

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭКСТРУЗИИ ПИЩЕВОГО МАТЕРИАЛА ПРИ 3D ПЕЧАТИ

*Каверина Юлия Евгеньевна, аспирант кафедры Процессов и аппаратов перерабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»,  
e-mail: [kaverina@rgau-msha.ru](mailto:kaverina@rgau-msha.ru)*

*Торопцев Василий Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры Процессов и аппаратов перерабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», e-mail: [toroptsev@rgau-msha.ru](mailto:toroptsev@rgau-msha.ru)*

*Мартеха Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Процессов и аппаратов перерабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», e-mail: [man6630@rgau-msha.ru](mailto:man6630@rgau-msha.ru)*

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Россия, Москва, e-mail: [rector@rgau-msha.ru](mailto:rector@rgau-msha.ru)

**Аннотация:** в настоящей работе представлены результаты численного моделирования процесса экструзионной 3D-печати пшеничного теста. Получены профили распределения скоростей потока макаронного теста через сопло экструзионной головки.

**Ключевые слова:** моделирование, экструзия, 3D печать.

Среди различных способов пищевой 3D-печати метод на основе экструзии является наиболее часто используемым при производстве трехмерных пищевых изделий. 3D-печать пищевых продуктов методом экструзии представляет собой процесс создания сложного трехмерного объекта слой за слоем, управляемый цифровыми средствами [1].

В исследованиях по экструзии пищевых продуктов применение методов вычислительной гидродинамики и конечных элементов являются эффективными способами моделирования характеристик материала внутри экструдера. Смоделированные характеристики могут использоваться для понимания внутренних механизмов, лежащих в основе процессов перемешивания и теплопередачи [2,3].

Распределение поля потока напрямую отражает состояние процесса экструзии материала, что влияет на качество 3D-печатных изделий. Взаимосвязь между реологическими свойствами материалов и их характеристиками печати была установлена с помощью распределения поля потока.

В оборудовании для экструзионной 3D-печати на основе шприца пищевой материал помещается в картридж и выталкивается из сопла поршнем шприца,

приводимым в движение запрограммированным шаговым двигателем [4].

В качестве пищевого материала для моделирования процесса 3D-печати использовалось пшеничное тесто. Предполагалось, что материал представляет собой несжимаемую однофазную жидкость с ламинарной поверхностью раздела. Плотность и вязкость материала составляли  $720 \text{ кг/м}^3$  и  $3000 \text{ Па}\cdot\text{с}$  соответственно. Граничные и начальные условия, принятые для процесса экструзии, перечислены ниже. Скорости подачи были приняты равными  $0,0027 \text{ мм/с}$ , давление на выходе составляло  $101325 \text{ Па}$ . Стенка экструзионной трубки, шприц и сопло также были заданы как не скользящие. Объемный расход на входе был установлен на уровне  $1,65 \text{ мм}^3/\text{с}$ , диаметр сопла -  $1,6 \text{ мм}$ , а скорость сдвига была рассчитаны с использованием программного обеспечения *COMSOL Multiphysics*.

Распределение скоростей сдвига в цилиндре и сопле имеет решающее значение для определения параметров состояния жидкости, например, вязкости, и, соответственно, для лучшего контроля процесса экструзионной 3D-печати. В ходе моделирования выяснилось, что скорость сдвига потока в цилиндре, представленная на рис. 1, изменяется незначительно, в то время как внутри сопла это изменение хорошо заметно, что, очевидно, объясняется резким уменьшением диаметра канала. Также из рис. 1 видно, что изменение скорости сдвига в центре канала сопла невелико и возрастает по мере приближения к стенке.

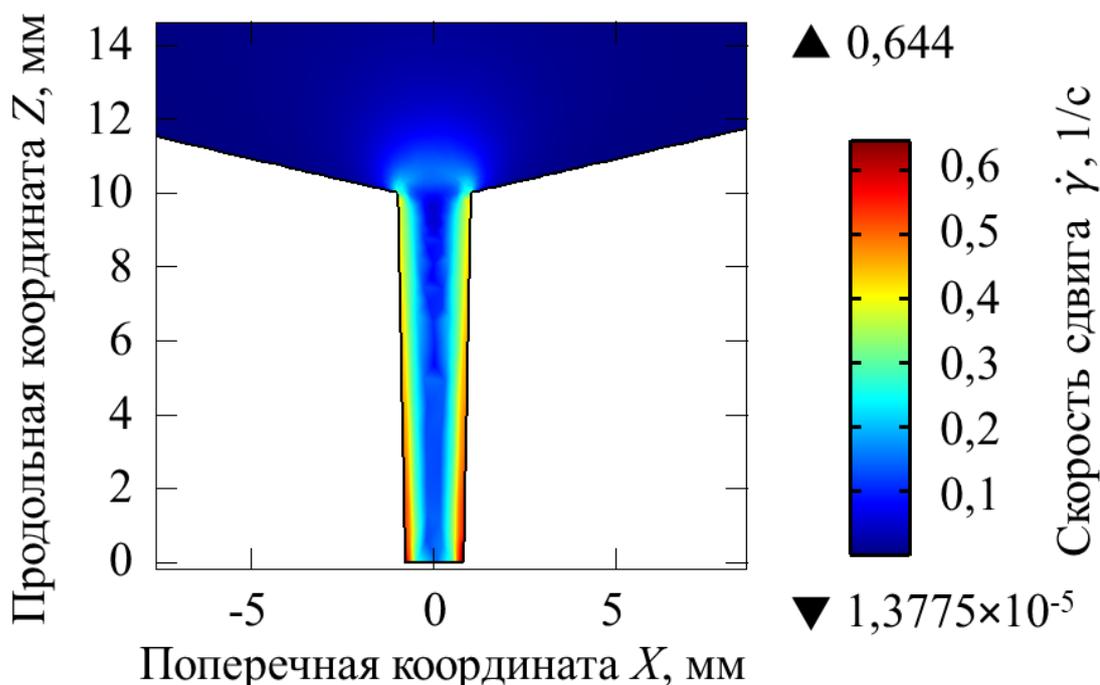


Рисунок 1 – Распределение скорости сдвига в поле потока

Это явление указывало на большее усилие сдвига материала у внутренней поверхности сопла и значительный градиент скорости вдоль нормали к стенке. Кроме этого, были отмечены высокие показатели скорости сдвига вокруг выходного отверстия сопла, быстро увеличивающиеся сверху вниз, по мере

движения материала к выходу. Это может способствовать дополнительному уменьшению вязкости среды до относительно низкого значения, и, соответственно, легкому выдавливанию материала через небольшое отверстие сопла.

### **Библиографический список**

1. Мартеха, А.Н. Кинетическая оценка и оптимизация процесса сушки 3D-печатных макаронных изделий / А.Н. Мартеха, Ю.Е. Каверина // Хранение и переработка сельхозсырья. 2022. № 2. С. 161-172.

2. Мартеха, А.Н. Интенсификация процесса экструзии при получении растительного масла / А.Н. Мартеха, А.А. Берестовой // Цифровизация агропромышленного комплекса. 2018. С. 235-237.

3. Development and research of new method for juice extracting from sugar beet with preliminary pressing / V.Yu. Ovsyannikov, V.V. Toroptsev, A.A. Berestovoi, N. N. Lobacheva, M.A. Lobacheva, A.N. Martekha // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. P. 052011.

4. Технологическое оборудование механических и гидромеханических процессов. В 2 ч. Ч. 2. [Текст]: учеб. пособие / С. Т. Антипов, Г. В. Калашников, В. Е. Игнатов, В. В. Торопцев; Воронеж. гос. ун-т инж. технол. Воронеж: ВГУИТ, 2017. 110 с.

5. Патент № 2545298 С1 Российская Федерация, МПК В01F 7/26. Центробежный смеситель с направляющим диффузором : № 2013146116/05 : заявл. 15.10.2013 : опубл. 27.03.2015 / Д. М. Бородулин, С. А. Ратников, Д. В. Сухоруков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Кемеровский технологический институт пищевой промышленности.

6. Патент № 2207186 С1 Российская Федерация, МПК В01F 7/26, В28С 5/16. Центробежный смеситель : № 2001130371/12 : заявл. 09.11.2001 : опубл. 27.06.2003 / В. Н. Иванец, И. А. Бакин, Д. М. Бородулин, В. П. Зверев ; заявитель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности.

7. The use of Soxhlet extractor for the production of tinctures from plant raw materials / D. Borodulin, M. Prosin, I. Bakin [et al.] // E3S Web of Conferences : 13, Rostovon-Don, 26–28 февраля 2020 года. – Rostovon-Don, 2020. – P. 08010. – DOI 10.1051/e3sconf/202017508010

8. Ушакова, А. С. Разработка комплексной технологии переработки сушеного плодово-ягодного сырья : специальность 05.18.15 "Технология и товароведение пищевых продуктов и функционального и специализированного назначения и общественного питания" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ушакова Анастасия Сергеевна, 2017. – 153 с

### **SIMULATION MODEL OF FOOD MATERIAL EXTRUSION IN 3D PRINTING**

**Kaverina Yulia Evgenievna**, graduate student of the Department of Processes and Equipment of Processing Industries, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, e-mail: [kaverina@rgau-msha.ru](mailto:kaverina@rgau-msha.ru)

**Toroptsev Vasily Vladimirovich**, Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Processing Equipment, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev,

e-mail: [toroptsev@rgau-msha.ru](mailto:toroptsev@rgau-msha.ru)

**Martekha Alexander Nikolaevich**, Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Processes and Processing Equipment, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, e-mail: [man6630@rgau-msha.ru](mailto:man6630@rgau-msha.ru)

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,  
Russia, Moscow, e-mail: [rector@rgau-msha.ru](mailto:rector@rgau-msha.ru)

**Abstract:** This paper presents the results of numerical modeling of the process of extrusion 3D printing of wheat dough. Profiles of the distribution of pasta dough flow rates through the nozzle of the extrusion head were obtained.

**Key words:** simulation, extrusion, 3D printing.

---

УДК 664:001.895

## КОРРЕЛЯЦИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С ФОРМОУСТОЙЧИВОСТЬЮ ПРИ 3D ПЕЧАТИ ПШЕНИЧНОГО ТЕСТА

**Каверина Юлия Евгеньевна**, аспирант кафедры Процессов и аппаратов перерабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»,  
e-mail: [kaverina@rgau-msha.ru](mailto:kaverina@rgau-msha.ru)

**Торопцев Василий Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры Процессов и аппаратов перерабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», e-mail: [toroptsev@rgau-msha.ru](mailto:toroptsev@rgau-msha.ru)

**Мартеха Александр Николаевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Процессов и аппаратов перерабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», e-mail: [man6630@rgau-msha.ru](mailto:man6630@rgau-msha.ru)

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Россия, Москва, e-mail: [rector@rgau-msha.ru](mailto:rector@rgau-msha.ru)

**Аннотация:** в настоящей работе представлены результаты исследования по