

Исследование реологической модели макаронного теста для аддитивного производства

Сергей А. Бредихин	¹	bredihin2006@yandex.ru	 0000-0002-6898-0389
Александр Н. Мартеха	¹	man6630@rambler.ru	 0000-0002-7380-0477
Юлия Е. Каверина	¹	kaverinayu@mail.ru	 0000-0002-8352-922X

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550, Россия

Аннотация. Реологические измерения проводились на макаронном тесте из смеси манной крупы и цельнозерновой муки из твердых сортов пшеницы. Для определения реологических характеристик в условиях экструзии и ее отношения к поведению макаронного теста во время обработки изделий объект исследования был экструдирован с помощью капиллярного вискозиметра и лабораторного экструдера. Также были проведены испытания на ползучесть, чтобы проверить возможность пренебрежения упругой составляющей деформации. Было исследовано влияние температуры и степени гидратации на вязкость макаронного теста. Целью этого исследования является определение реологической модели, необходимой для последующего анализа процесса экструзионной 3D-печати макаронного теста. Результаты показали, что тесто для макаронных изделий ведет себя как псевдопластическая жидкость, что можно описать с помощью модели степенного закона. Повышенные уровни гидратации снижали кажущуюся вязкость теста, которая коррелировала с давлением экструзии. Исследования подтвердили вязкоупругое поведение макаронных изделий, но важным наблюдением для целей настоящего исследования является то, что упругая составляющая деформации очень мала по сравнению с условиями текучести. Наблюдалось уменьшение значения коэффициента консистенции с увеличением степени гидратации теста с 30 до 34%. На индекс текучести также влияла влажность теста. Общее значение индекса текучести варьировалось от 0,284 для 30% и 0,404 для 34%, наблюдалось его повышение с увеличением содержания влаги. Разработанная реологическая модель макаронного теста будет использоваться для моделирования поведения потока при печати в 3D-принтере экструзионного типа с помощью технологии вычислительной гидродинамики.

Ключевые слова: реология, экструзия, макаронное тесто, аддитивные технологии

Study of the rheological model of pasta dough for additive manufacturing

Sergey A. Bredihin	¹	bredihin2006@yandex.ru	 0000-0002-6898-0389
Alexander N. Martekha	¹	man6630@rambler.ru	 0000-0002-7380-0477
Yuliya E. Kaverina	¹	kaverinayu@mail.ru	 0000-0002-8352-922X

¹ Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russia

Abstract. Rheological measurements were carried out on pasta dough from a mixture of semolina and whole wheat flour from durum wheat. To determine the rheological characteristics under extrusion conditions and its relation to the behavior of the pasta dough during the processing of products, the object of study was extruded using a capillary viscometer and a laboratory extruder. Creep tests were also carried out to check the possibility of neglecting the elastic component of deformation. The influence of temperature and degree of hydration on the viscosity of pasta dough was investigated. The purpose of this study is to determine the rheological model required for the subsequent analysis of the process of extrusion 3D-printing of pasta dough. The results showed that the pasta dough behaves like a pseudoplastic liquid, which can be described using a power law model. Increased hydration levels reduced the apparent dough viscosity, which correlated with extrusion pressure. Studies have confirmed the viscoelastic behavior of pasta, but an important observation for the purposes of this study is that the elastic component of deformation is very small compared to yield conditions. There was a decrease in the value of the coefficient of consistency with an increase in the degree of hydration of the dough from 30 to 34%. The moisture index of the dough also influenced the flow index. The overall value of the flow index varied from 0.284 for 30% and 0.404 for 34%, it was observed to increase with increasing moisture content. The developed rheological models of pasta dough will be used to simulate the flow behavior when printing in an extrusion-type 3D printer using computational fluid dynamics technology.

Keywords: rheology, extrusion, pasta dough, additive technologies

Введение

Экструзия – один из наиболее универсальных и хорошо зарекомендовавших себя промышленных процессов, используемых сегодня в пищевой промышленности. Он все чаще применяется во всем мире для производства постоянно расширяющегося списка продуктов питания и кормов, включая закуски, крупы,

макаронные изделия, текстурированные растительные белки и корма для животных. Процесс обычно включает преобразование состава на основе пластифицированного биополимера в однородно обработанную вязкоупругую массу, которая подходит для формования.

Процесс экструзии можно разделить на два основных типа. Во-первых, экструдирование

Для цитирования

Бредихин С.А., Мартеха А.Н., Каверина Ю.Е. Исследование реологической модели макаронного теста для аддитивного производства // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 3. С. 55–60. doi:10.20914/2310-1202-2021-3-55-60

For citation

Bredihin S.A., Martekha A.N., Kaverina Y.E. Study of the rheological model of pasta dough for additive manufacturing. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2021. vol. 83. no. 3. pp. 55–60. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2021-3-55-60

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

без варки или формование, когда давление, создаваемое шнеком, перемещает материал к формующей матрице. Во-вторых, варочная экструзия, которая, как следует из названия, включает в себя приготовление сырых ингредиентов за счет комбинированного действия тепла, механического сдвига и давления [1].

Процесс производства макаронных изделий (формовочная экструзия) можно считать устоявшейся технологией. Хотя развитие знаний насчитывает много веков, а промышленные предприятия для непрерывной обработки в основном не изменились, механизмы, задействованные в преобразовании манной крупы в макаронные изделия путем добавления воды и применения механической и тепловой энергии, полностью не исследованы. Более того, взаимосвязь между параметрами обработки и качеством продукции полностью не изучена [2].

Литература по экструзии макаронных изделий весьма ограничена и в основном сосредоточена на сырье, процессе сушки и качестве конечных продуктов [3, 9].

Во многих исследованиях основной целью был выбор наиболее подходящих сортов твердой пшеницы путем оценки их характеристик при переработке растительного сырья или измерения физико-химических изменений, испытываемых компонентами [10].

Самому процессу уделялось очень мало внимания, и исследования по одношнековой экструзии практически ограничивались варкой при экструзии. Лишь совсем недавно процесс экструзии рассматривается в разрезе формования пищевых продуктов при аддитивной технологии [4, 6, 11, 12].

Процесс экструзии в пищевой 3D-печати – это управляемый цифровым способом, роботизированный конструкторский процесс, который позволяет создавать слой за слоем сложные 3D-пищевые объекты. Он начинается с загрузки материала, выдавливания из сопла контролируемым образом, перемещения потока материала по заданному пути и в конечном итоге склеивания нанесенного слоя с образованием когерентной твердой структуры [7, 13].

В процессе экструзии реологические свойства материалов имеют решающее значение для обеспечения надлежащей экструдированности, связывания различных слоев пищевых продуктов вместе и поддержания веса осажденных слоев [8].

Цель работы – получение экспериментальных данных о реологических свойствах макаронного теста с целью разработки модели численного моделирования процесса аддитивного производства макаронных изделий. Понимание такой связи позволяет нам прогнозировать

поведение печати тестовых масс и тем самым лучше проектировать качественные печатные составы и процессы [4, 14, 15].

Материалы и методы

Материалом, использованным в эксперименте, была манная крупа и цельнозерновая мука из твердых сортов пшеницы. На образцах теста, приготовленных в лаборатории, исследовали различное содержание влаги с целью выяснить взаимосвязь между влажностью и поведением теста. Манную крупу смешивали при 25° С с водой при требуемом уровне гидратации в течение 15 минут с использованием бытового миксера. Макаaronное тесто было гидратировано до влажности 30, 32 и 34% и отформовано с использованием лабораторного экструдера, круглые матрицы которого придавали форму спагетти. Для определения влажности использовалась методика ААСС [5].

Перед измерениями все тесто выдерживали в пластиковом корпусе на 20 минут при комнатной температуре.

Испытания на ползучесть проводились на образцах с приложением напряжения сдвига 30 Па в течение 3000 с, так как этого времени было достаточно для достижения состояния постоянной скорости сдвига для последней части испытания. Выбранное напряжение сдвига (ниже критического значения) было основано на совпадении кривых податливости ползучести, полученных при различных напряжениях. Испытания на ползучесть были получены на трех отдельно замешанных кусках теста для каждого образца.

Для измерения реологических свойств макаронного теста использовали капиллярный вискозиметр. Ингредиенты смешивали в течение 1 минуты в смесителе, а затем загружали в вискозиметр, который был предварительно нагрет до 45 °С, температуры, при которой обычно происходит экструзия макаронных изделий. Температура контролировалась тремя нагревателями по всей длине цилиндра, диаметр которого составлял 24 мм, и для его заполнения требовалось около 88 г. материала.

Поршень вискозиметра был приведен в соприкосновение с тестом для стадии предварительной подготовки. Тесту позволили отдохнуть в цилиндре в течение трех минут, чтобы оно расслабилось и уравнилось при температуре 45 °С без значительной потери влаги. Эксперимент проводился путем измерения давления экструзии, необходимого для выдавливания теста при скоростях поршня 21,4; 52,6; 129,8 и 320 мм/мин. После основной температуры реологические измерения проводились при 20; 30 и 40° С.

При обработке теста из манной крупы как чисто вязкого материала к образцам прикладывали увеличивающуюся скорость сдвига и измеряли напряжение сдвига в различное фиксированное время для получения кривой течения.

Результаты и обсуждения

Результаты испытания на ползучесть представлены на рисунке 1, где в качестве меры повторяемости можно видеть, что кривые, относящиеся к разным повторениям, перекрываются в масштабе графика.

Самый первый сегмент кривой, который является наклонным, представляет собой упругую реакцию на импульс силы, а конец кривой представляет установившийся поток. Как уже было замечено в [17], вязкость теста из манной крупы стремится к вязкости при нулевом сдвиге при скоростях сдвига менее 10^{-5} c^{-1} .

Испытание подтвердило вязкоупругое поведение макаронных изделий, но важным наблюдением для целей настоящего исследования является то, что упругая составляющая деформации очень мала по сравнению с условиями текучести. Как следствие, экструзия может быть изучена для инженерных целей со ссылкой на модели чистого вязкого течения.

Кривые текучести теста представлены на рисунке 2 для различных значений температуры. Примечательно, как напряжение сдвига уменьшается при более высоких температурах при той же скорости деформации. Кроме того, при более низкой скорости деформации был достигнут режим установившегося потока.

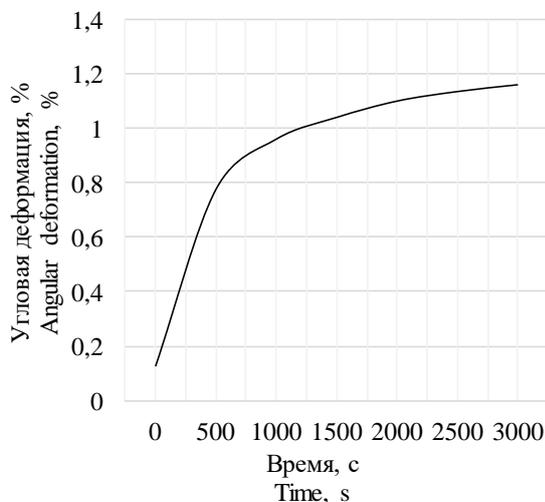


Рисунок 1. Зависимость угловой деформации макаронного теста от времени воздействия

Figure 1. Dependence of the angular deformation of the pasta dough on the exposure time

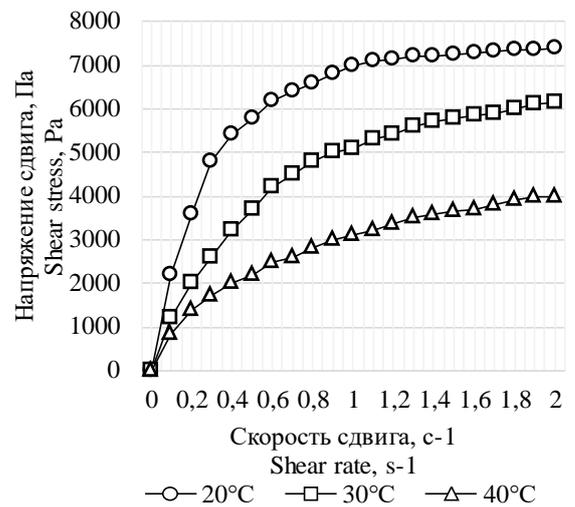


Рисунок 2. Зависимость напряжения от скорости сдвига при различной температуре

Figure 2. Dependence of stress on shear rate at different temperatures

Данные о напряжении сдвига и скорости сдвига, полученные с помощью капиллярного вискозиметра и скорректированные с использованием формулы Рабиновича, были адекватно описаны моделью степенного закона. Форма кривой кажущейся вязкости (рисунок 3), указывает на то, что тесто для макаронных изделий представляет собой псевдопластичную жидкость [9, 16].

Псевдопластическое поведение при сдвиге, наблюдаемое в тесте, объясняется макромолекулярными характеристиками белковых молекул. При низких скоростях сдвига молекулы белка расположены случайным образом, но при высоких скоростях сдвига они выравниваются в направлении сдвига, тем самым снижая вязкость теста [18, 19].

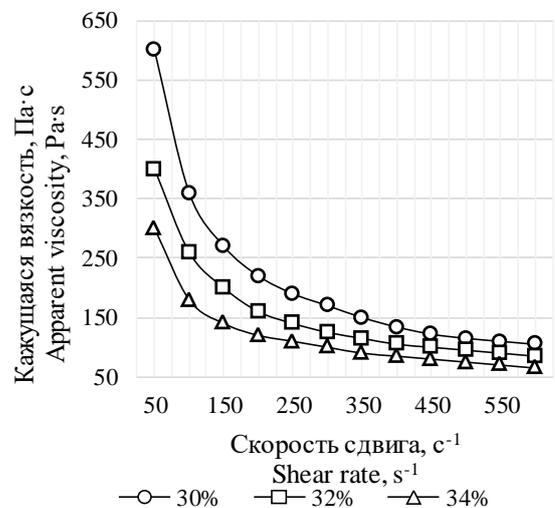


Рисунок 3. Зависимость кажущейся вязкости от скорости сдвига при различной влажности

Figure 3. Dependence of the apparent viscosity on the shear rate at different humidity

Значения коэффициента консистенции, приведенные в модели степенного закона, варьировались в диапазоне от 222,1 кПа сⁿ, для 30%, и 68,2 кПа сⁿ для 34%. Наблюдается уменьшение значения коэффициента консистенции с увеличением степени гидратации теста с 30 до 34%. На индекс текучести также влияла влажность теста. Общее значения индекса текучести варьировалось от 0,284 для 30% и 0,404 для 34%, т. е. наблюдалось его повышение с увеличением содержания влаги.

Коэффициент консистенции и индекс текучести являются параметрами, которые отражают реологические свойства теста при его экструзии в капиллярном вискозиметре. Уменьшенные значения коэффициента консистенции при увеличении влажности теста с 30% до 34% указывают на то, что вода является пластификатором, который уменьшает консистенцию теста и увеличивает его текучесть, облегчая экструзию теста. Индекс текучести – это безразмерное число, которое указывает на уровень неньютоновского поведения теста. Чем дальше, тем больше значение жидкости равно 1, тем более неньютоновское поведение демонстрирует жидкость. Вода является ньютоновской жидкостью, поэтому, как и ожидалось, значения индекса текучести для данной рецептуры теста приближалось к 1 по мере увеличения содержания влаги в тесте.

Истинная скорость сдвига, при которой образцы экструдировались, составляла 41,6 с⁻¹, для 34%, и 90,8 с⁻¹, для 30%. Эти значения содержались в диапазоне скоростей сдвига, при которых тесто экструдировалось в капиллярном вискозиметре, что позволило рассчитать кажущуюся вязкость макаронного теста при помощи моделей, созданных вискозиметром.

Результаты показали, что на кажущуюся вязкость теста для макаронных изделий в значительной степени влияют состав и уровень гидратации теста. Чем выше содержание влаги в тесте, тем ниже кажущаяся вязкость экструдата.

Традиционное тесто для макаронных изделий, состоящее из 100% манной крупы, обычно гидратируется до влажности 32%, и поэтому кажущаяся вязкость этой рецептуры гидратация теста будет использоваться в качестве контрольного значения, отмеченного на рисунке 4 горизонтальной линией. Согласно рисунку 4, оптимальный уровень гидратации рецептуры смеси манной крупы и цельнозерновой муки из твердых сортов пшеницы для проявления такой же кажущейся вязкости, как у традиционного теста для макаронных изделий, составлял бы от 32 до 34%.

Уменьшение кажущейся вязкости теста при повышении уровня гидратации отражает

пластифицирующее действие воды на реологическое поведение теста в условиях экструзии. Кажущаяся вязкость теста напрямую зависит как от значений коэффициента консистенции, так и от индекса текучести. Поскольку коэффициент консистенции и индекс текучести зависели от уровня гидратации, как обсуждалось ранее, ожидалось, что кажущаяся вязкость теста будет реагировать также.

Отображение значений кажущейся вязкости, показанных на рисунке 4, позволяет визуально сравнить значения кажущейся вязкости от уровня гидратации по отношению к эталонному образцу, где горизонтальная линия указывает на уровень образца при влажности 32%.

Исследуемые образцы показали более высокие значения кажущейся вязкости, чем эталонный образец, даже при 32% гидратации. Фракции отрубей поглощали воду, поэтому им требуется больше воды, чтобы демонстрировать такое же реологическое поведение, как у контрольного образца.

Реологическое поведение, проявляемое тестом в экструдере для макаронных изделий, следовали той же тенденции, что и поведение теста, отображаемое на капиллярном вискозиметре. За счет повышения уровня гидратации тесто стало более податливым и текучим, что уменьшило давление экструзии, необходимое для выдавливания теста.

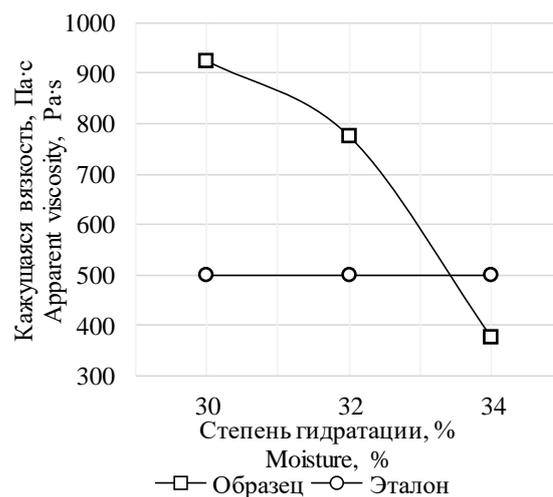


Рисунок 4. Зависимость кажущейся вязкости макаронного теста от степени гидратации

Figure 4. Dependence of the apparent viscosity of the pasta dough on the degree of hydration

В экструдерах для макаронных изделий давление экструзии является результатом взаимодействия скорости шнека, температуры и гидратации муки. Поскольку скорость вращения шнека и температура поддерживались постоянными во время процесса экструзии, изменение значений давления отражает эффект гидратации теста.

Заключение

Поведение теста для макаронных изделий, наблюдаемое во время экструзии макаронных изделий, может быть объяснено реологическими исследованиями, проводимыми с помощью капиллярного вискозиметра. На коэффициент консистенции и показатель текучести, рассчитанные после экструзии теста, сильно повлияли изменения уровня гидратации и рецептура теста. Оценка кажущейся вязкости теста при экструдировании теста в лабораторном экструдере для макаронных изделий может быть определена

благодаря данным, предоставленным капиллярным вискозиметром. Сильная корреляция, обнаруженная между кажущейся вязкостью теста и параметрами экструзии макаронных изделий, указывает на возможность использования экструзионного 3D-принтера для производства макаронных изделий [20].

Разработанная реологическая модель макаронного теста будет использоваться для моделирования поведения потока при печати в 3D-принтере экструзионного типа с помощью технологии вычислительной гидродинамики.

Литература

- 1 Шариков А.Ю., Степанов В.И., Иванов В.В., Поливановская Д.В., Амелякина М.В. Экструдирование смесей пшеницы и выжимок моркови повышенной влажности в технологии продуктов, готовых к употреблению // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 3. С. 43–49. doi:10.20914/2310-1202-2018-3-43-49.
- 2 Щекoldина Т.В. Разработка технологических решений производства безглютеновых макаронных изделий на основе киноа (*Chenopodium quinoa* Willd.) // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2019. № 6. С. 56–62.
- 3 Польшкова Н.Э., Жилиева Н.С. Новые технологии при производстве макаронных изделий // Образование и наука без границ: фундаментальные и прикладные исследования. 2020. № 12. С. 122–126. doi:10.36683/2500-249X/2020-12/122-126.
- 4 Бредихин С.А., Антипов С.Т., Андреев В.Н., Мартеха А.Н. Влияние реологических характеристик на качество 3D-печати пищевых паст // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 2. С. 40–47. doi:10.20914/2310-1202-2021-2-40-47
- 5 Прибытков А.В., Овсянников В.Ю., Мартеха А.Н., Торопцев В.В. Основные факторы, влияющие на кинетику процесса сушки ферментированного пшеничного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 5. С. 33–35.
- 6 Корреляция реологических свойств с качеством трехмерной печати шоколадной массы / С.А. Бредихин [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 3. С. 111–116. doi:10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.015.
- 7 Толочко Н.К., Андрушевич А.А., Василевский П.Н., Чугаев П.С. Применение технологии экструзионной 3D-печати в литейном производстве // Литье и металлургия. 2018. № 4. С. 139–144. doi:10.21122/1683-6065-2018-4-139-144
- 8 Коган, В.В., Семенова Л.Э. Инженерная реология в пищевой промышленности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2019. № 4. С. 147–156. doi:10.24143/2073-5529-2019-4-147-156
- 9 Sarghini F., Romano A., Masi P. Experimental analysis and numerical simulation of pasta dough extrusion process // Journal of Food Engineering. 2016. V. 176. P. 56–70. doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.09.029.
- 10 Romano A., Ferranti P., Gallo V., Masi P. New ingredients and alternatives to durum wheat semolina for a high quality dried pasta // Current Opinion in Food Science. 2021. V. 41. P. 249–259. doi:10.1016/j.cofs.2021.07.005.
- 11 Derossi A., Caporizzi R., Oral M.O., Severini C. Analyzing the effects of 3D printing process per se on the microstructure and mechanical properties of cereal food products // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. V. 66. 102531. doi:10.1016/j.ifset.2020.102531
- 12 Le-Bail A., Maniglia B.C., Le-Bail P. Recent advances and future perspective in additive manufacturing of foods based on 3D printing // Current Opinion in Food Science. 2020. V. 35. P. 54–64. doi:10.1016/j.cofs.2020.01.009
- 13 Wilms P., Daffner K., Kem C., Gras S.L., Schutysen M.A.I., Kohlis R. Formulation engineering of food systems for 3D-printing applications – A review // Food Research International. 2021. V. 148. 110585. doi:10.1016/j.foodres.2021.110585.
- 14 Raman Kumar P., Kumar R. 3D printing of food materials: A state of art review and future applications // Materials Today: Proceedings. 2020. V. 33. Part 3. P. 1463–1467. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.005
- 15 Masbernat L., Berland S., Leverrier C., Moulin G., Michon C., Almeida G. Structuring wheat dough using a thermomechanical process, from liquid food to 3D-printable food material // Journal of Food Engineering. 2021. V. 310. 110696. doi:10.1016/j.jfoodeng.2021.110696
- 16 Joyner S. (Melito) H. Explaining food texture through rheology // Current Opinion in Food Science. 2018. V. 21. P. 7–14. doi:10.1016/j.cofs.2018.04.003
- 17 De Bondt Y., Hermans W., Moldenaers P., Courtin C.M. Selective modification of wheat bran affects its impact on gluten-starch dough rheology, microstructure and bread volume // Food Hydrocolloids. 2021. V. 113. 106348. doi:10.1016/j.foodhyd.2020.106348
- 18 Jaensson N.O., Anderson P.D., Vermant J. Computational interfacial rheology // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2021. V. 290. 104507. doi:10.1016/j.jnnfm.2021.104507
- 19 Mishra K., Kohler L., Kummer N., Zimmermann S., Ehrenguber S., Kämpf F., Dufour D., Nyström G., Fischer P., Windhab E.J. Rheology of cocoa butter // Journal of Food Engineering. 2021. V. 305. 110598. doi:10.1016/j.jfoodeng.2021.110598
- 20 Wen Y., Che Q.T., Kim H.W., Park H.J. Potato starch altered the rheological, printing, and melting properties of 3D-printable fat analogs based on inulin emulsion-filled gels // Carbohydrate Polymers. 2021. V. 269. 118285. doi:10.1016/j.carbpol.2021.118285

References

- 1 Sharikov A. Yu., Stepanov V.I., Ivanov V.V., Polivanovskaya D.V., Amelyakina M.A. Extrusion cooking of wet mixtures of wheat flour with carrot bagasse in technology of ready-to-eat products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 3. pp. 43–49. (In Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-3-43-49.
- 2 Shchekoldina T.V. Development of technological solutions for the production of gluten-free pasta based on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) // Technology and merchandising of the innovative foodstuff. 2019. no. 6(59). pp. 56–62. (in Russian).

- 3 Polynkova N.E., Zhilyaeva N.S. New technologies in the production of pasta. Education and science without borders: fundamental and applied research. 2020. no. 12. pp. 122–126. (in Russian). doi:10.36683/2500-249X/2020-12/122-126.
- 4 Bredihin S.A., Antipov S.T., Andreev V.N., Martekha A.N. Influence of rheological characteristics on the quality of 3D printing of food pastes. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2021. vol. 83. no. 2. pp. 40–47. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2021-2-40-47
- 5 Pribytkov A.V., Ovsyannikov V. Yu., Martekha A.N., Toroptsev V.V. The main factors affecting the kinetics of the drying process of fermented wheat raw materials. Storage and processing of agricultural raw materials. 2015. no. 5. pp. 33–35. (in Russian).
- 6 Bredihin, S.A., Andreev, V.N., Martekha, A.N. & Berezovskiy, Yu. M. (2021). Correlation between rheological properties and quality three-dimensional printed chocolate mass. Polzunovskiy vestnik, (3), 111–116. (in Russian). doi:10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.015.
- 7 Tolochko N.K., Andrushevich A.A., Vasilevskii P.N., CHugaev P.S. Foundry applications of extrusion 3D printing technology // Casting and metallurgy. 2018. no. 4(93). pp. 139–144. (in Russian). doi:10.21122/1683-6065-2018-4-139-144.
- 8 Kogan V.V., Semenova L.E. Engineering rheology in the food industry. Proceedings of Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries. 2019. no. 4. pp. 147–156. doi:10.24143/2073-5529-2019-4-147-156 (in Russian).
- 9 Sarghini F., Romano A., Masi P. Experimental analysis and numerical simulation of pasta dough extrusion process // Journal of Food Engineering. 2016. vol. 176. pp. 56–70. doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.09.029.
- 10 Romano A., Ferranti P., Gallo V., Masi P. New ingredients and alternatives to durum wheat semolina for a high quality dried pasta. Current Opinion in Food Science. 2021. vol. 41. pp. 249–259. doi:10.1016/j.cofs.2021.07.005.
- 11 Derossi A., Caporizzi R., Oral M.O., Severini C. Analyzing the effects of 3D printing process per se on the microstructure and mechanical properties of cereal food products. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. vol. 66. 102531. doi:10.1016/j.ifset.2020.102531
- 12 Le-Bail A., Maniglia B.C., Le-Bail P. Recent advances and future perspective in additive manufacturing of foods based on 3D printing. Current Opinion in Food Science. 2020. vol. 35. pp. 54–64. doi:10.1016/j.cofs.2020.01.009
- 13 Wilms P., Daffner K., Kem C., Gras S.L., Schutysen M.A.I., Kohlus R. Formulation engineering of food systems for 3D-printing applications – A review. Food Research International. 2021. vol. 148. 110585. doi:10.1016/j.foodres.2021.110585
- 14 Raman Kumar P., Kumar R. 3D printing of food materials: A state of art review and future applications. Materials Today: Proceedings. 2020. vol. 33. part 3. pp. 1463–1467. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.005
- 15 Masbernat L., Berland S., Leverrier C., Moulin G., Michon C., Almeida G. Structuring wheat dough using a thermomechanical process, from liquid food to 3D-printable food material. Journal of Food Engineering. 2021. vol. 310. 110696. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110696
- 16 Joyner S. (Melito) H. Explaining food texture through rheology. Current Opinion in Food Science. 2018. vol. 21. pp. 7–14. doi:10.1016/j.cofs.2018.04.003
- 17 De Bondt Y., Hemmans W., Moldenaers P., Cortin C.M. Selective modification of wheat bran affects its impact on gluten-starch dough rheology, microstructure and bread volume. Food Hydrocolloids. 2021. vol. 113. 106348. doi:10.1016/j.foodhyd.2020.106348
- 18 Jaensson N.O., Anderson P.D., Vermant J. Computational interfacial rheology. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2021. vol. 290. 104507. doi:10.1016/j.jnnfm.2021.104507
- 19 Mishra K., Kohler L., Kummer N., Zimmermann S., Ehrenguber S., Kämpf F., Dufour D., Nyström G., Fischer P., Windhab E.J. Rheology of cocoa butter. Journal of Food Engineering. 2021. vol. 305. 110598. doi:10.1016/j.jfoodeng.2021.110598
- 20 Wen Y., Che Q.T., Kim H.W., Park H.J. Potato starch altered the rheological, printing and melting properties of 3D-printable fat analogs based on inulin emulsion-filled gels. Carbohydrate Polymers. 2021. V. 269. 118285. doi:10.1016/j.carbpol.2021.118285

Сведения об авторах

Сергей А. Бредихин д.т.н., профессор, кафедра процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550, Россия, bredihin2006@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6898-0389>

Александр Н. Мартеха к.т.н., доцент, кафедра процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550, Россия, man6630@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

Юлия Е. Каверина аспирант, кафедра процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550, Россия, kaverinayu@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8352-922X>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени приняли участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Sergey A. Bredihin Dr. Sci. (Engin.), professor, department of processes and apparatus of processing industries, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russia, bredihin2006@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6898-0389>

Alexander N. Martekha Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of processes and apparatus of processing industries, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russia, man6630@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

Yuliya E. Kaverina graduate student, department of processes and apparatus of processing industries, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russia, kaverinayu@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8352-922X>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила	11/07/2021	После редакции	23/07/2021	Принята в печать	03/08/2021
Received	11/07/2021	Accepted in revised	23/07/2021	Accepted	03/08/2021