

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПИЩЕВОЙ ЭКСТРУЗИИ**

Фролов Д.И.

Развитие новых процессов и материалов помогает, помимо классического экспериментального подхода, использовать теоретические модели, способные предоставлять информацию об условиях процесса и их влиянии на характеристики продукта. В этой статье обсуждается подход к моделированию пищевой экструзии, основанный на разработке эффективных и детерминированных моделей с применением механики сплошных сред.

**Ключевые слова:** моделирование пищевой экструзии, механика сплошных сред, экструдер, пищевая промышленность, энергетический баланс.

**Введение**

Развитие новых процессов и материалов помогает, помимо классического экспериментального подхода, использовать теоретические модели, способные предоставлять информацию об условиях процесса и их влиянии на характеристики продукта. Вместо длительных и утомительных процедур проб и ошибок моделирование процессов может быстро помочь избежать несоответствующих решений и сосредоточиться на важных событиях.

Моделирование процессов может представлять различные аспекты и требует для этого разных методов. В области экструзии пищевых продуктов широко используется моделирование поверхности отклика (МПО) и планирование эксперимента для корреляции температуры продукта  $T_p$  и удельной механической энергии (УМЭ) с функциональными свойствами экструдированного крахмала. Этот подход показал, что  $T_p$  и УМЭ являются важными переменными процесса экструзии, но количество требуемых экспериментов растет экспоненциально с количеством изученных параметров, а справедливость полиномиальных моделей ограничена экспериментальной областью, поэтому ее вряд ли можно использовать для промышленного дизайна продукта.

Несмотря на эти недостатки, подход МПО очень популярен, главным образом из-за его простоты, и результаты очень часто встречаются в современной литературе [1, 5, 7, 8]. Эти работы обычно приводят к ожидаемым результатам для продуктов различного состава, но подход с трудом справляется с основными механизмами, регулирующими изменение продукта в процессе переработки, и ограничивается одним лишь экспериментальным подходом [2, 3, 4, 6, 9, 10]. Между тем, модели, основанные на химическом инженерном подходе, путем подгонки кривых распределения времени пребывания (РМП), описывали экструдер как сборку различных химических реакторов. Этот метод обычно обеспечивает ограниченное количество ин-

формации, поскольку в основном показано, что он в основном зависит от скорости вращения шнека, геометрии шнека и скорости подачи, но не от температуры или содержания воды, которые хорошо известны своей важностью для структурных изменений биополимеров. Кроме того, для этого требуется ряд регулируемых параметров (например, тип и число реакторов), что ограничивает их потенциал с точки зрения прогнозирования или экстраполяции.

Используя измерения РМП и УМЭ, изменения небольших компонентов могут быть предсказаны простыми моделями, в которых коррелирует термомеханическая энергия с сохранением тиамин в экструдированных продуктах. Также существует моделирование процессов на основе экспертных систем и нейронных сетей. Эти подходы, в которых модели постепенно улучшаются с опытом, в основном полезны для управления технологическими процессами, например, для того чтобы контролировать вращающий момент и УМЭ двухшнекового экструдера с помощью скорости вращения шнека и подачи воды.

На самом деле наиболее подходящим подходом для разработки эффективных и детерминированных моделей является вывод уравнений, основанных на механике сплошных сред. Эти уравнения, как правило, представляют собой балансы массы и теплообмена, дополненные определяющим уравнением, описывающим реологическое поведение исследуемого материала. Основное преимущество моделей, основанных на механике сплошных сред, состоит в том, что они не требуют каких-либо регулируемых параметров. Конечно, все параметры, участвующие в различных уравнениях, должны быть известны, но это детерминированный подход, и модели, таким образом, являются прогностическими.

Описывая экструдер, иногда бывает сложно установить отношения между параметрами входа и выхода. Модель позволит нам рассчитать данные, которые невозможно измерить (например, скорости сдвига, деформации), чтобы четко понимать взаи-

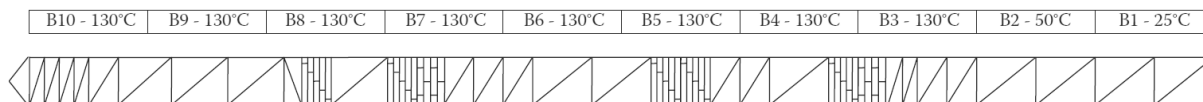


Рис. 1. Пример винтового профиля двухшнекового экструдера, включая три ограничивающие секции (два блока замешивающих дисков и один левосторонний элемент справа налево).

мосвязи между различными параметрами (например, что является последствиями изменения скорости вращения шнека) или для прогнозирования пределов процесса (например, температура продукта превысит предельные значения; достигнут максимальный крутящий момент).

Таким образом, такая модель может использоваться для лучшего понимания процесса, но также для оптимизации (лучшие условия обработки для желаемых свойств, наилучшая конструкция винтов для увеличения производительности и снижения энергопотребления). Он также может быть использован для решения сложных задач масштабирования: когда процесс/продукт был разработан в лабораторном масштабе, а нужно разработать профиль винта и определить условия обработки для того, чтобы получить такое же качество продукции в промышленном масштабе.

В случае одношнековой экструзии геометрия довольно проста, и аналитические решения уравнений потока могут быть легко представлены и упрощены.

Эффективная модель двухшнекового экструзионного процесса должна позволять правильно оценивать параметры процесса (давление, температуру, время пребывания, вязкость и т.д.), а также правильные тенденции при изменении контрольных значений (скорость шнека, подача и др.).

**Цель** этой статьи - показать возможности моделирования процессов на основе механики сплошных сред в области двухшнековой экструзии для пищевых продуктов с помощью общего подхода.

### Объекты и методы исследований

На самом деле в двухшнековом экструзионном моделировании необходимо учитывать два основных аспекта. Мы можем рассматривать весь процесс, от подачи сырья в бункере до выхода из трансформированного продукта в матрицу, или просто сосредоточиться на ограниченной части экструдера. Первый аспект, называемый глобальным моделированием, требует использования упрощенного подхода, обычно основанного на предположении одномерного потока. Второй может быть очень сложным и обычно использует трехмерный метод конечных элементов (FEM). Он позволяет очень точно описать поле потока, но является дорогостоящим с точки зрения вычислительных ресурсов. Рассмотрим глобальный подход к процессу экструзии

двухшнековым экструдером, подходящим для рассмотрения реалистичных промышленных применений.

### Результаты и их обсуждение

Рассмотрим моделирование двухшнековой экструзии с использованием метода сплошных сред: сырые материалы подаются в экструдер в разделенной твердой форме (порошок, мука), а жидкости (вода, сироп, жир и т.д.) могут быть добавлены, если ранее не смешивались.

Прогресс процесса экструзии идет вдоль шнека экструдера и следует общей последовательности твердой транспортировки продуктов, за которой следует переход из твердого вещества в макроскопически гомогенную вязкую фазу, которую можно назвать тестом или расплавом. Затем расплав транспортируется и подается в термическую и механическую часть экструдера (в основном, сдвиг). Наконец, этот расплав подвергается переходу жидкость / твердое вещество на выходе из матрицы из-за резких изменений давления и температуры. Эти изменения состояния, а также переносы тепла и массы являются результатом различных явлений, которые хорошо описываются; они учитываются вариациями тепловых и физических свойств, которые являются важными входами модели.

Переход твердого вещества / расплава в основном обусловлен трением между срезанными частицами, которые могут быть фрагментированы, в случае крахмальных гранул, или стать резиновыми для белков. Учитывая винтовой профиль, показанный на рис.1, этот переход обычно считается на первом ограничительном элементе (замешивающий диск, левый винт и т.д.), по существу, из-за сжатия и трения частиц муки в этом разделе.

Эти изменения сильно отличаются от тех, которые происходят при избытке воды, где напряжения сдвига незначительны, то есть, например, клейстеризация.

Обзор явления плавления крахмала в зависимости от содержания воды широко описаны в литературе для различных источников крахмала и состава крахмалистого продукта, особенно содержания сахара. Таким образом, общий энергетический баланс явления плавления внутри экструдера может быть записан как:

$$\Delta H + C_p \Delta T = E_{cd} + E_f \quad (1)$$

где  $\Delta H$  – удельная энтальпия для изменения

состояния (плавление в случае крахмалистого продукта с порядком величины приблизительно 10 Дж/г),

$\Delta T$  – общее повышение температуры до максимальной температуры,

$E_{cd}$  и  $E_f$  – удельные энергии, обеспечиваемые проводимостью из ствола и винта (винтов), и диссипация трением соответственно.

## Выводы

Принимая обычные значения теплопроводности и удельной теплоемкости, а также коэффициент межчастичного трения пришли к выводу, что энергозатраты для перехода твердого вещества/расплава составляют приблизительно 500 Дж/г, что соответствует значению, согласующемуся с преобразованиями крахмала во время экструзии.

## Список литературы

- [1] Пахомов В.И., Брагинец С.В., Алферов А.С., Гайдаш М.В., Степанова Ю.В. Исследования процесса экструдирования смеси зерновых концентратов с измельченной зеленой массой бобовых трав // Вестник Донского государственного технического университета. 2016. Т. 16. № 2 (85). С. 154-159.
- [2] Петров И.А., Славнов Е.В. Моделирование шнек-прессового отжима как совокупности процессов течения вязкой несжимаемой смеси и фильтрации жидкости сквозь пористую среду // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6. № 3. С. 277-285.
- [3] Коновалов В.В., Курочкин А.А., Фролов Д.И. Методология проектирования смесителей-увлажнителей сыпучих пищевых продуктов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2014. № 6 (22). С. 189-196.
- [4] Курочкин А.А., Шабурова Г.В., Фролов Д.И. Получение экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья с заданной пористостью // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2014. № 6 (22). С. 109-114.
- [5] Моделирование процесса получения экструдатов на основе нового технологического решения / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Нива Поволжья. 2014. № 30. С. 70-76.
- [6] Регулирование структуры экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 4. С. 94-99.
- [7] Теоретическое обоснование термовакuumного эффекта в рабочем процессе модернизированного экструдера / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 3. С. 15-20.
- [8] Фролов Д.И., Курочкин А.А. К вопросу совершенствования экструзионных технологий // Инновационная техника и технология. 2015. № 2 (03). С. 18-23.
- [9] Экструдаты из растительного сырья с повышенным содержанием липидов / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 4. С. 70-74.
- [10] 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.

## THE THEORETICAL APPROACH TO MODELING FOOD EXTRUSION

*Frolov D.I.*

The development of new processes and materials helps, in addition to the classical experimental approach, to use theoretical models that can provide information about the process conditions and their impact on product characteristics. This paper discusses an approach to food extrusion modeling based on the development of efficient and deterministic models using continuum mechanics.

**Keywords:** *food extrusion modeling, continuum mechanics, extruder, food industry, energy balance.*

## References

- [1] Pakhomov V.I., Braginets S.V., Alferov A.S., Gaidash M.V., Stepanova Yu.V. Issledovaniya protsessa ekstrudirovaniya smesi zernovykh kontsentratov s izmel'chennoi zelenoi massoi bobovykh trav // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016. T. 16. № 2 (85). pp. 154-159.

- 
- [2] Petrov I.A., Slavnov E.V. Modelirovanie shnek–pressovogo otzhima kak sovokupnosti protsessov techeniya vyazkoi neszhimaemoy smesi i fil'tratsii zhidkosti skvoz' poristuyu sredy // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred. 2013. T. 6. № 3. pp. 277–285.
- [3] Kononov V.V., Kurochkin A.A., Frolov D.I. Metodologiya proektirovaniya smesitelei-uvlazhnitelei sypuchikh pishchevykh produktov // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2014. № 6 (22). pp. 189–196.
- [4] Kurochkin A.A., Shaburova G.V., Frolov D.I. Poluchenie ekstrudatov krakhmalsoderzhashchego zernovogo syr'ya s zadannoi poristost'yu // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2014. № 6 (22). pp. 109–114.
- [5] Modelirovanie protsessov polucheniya ekstrudatov na osnove novogo tekhnologicheskogo resheniya / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronina // Niva Povolzh'ya. 2014. № 30. pp. 70–76.
- [6] Regulyrovaniye struktury ekstrudatov krakhmalsoderzhashchego zernovogo syr'ya / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronina // Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii. 2013. № 4. pp. 94–99.
- [7] Teoreticheskoe obosnovaniye termovakuumnogo effekta v rabochem protsesse modernizirovannogo ekstrudera / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronina // Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii. 2015. № 3. pp. 15–20.
- [8] Frolov D.I., Kurochkin A.A. K voprosu sovershenstvovaniya ekstruzionnykh tekhnologii // Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya. 2015. № 2 (03). pp. 18–23.
- [9] Ekstrudaty iz rastitel'nogo syr'ya s povyshennym soderzhaniiem lipidov / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronina // Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii. 2014. № 4. pp. 70–74.
- [10] Ekstrudaty iz rastitel'nogo syr'ya s povyshennym soderzhaniiem lipidov i pishchevykh volokon / A.A. Kurochkin, P.K. Voronina, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2016. № 3 (42). pp. 104–111.