные условия задаются, как показано на рис. 5.

Для расчета полей скорости был использован соответствующий модуль, далее на основе выполненного расчета с помощью интерфейса «теплопередача в твердых телах и жидкостях» были рассчитаны тепловые показатели. В качестве материала жидкой фазы был взят раствор кукурузного крахмала в воде с концентрацией крахмала 30 %.

Неньютоновская жидкость была смоделирована с помощью степенного закона с учетом его индекса и коэффициента вязкости материала, зависящего от температуры.

Для упрощения опыта было проведено двумерное моделирование. Для повышения наглядности канал шнека по оси ординат был масштабирован.

Для расчета физических явлений была создана физически контролируемая сетка с нормальным размером элемента, учитывающая интерфейсы ползучего потока, теплопередачу в телах и неизотермические потоки. Исследование было проведено во временной области от 0 с до 100 с с интервалом 1 с.

Результаты исследования

Безразмерные уравнения решены методом конечных разностей. Расчеты проводили на сетке с размером 1360x5 мм. Результаты пред-

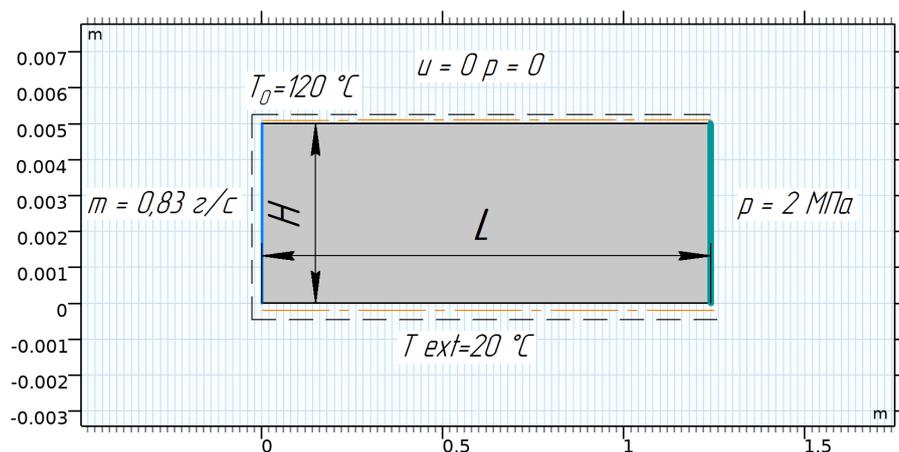


Рис. 5 – Начальные и граничные условия: H – высота канала шнека, L – длина канала

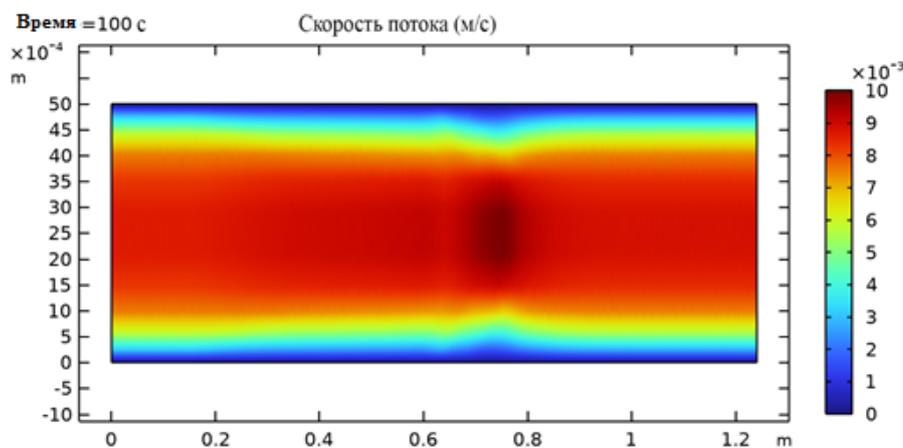


Рис. 6 – Распределение скорости потока по длине канала

ставлены в виде распределений скорости и температуры по винтовому каналу, а также по глубине канала (рис. 6).

Градиент температуры dT/dy у ствола выше, чем у основания шнека, потому что теплота, выделяемая за счет вязкой диссипации, отводится от ствола в окружающую среду, тогда как основание шнека участвует в адиабатическом процессе. Однородность свойств продукта очень важна при термической обработке чувствительных к температуре неньютоновских материалов. О наличии и расположении горячих точек в материале можно судить по возникновению больших температурных градиентов вблизи источника горячих точек. Таким образом, форма изотерм и расстояние между ними могут служить ориентиром при проектировании экструдеров, чтобы избежать таких изолированных горячих областей.

Безразмерная скорость в нисходящем канале равна нулю у основания шнека и единице у ствола для рассмотренной постановки задачи.

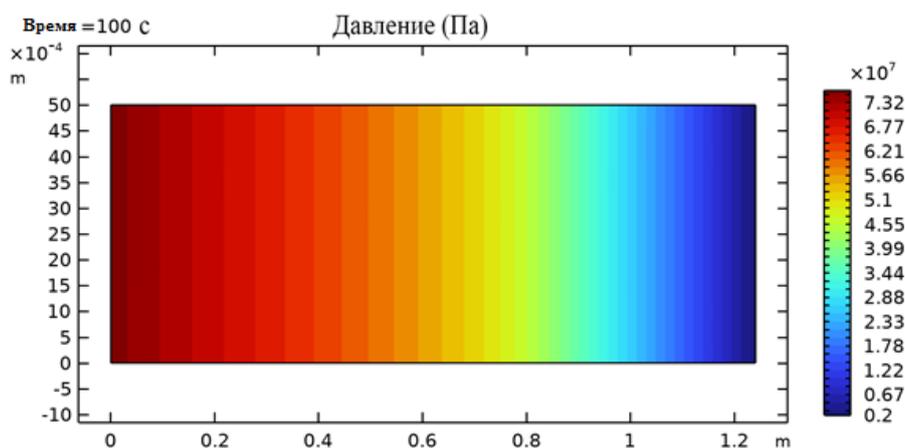


Рис. 7 – Распределение давления по длине канала

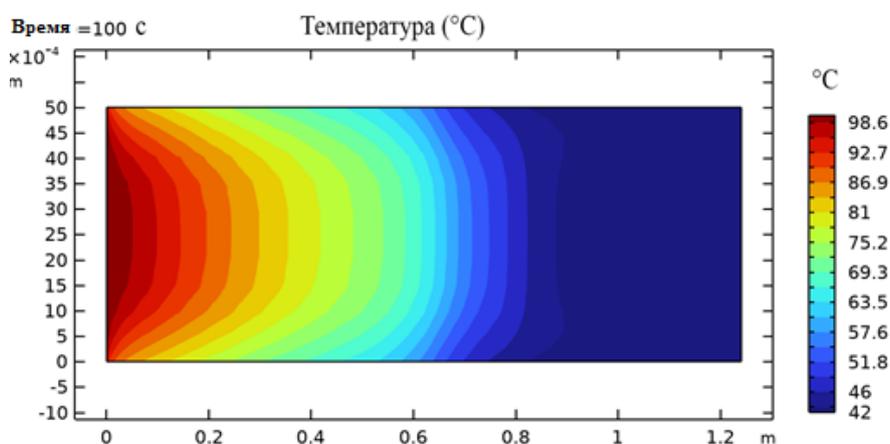


Рис. 8 – Распределение температуры по длине канала

Вклад вязкой диссипации все еще достаточно велик, но температура не достигает высоких значений из-за большого расхода материала. Можно также отметить, что более медленно перемещающаяся жидкость вблизи основания шнека нагревается до более высоких температур, чем жидкость вблизи ствола из-за ее вязкости.

Две переменные, определяющие вязкость материала, т. е. температура и концентрация влаги, действуют в противоположных направлениях по мере нагревания материала, который теряет влагу из-за желатинизации. Основание шнека становится более горячим, чем стенка ствола для условий, показанных на рисунке, и это приводит к желатинизации в первую очередь вблизи шнека.

Как только концентрация влаги резко снижается, вязкость материала регулируется величиной этого снижения из-за повышения температуры. Распределение концентрации влаги и развитие давления вниз основано на обычных процессах переноса, но с переменной вязкостью

и неравномерной влажностью материала по глубине канала. Давление в конце экструдера и количество исходной влаги, оставшейся после экструзии, зависят от места, в котором начинается реакция.

Изменение градиента давления по потоку (рис. 7) в зависимости от длины канала показывает, что имеется перегиб в точке, где впервые происходит желатинизация.

Однако это увеличение значения dp/dz недостаточно сильное, чтобы противодействовать температурному эффекту, который вызывает снижение вязкости и таким образом облегчает течение материала, снижая рост давления. При этом давление поднимается от бункера к фильере вдоль винтовой спирали.

На рисунке 8 показано распределение температуры по длине канала. Для неньютоновских жидкостей

вязкость уменьшается с увеличением скорости сдвига.

Обсуждение

Подход, который использовался при моделировании скорости и теплообмена внутри винтового канала модернизированного термовакуумного экструдера, в целом согласуется с методиками исследований теплофизических исследований других авторов [4, 5, 6]. Похожие конфигурации шнека приводили к аналогичным распределениям температуры, давления и скорости потока в канале экструдера при экструзии пшеничных отрубей [10].

Как и ожидалось, температура материала непрерывно увеличивается от бункера к матрице. Температура материала выше температуры ствола, поэтому теплота передается от материала к стенке ствола, и, следовательно, необходимо охлаждать ствол в секциях, близких к матрице. В отличие от исследований авторов [19], которыми был получен ряд похожих результатов, нами получен диапазон изменения давления по длине канала экструдера.

Как показано на рис. 9, меньшее значение объемного расхода, соответствующее большему ограничению потока в конце секции дозирования, приводит к большему повышению давления.

Это связано с тем, что баланс между повышением давления при протекании материала через канал экструдера и снижением давления из-за снижения вязкости не поддерживается. Если скорость потока увеличивается, давление в конце секции дозирования снижается еще больше. Следовательно, существует значение пропускной способности, при превышении которого не достигается желаемое качество материала. Это предельное значение зависит от конкретных условий течения, например, от степенного показателя и коэффициентов вязкости.

Полученные выше численные результаты были подтверждены экспериментальными данными. Эксперименты проводили на модернизированном одношнековом экструдере.

Заключение

При численном моделировании явлений переноса, возникающих при течении раствора кукурузного крахмала через одношнековый экструдер, установлено, что при значительной диссипации вязкости внутри материала, его температура поднимается выше заданной температуры ствола на 100 %, а температура материала на выходе из фильеры увеличивается почти на 200 %. Удаление влаги и связывание обрабатываемого материала за счет реакции желатинизации (при ее высокой скорости) происходит первоначально у основания шнека экструдера. Этот процесс осуществляется на очень коротком расстоянии от входа, вдоль канала экструдера, что приводит к резким изменениям вязкости в данной области. Давление материала в конце экструдера существенно зависит от его пропускной способности и при превышении ее предельного значения указанный параметр может фактически уменьшаться от бункера к концу секции дозирования, что выдвигает требование к постоянству потока материала, прокачиваемого через экструдер.

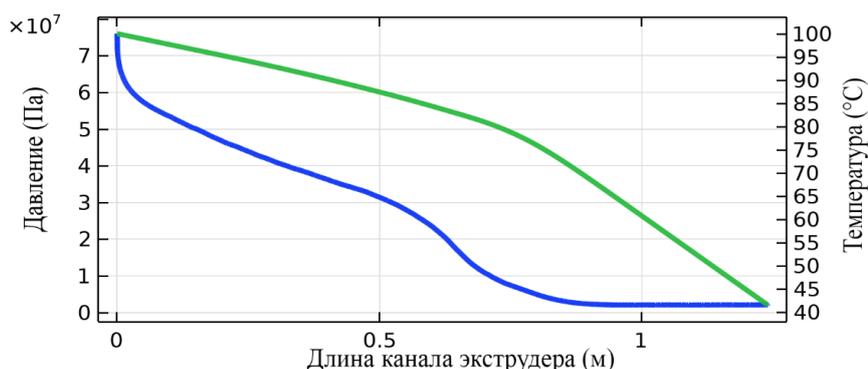


Рис. 9 – Изменение давления и температуры вблизи ствола по длине канала

Библиографический список

1. Potapov, M. A. Equalization of the moisture content of the mixture for obtaining fertilizers from high-moisture waste of poultry farming by extrusion / M. A. Potapov, A. A. Kurochkin, D. I. Frolov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. - 2020. - Vol. 1001. - P. 012029.
2. Технология вакуумно-импульсного экстрагирования растворимых веществ из крапивы и хмеля / А. А. Гуськов [и др.] // Инновационная техника и технология. - 2018. - № 2(15). - С. 23–27.
3. Экструдаты из растительного сырья с повышенным содержанием липидов и пищевых волокон / А. А. Курочкин, П. К. Воронина, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов // Техника и технология пищевых производств. - 2016. - № 3(42). - С. 104–111.
4. Numerical optimization of process parameters of ready-to-eat (RTE) iron rich extruded snacks for anemic population / S. Suri [et al.] // LWT. - 2020. - Vol. 134. - P. 110164.
5. Sahu, C. Moisture sorption characteristics and quality changes during storage in defatted soy incorporated maize-millet based extruded product / C. Sahu, S. Patel // LWT. - 2020. - Vol. 133. - P. 110153.
6. Effects of extrusion variables on corn-mango peel extrudates properties, torque and moisture loss / M. M. Mazlan, R. A. Talib, N. F. Mail [et al.] // International Journal of Food Properties. - 2019. - Vol. 22, No 1. - P. 54-70. - DOI: 10.1080/10942912.2019.1568458.
7. Single-pass, double-pass and acid twin-screw extrusion-cooking impact physicochemical and nutrition-related properties of wheat bran / C. Roye [et al.] // Innovative Food Science & Emerging Technologies. - 2020. - Vol. 66. - P. 102520.
8. Extruded whole grain flours and sprout millet as functional ingredients for gluten-free bread / R. Comettant-Rabanal [et al.] // LWT. - 2021. - Vol. 150. - P. 112042.
9. Morley, M. J. Modelling the thermal conductivity of starch-water gels / M. J. Morley, C.

A. Miles // Journal of Food Engineering. - 1997. - Vol. 33, № 1. - P. 1–14.

10. Extrusion-Cooking Modifies Physicochemical and Nutrition-Related Properties of Wheat Bran / C. Roye [et al.] // Foods. - 2020. - Vol. 9, № 6. - P. 738.

11. Фролов, Д. И. Анализ влияния температуры матрицы и влажности сырья на крутящий момент двигателя экструдера / Д. И. Фролов, М. В. Долгов // Инновационная техника и технология. - 2020. - № 4(25). - С. 40–45.

12. Королев, А. А. Разработка технологии экстрадированных поликомпонентных пищевых концентратов / А. А. Королев, Л. Я. Корнева, И. С. Коптяева // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. - 2017. - № 8(8). - С. 235–244.

13. Kurochkin, A. A. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber / A. A. Kurochkin, D. I. Frolov, V. M. Zimnyakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2021. - Vol. 640, № 7. - P. 072018.

14. Macià, L. Simulation of ejector for vacuum generation / L. Macià, R. Castilla, P. Gamez-Montero

// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - Vol. 659. - P. 012002.

15. Mohammadi, A. An investigation of geometrical factors of multi-stage steam ejectors for air suction / A. Mohammadi // Energy. - 2019. - Vol. 186. - P. 115808.

16. Frolov, D. I. Nonlinear analysis of dynamic loads of the model haulm removing working body / D. I. Frolov, A. A. Kurochkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2020. - Vol. 422. - P. 012123.

17. Frolov, D. I. Numerical Simulation of the Working Bodies of the Machine for Removing the Tops of Vegetable Crops / D. I. Frolov, A. A. Kurochkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2021. - Vol. 720, № 1. - P. 012028.

18. Численное моделирование температурных полей в полимерном композите / Е. Г. Чигринец, С. Б. Родригес, Д. И. Заболотный, С. К. Чотчаева // Труды МАИ. - 2021. - № 116. - С. 17.

19. Jaluria, Y. Heat and mass transfer in the extrusion of non-Newtonian materials / Y. Jaluria // Advances in heat transfer. – Elsevier, 1996. – Vol. 28. – P. 145-230.

SIMULATION OF TRANSPORT PROCESSES INSIDE THE BORE OF THERMAL VACUUM EXTRUDER

Kurochkin A. A., Frolov D. I.

FSBEI HE "Penza State Technological University"

440039, Penza, Baidukova dr. / Gagarina st., 1a/11; tel.: 8(8412)49-56-99;

e-mail: anatolii_kuro@mail.ru

Keywords: extruder, energy efficiency, thermal vacuum extrusion, modeling, heat and mass transfer, starch, temperature, pressure.

Numerical modeling of transport processes occurring in a single-screw extruder during processing of corn starch and typical for the behavior of non-Newtonian liquids was performed. The study is mainly aimed at modeling heat and mass transfer inside a screw channel for a viscous fluid. The studied model is used in design and technological scheme of a thermal vacuum extruder, where water is taken as a substance for mass exchange. Finite difference calculations are performed to solve the main system of partial differential equations for velocity and temperature fields in a wide range of determining parameters, also taking into account changes in the viscosity of the extruded material depending on its temperature and humidity. A basic physical approach to modeling of complex heat and mass transfer processes is outlined, the reactive nature of food components taken into account by the rate of reaction (gelatinization) between moisture and starch. The results are presented as velocity, temperature and pressure contours. It was found that strong viscous dissipation effects occur for typical extruder operating conditions. The influence of various determining parameters on pressure increase in the extruder bore is determined and discussed in terms of the underlying physical processes. An experimental verification of some numerical results was carried out.

Bibliography:

1. Potapov, M.A. Equalization of the moisture content of the mixture for obtaining fertilizers from high-moisture waste of poultry farming by extrusion / M.A. Potapov, A.A. Kurochkin D.I. Frolov // IOP Conf. Ser.: Mater. sci. Eng. 2020. V. 1001. P. 012029.

2. Technology of vacuum-pulse extraction of soluble substances from nettles and hops / A.A. Guskov [et al.] // Innovative equipment and technology. 2018. № 2 (15). P. 23–27.

3. Extrudates from plant raw materials with a high content of lipids and dietary fiber / A.A. Kurochkin, P.K. Voronina, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // Machinery and technology of food production. 2016. № 3 (42). P. 104–111.

4. Numerical optimization of process parameters of ready-to-eat (RTE) iron rich extruded snacks for anemic population / S. Suri [et al.] // LWT. 2020. Vol. 134. P. 110164.

5. Sahu, C. Moisture sorption characteristics and quality changes during storage in defatted soy incorporated maize-millet based extruded product / C. Sahu, S. Patel // LWT. 2020. Vol. 133. P. 110153.

6. Effects of extrusion variables on corn-mango peel extrudates properties, torque and moisture loss / M.M. Mazlan, R.A. Talib, N.F. Mail [et al.] // International Journal of Food Properties. - 2019. - Vol. 22, № 1. - P. 54-70. DOI: 10.1080/10942912.2019.1568458.

7. Single-pass, double-pass and acid twin-screw extrusion-cooking impact physicochemical and nutrition-related properties of wheat bran / C. Roye [et al.] // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. Vol. 66. P. 102520.

8. Extruded whole grain flours and sprout millet as functional ingredients for gluten-free bread / R. Comettant-Rabanal [et al.] // LWT. 2021. Vol. 150. P. 112042.

9. Morley M.J., Miles C.A. Modeling the thermal conductivity of starch-water gels / M.J. Morley, C.A. Miles // Journal of Food Engineering. 1997 Vol. 33. № 1. P. 1–14. EDN.

10. Extrusion-Cooking Modifies Physicochemical and Nutrition-Related Properties of Wheat Bran / C. Roye [et al.] // Foods. 2020. Vol. 9. № 6. P. 738.

11. Frolov, D.I. Analysis of the influence of matrix temperature and raw material humidity on the torque of the extruder motor / D.I. Frolov, M.V. Dolgov // Innovative machinery and technology. 2020. № 4 (25). P. 40–45. EDN GMAHSO.

12. Korolev, A.A. Development of technology for extruded polycomponent food concentrates / A.A. Korolev, L.Ya. Korneva, I.S. Koptyaeva // Innovative

technologies for production and storage of material assets for state needs. - 2017. - № 8 (8). P. 235–244.

13. Kurochkin, A.A. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber / A.A. Kurochkin, D.I. Frolov, V.M. Zimnyakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 640. № 7. P. 072018.

14. Macià, L. Simulation of ejector for vacuum generation / L. Macià, R. Castilla, P. Gamez-Montero // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. T. 659. P. 012002.

16. Mohammadi, A. An investigation of geometrical factors of multi-stage steam ejectors for air suction / A. Mohammadi // Energy. 2019. T. 186. P. 115808.

16. Frolov, D.I. Nonlinear analysis of dynamic loads of the model haulm removing working body / D.I. Frolov, A.A. Kurochkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 422. P. 012123.

17. Frolov, D.I. Numerical Simulation of the Working Bodies of the Machine for Removing the Tops of Vegetable Crops / D.I. Frolov, A.A. Kurochkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 720. № 1. P. 012028.

18. Numerical modeling of temperature fields in a polymer composite / E.G. Chigrinets, S.B. Rodriguez, D.I. Zabolotnyi, S.K. Chotchaeva // Proceedings of MAI. 2021. № 116. P. 17. EDN VWQQCW.

19. Jaluria, Y. Heat and mass transfer in the extrusion of non-Newtonian materials / Y. Jaluria // Advances in heat transfer. – Elsevier, 1996. – V. 28. – P. 145-230.