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

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2538
https://elibrary.ru/IKTVVR

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Влияние молочных компонентов на реологические свойства пшеничного теста и оценка его пригодности для 3D-печати

А. Н. Мартеха[1,*], В. В. Торопцев[1], Ю. Е. Каверина[1], И. А. Короткий[2]

[1] *Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, Москва, Россия*

[2] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

Поступила в редакцию: 30.01.2024
Принята после рецензирования: 23.04.2024
Принята к публикации: 07.05.2024

**А. Н. Мартеха: man6630@rgau-msha.ru, https://orcid.org/0000-0002-7380-0477*
В. В. Торопцев: https://orcid.org/0000-0001-6448-5586
Ю. Е. Каверина: https://orcid.org/0000-0002-8352-922X
И. А. Короткий: https://orcid.org/0000-0002-7623-0940

© А. Н. Мартеха, В. В. Торопцев, Ю. Е. Каверина, И. А. Короткий, 2024

Аннотация.
Пшеничное тесто используется в качестве основы или связующего вещества при приготовлении многих продуктов питания и является одним из наиболее перспективных материалов для создания инновационных пищевых продуктов с использованием 3D-печати. Целью данной работы являлось изучение влияния молочных ингредиентов на реологические характеристики теста из пшеничной муки и оценка его пригодности к экструзионной трехмерной печати.
Рецептура теста для проведения исследований предполагала смешивание пшеничной муки с водой при определенном гидромодуле и добавлении молочных компонентов, таких как сухое молоко, сывороточный белок, обезжиренный йогурт. Определение реологических свойств осуществляли методом обратной экструзии в анализаторе текстуры и на ротационном вискозиметре.
Пшеничное тесто с влажностью 65 % и содержанием (по массе) одного из компонентов – 5 % сухого молока, 0–2,5 % изолята сывороточного белка или 20 % йогурта – имело значения реологических характеристик, находящихся в определенных диапазонах: комплексной вязкости – 1900–2100 Па·с, тангенса угла механических потерь – 0,14–0,16 и силы сопротивления – 20,0–23,5 Н. Полученные значения были близки к оптимальным показателям реологических характеристик контрольного образца пшеничного теста, пригодного для 3D-печати.
Результаты исследований могут быть использованы при разработке составов мучных изделий, предназначенных для изготовления методом экструзионной 3D-печати. В дальнейшем планируется проведение экспериментов по 3D-печати пшеничного теста с добавлением молочных ингредиентов, а также определение оптимальных кинематических и геометрических параметров процесса экструзионной 3D-печати.

Ключевые слова. Тесто, 3D-печать, экструзия, реология, пшеничная мука, молочные ингредиенты

Для цитирования: Влияние молочных компонентов на реологические свойства пшеничного теста и оценка его пригодности для 3D-печати / А. Н. Мартеха [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 4. С. 711–721. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2538

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2538
https://elibrary.ru/IKTVVR

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

The Influence of Dairy Components on the Rheological Properties of Wheat Dough and Assessment of its Suitability for 3D Printing

Alexander N. Martekha[1,*], Vasiliy V. Toroptsev[1], Yuliya E. Kaverina[1], Igor A. Korotkiy[2]

[1] *Russian State Agrarian University Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia*

[2] *Kemerovo State University, Kemerovo, Russia*

Received: 30.01.2024
Revised: 23.04.2024
Accepted: 07.05.2024

**Alexander N. Martekha: man6630@rgau-msha.ru, https://orcid.org/0000-0002-7380-0477*
Vasiliy V. Toroptsev: https://orcid.org/0000-0001-6448-5586
Yuliya E. Kaverina: https://orcid.org/0000-0002-8352-922X
Igor A. Korotkiy: https://orcid.org/0000-0002-7623-0940

© A.N. Martekha, V.V. Toroptsev, Y.E. Kaverina, I.A. Korotkiy, 2024

Abstract.
Wheat dough is a popular binder in many food formulations. It is also the most promising material for 3D-printed innovative food products. The article describes the effect of dairy ingredients on the rheological profile of wheat dough and its prospects for extrusion 3D printing.
The test samples involved flour mixed with different amounts of water and various dairy components, e.g., milk powder, whey protein, and low-fat yogurt. The rheological properties were tested using the reverse extrusion method in a texture analyzer and a spindle viscometer.
The best wheat dough sample had 65% moisture content, 5% milk powder (by weight), and 0–2.5% whey protein isolate or 20% yogurt. The sample demonstrated the optimal rheological properties that were close to those of the control sample: 1900–2100 Pa·s complex viscosity, 0.14–0.16 mechanical loss tangent, and 20–23.5 N resistance.
The results can be used to develop innovative 3D-printed flour products. Further research will involve experiments in 3D printing of wheat dough with various dairy ingredients to determine the optimal kinematic and geometric parameters for extrusion 3D printing.

Keywords. Dough, 3D printing, extrusion, rheology, wheat flour, dairy components

For citation: Martekha AN, Toroptsev VV, Kaverina YE, Korotkiy IA. The Influence of Dairy Components on the Rheological Properties of Wheat Dough and Assessment of its Suitability for 3D Printing. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(4):711–721. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2538

Введение

В настоящее время пшеничное тесто используется в качестве основы или связующего вещества при приготовлении многих продуктов питания, содержащих компоненты растительного или животного происхождения, а также является одним из наиболее перспективных материалов для создания инновационных пищевых продуктов с использованием 3D-печати [1]. Добавление дополнительных ингредиентов в пшеничное тесто позволяет модифицировать состав и свойства его дисперсионной среды, в которой распределена дисперсная фаза, преимущественно состоящая из гранул крахмала и частиц вносимых ингредиентов. В зависимости от способа приготовления теста, его белки могут быть либо диспергированы в нем, либо объединены в белковые сети. Введенные ингредиенты достаточно инертны и не играют существенной роли в процессах образования клейковинной сетки при механической обработке теста или набухания крахмальных гранул при клейстеризации. Реологические свойства приготовленного и обработанного теста могут быть изменены за счет наличия этих ингредиентов [2]. Фактически они являются наполнителем среды и потенциально способны увеличивать вязкость пасты в зависимости от их концентрации, размера и жесткости. Растворимые соединения в дисперсионной среде изменяют свойства клейковины (сахара, жиры, сывороточные белки, пектины) и кинетику процесса клейстеризации крахмала (сахара, жиры), что приводит к модификации реологических свойств пшеничного теста и потенциальной возможности его 3D-печати [3]. В концентрированных суспензиях свойства, определяющие их упругость, вязкость и текучесть, зависят главным образом от жесткости и формы частиц, контактных взаимодействий

(трения) между частицами и пространственной организацией (случайно или по определенной закономерности). Преобладание свойств жесткости частиц над остальными реологическими свойствами концентрированных систем было особенно отмечено авторами в экспериментах с образцами крахмала, имевшими различную способность к набуханию, положительно коррелировавшую с деформируемостью гранул [4].

Данная зависимость подтверждена результатами, полученными при исследовании агар-агаровых микрогелей, на жесткость частиц которых влияет степень связи полисахаридов [5]. Форма деформируемых частиц также влияет на вязкость концентрированных суспензий. Согласно работе о растительных клетках яблочного пюре, чем более неправильную форму имеют частицы суспензии, тем выше вязкость последней [6].

Вопрос о роли взаимодействия деформируемых частиц в суммарной вязкости концентрированных суспензий особенно подробно изучался в работах Y. Wang и др., исследовавших связанные частицы латекса [7]. Подобные суспензии имеют в своей структуре своеобразные блоки, состоящие из плотного ядра с сильными связями между частицами и расположенной вокруг него периферийной части из полимеров, в меньшей степени связанных с ядром. Концентрированная суспензия представляет собой гель с образованными в нем переплетающимися полимерными волокнами, усиливающими контактные взаимодействия между частицами. Авторы приходят к выводу, что величина вышеупомянутого блока зависит от плотности связей именно в его ядре, а не в периферийной части. Другими словами, сцепление между частицами влияет на упругость концентрированной суспензии меньше, чем на жесткость самих частиц. Однако стоит учитывать, что связывающие взаимодействия между частицами в основном электростатические, и образующиеся гели легко разбавляются, возвращаясь в состояние обыкновенной суспензии [8].

Жесткость частиц и состояние их поверхности в некоторой степени оказывают влияние на силы контактного взаимодействия и способность частиц деформироваться при малой скорости сдвига, а затем выравниваться по направлению потока при более высокой скорости сдвига. Подобное поведение концентрированной суспензии называется сдвиговым истончением. Реология системы слабо деформируемых частиц также определяется контактными взаимодействиями между частицами и пространственной организацией частиц [9, 10].

Стабильная структура системы может быть разрушена приложением сдвигового напряжения, превышающего пороговое, что обусловливает увеличение текучести в результате более интенсивных гидродинамических взаимодействий между дисперсионной средой и частицами с учетом энергии, рассеиваемой за счет вязкого трения движущихся частиц [11]. Под действием сдвига более «мягкая» частица деформируется и увеличивает поверхность контакта с другими частицами, что позволяет им вместе лучше сопротивляться деформации [12]. Плотные системы деформируемых частиц обычно характеризуются пороговым значением напряжения, при превышении которого наблюдается сдвиговое истончение.

Дисперсионная среда разбавленной суспензии в основном оказывает влияние на вязкость последней, в то время как в концентрированных системах подобное влияние незначительно. Взаимодействие между элементами дисперсионной среды и частицами способно изменить реологические свойства концентрированной суспензии [13].

Молоко представляет собой коллоидную систему, в которой диспергированы жировые шарики и мицеллы казеина. Молочные жировые шарики на 97 % состоят из триацилглицерина и имеют диаметр от 4 до 5 мкм. Казеины, составляющие 80 % белков молока, связаны в форме сферических мицелл, размер которых варьируется от 50 до 600 нм при среднем значении 150 нм. Сывороточные белки, составляющие 20 % белков молока, относятся к классу растворимых белков [14].

За образование йогуртовых гелей отвечает агрегация молочных белков. Размер частиц микрогелей варьируется от нескольких микрометров до нескольких сотен микрометров. Распределение частиц микрогелей йогурта по размерам полидисперсное и зависит от процесса приготовления. Состав йогурта очень близок к составу молока. Йогурт состоит из 81–88 % воды, 3–5 % белка, 3–4 % жира, примерно 5 % углеводов (в основном лактозы), 1 % молочной кислоты и нескольких миллиграмм минералов [15].

Пшеничное тесто с добавлением молока или йогурта (с термической обработкой или без нее) различается главным образом размерами добавляемых частиц и pH дисперсионной среды (около 6,8 для молока и 4,5 для йогурта). Размер частиц микрогелей перемешанного йогурта, обычно не превышающий размеров гранул клейстеризированного крахмала, уменьшается по мере возрастания интенсивности сдвига [16]. Структура микрогеля может реорганизоваться или распадаться на субъединицы под действием сдвига или уплотнения при добавлении молочных компонентов в пшеничное тесто. Мицеллы казеина деформируются в меньшей степени, чем гранулы клейстеризованного крахмала.

S. O. Serna-Hernandez и др. изучили свойства деформируемости и сжимаемости мицелл казеина. Авторы указывают, что мицелла состоит из деформируемых и недеформируемых участков [17]. При сжатии мягкие области деформируются и вытесняют воду из мицеллы, тогда как недеформируемые области сопротивляются сжатию. Жесткие области разделены и соединены вакуумом или деформируемыми областями, строение которых напоминает структуру губки [18]. По определению молочные микрогели относительно деформируемы. В исследованиях J. Chen и др. заметили, что деформируемость микрогелей увеличивается по мере

уменьшения плотности сети белковых агрегатов [19]. Согласно исследованиям N. Nussbaum и др., частицы молочных микрогелей уменьшаются до минимального размера, после чего разрушить их можно только под сильным давлением и / или сдвигом [20]. В этом состоянии молочный микрогель можно считать несжимаемым, хотя, насколько нам известно, исследований сжимаемости молочных микрогелей не проводилось.

Влияние добавления различных молочных белков (мицеллярных казеинов, казеинатов или сывороточных белков) на реологические свойства концентрированных крахмальных суспензий зависит от природы крахмала [21]. Вязкость нагретой суспензии крахмала маниоки увеличивается за счет введения сывороточных белков, термическая денатурация которых приводит к образованию геля [22]. Некоторые исследования показывают, что между гранулами крахмала и мицеллами казеина в микрогеле йогурта не существует физико-химических взаимодействий [23]. Эти авторы утверждают, что при клейстеризации суспензии, содержащей крахмал, казеины или казеиновые агрегаты, последние концентрируются в дисперсионной среде смеси и представляют собой неактивные жесткие частицы, заполняющие пространство между гранулами. Реассоциация амилозы и амилопектина после разрыва гранулы при повышении температуры исключает мицеллы казеина из образующейся клейковинной сетки, что приводит к агрегации мицелл и фазовому расслоению.

Пригодность к трехмерной печати пищевых продуктов можно спрогнозировать путем сравнения их реологических характеристик с аналогичными показателями эталонных образцов.

В работах Ю. Е. Кавериной и В. В. Торопцева проводились исследования по экструзионной трехмерной печати пшеничного теста, по результатам которых были определены критерии пригодности к 3D-печати теста без добавления молочных ингредиентов [24]. Эти характеристики (комплексная вязкость, тангенс угла механических потерь, модуль упругости, сила сопротивления) использовались в качестве эталонных для оценки свойств полученного в настоящем исследовании теста.

Целью данной работы являлось изучение влияния добавляемых молочных ингредиентов на реологические свойства пшеничного теста и его пригодность к экструзионной 3D-печати.

Объекты и методы исследования

Приготовление теста. Рецептура теста для изготовления контрольного образца, по своим свойствам соответствующего эталонному для 3D-печати, предполагала смешивание муки из зерна твердой пшеницы высшего сорта (ГОСТ 31463-2012) с водой при различном гидромодуле (отношении массы воды к массе муки). В образцы, предназначенные для исследования влияния различных компонентов на свойства теста, помимо муки и воды, добавлялось восстановленное сухое обезжиренное молоко, изолят сывороточного белка (ИСБ) или йогурт. Общая масса каждой порции теста являлась постоянной величиной на протяжении всех исследований и равнялась 600 г. Восстановленное обезжиренное молоко получали путем предварительного смешивания воды с различной массовой долей сухого молока в количестве 0–5 % от общей массы порции теста.

Смешивание основных ингредиентов и термомеханическую обработку теста с различной массовой долей воды осуществляли в термомиксере Thermomix TM6 (Vorwek, Германия). В емкость термомиксера добавляли порошкообразные ингредиенты (мука, сахар и порошок изолята сывороточного белка) и заливали водой. После перемешивания этих компонентов в течение 5 мин мешалкой, вращающейся со скоростью 50 мин$^{-1}$, в термомиксер добавляли восстановленное обезжиренное молоко и, в некоторых экспериментах, йогурты. Во время внесения ингредиентов скорость вращения мешалки увеличивали до 130 мин$^{-1}$. После добавления всех ингредиентов, не прекращая перемешивать, температуру смеси повышали от 25 до 70 °С в течение 15 мин.

Для исследований был выбран обезжиренный йогурт, представляющий собой концентрированную суспензию (или микрогель), содержащий 6,5 % белков, способных удерживать сыворотку, 8 % углеводов и водную фазу, содержащую растворимые сахара и минералы. Средний размер частиц микрогелей составлял 27,5 мкм. В результате было получено тесто с фиксированной массовой долей влаги 65 %, содержанием йогурта 20, 40 и 72 % от общей массы.

Содержание воды. Содержание воды в муке и йогуртах определяли методом высушивания продукта до постоянной влажности. Порцию продукта массой около 5 г взвешивали на прецизионных весах неавтоматического действия GH-202 (AND, Япония) в бюксе известной массы m_0 (точность до 0,001 г), алюминиевой – для муки и стеклянной – для йогурта соответственно. Бюксы высушивали в сушильном шкафе СНОЛ (ООО «НТФ «ТермИКС-Наука», Россия) и охлаждали перед использованием. Затем образец помещали в сушильный шкаф, разогретый до температуры 130 °С (для муки) и 102 °С (для йогуртов) соответственно. Содержание воды в ингредиентах учитывали при расчете целевого общего содержания воды в тесте для содержания воды более 6 % по массе.

Реологический анализ. Реологические свойства приготовленного теста исследовали методом обратной экструзии в анализаторе текстуры «Структурометр СТ-2», (ООО «Лаборатория качества», Россия), оснащенном силоизмерительной ячейкой с нагрузкой 50 Н. В данном случае метод обратной экструзии являлся наиболее подходящим методом исследования поведения образцов при значительных деформациях, возникающих за счет действия силы, нормальной к

поверхности материала. В пробирку емкостью 40 мл и диаметром 28 мм помещали 35 г теста, полученного термомеханической обработкой на предыдущем этапе. Пробирки закрывали после наполнения и охлаждали в течение 1 ч до температуры 25 °С, после чего приступали к экспериментам. Чтобы минимизировать погрешность измерений, масса проб оставалась постоянной во всех опытах. При испытаниях каждый образец охлажденного теста помещали под поршневой зонд с диаметром диска 25 мм и толщиной 2 мм, который вдавливали в изделие со скоростью 1 мм/с на глубину не менее 35 мм. При контакте с зондом тесто сопротивляется деформации, сжимается и затем, по мере увеличения деформации, вытекает в кольцевое пространство шириной около 1,5 мм.

Нормальную силу сопротивления потоку $F_м$ определяли как среднее значение сил, рассчитанных при введении поршня в образец на глубину 10 и 20 мм соответственно. Слои теста во всех образцах, расположенные на глубине проникновения поршня 10 мм, находились в состоянии текучести. Исследования вязкости на глубине проникновения поршня 20 мм проводились с целью выявления возможности уплотнения слоев теста в образце, что потенциально могло изменить значение силы сопротивления. Измерения проводились в трехкратной повторности для каждой группы образцов.

Исследования вязкоупругих свойств образцов пшеничного теста до термомеханической обработки и определение температуры начала клейстеризации проводили на ротационном вискозиметре Брукфильда DV3T (Brookfield Engineering Laboratories, Inc., США). Логарифмическое изменение температуры начиналось через несколько секунд после сдвига теста при 25 °С. Температуру увеличивали от 25 до 90 °С с темпом нагрева 4 °С/мин, при скорости сдвига 8 $с^{-1}$.

Статистическая обработка результатов. Все испытания проводились в трехкратной повторности. Для установления значимости различий в полученных экспериментальных данных использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) при уровне значимости 5 %. Управление данными и их анализ проводились с использованием программного обеспечения SPSS и представлялись как среднее значение ± стандартное отклонение.

Результаты и их обсуждение

Влияние добавления сухого молока на реологию пшеничного теста. Комплексная вязкость и тангенс угла механических потерь (*tan δ*) пшеничного теста с добавлением сухого молока (5 %) и без него, при различном содержании воды в зависимости от гидромодуля представлены на рисунке. Комплексная вязкость теста, приготовленного с добавлением сухого молока или без него, снижается при увеличении гидромодуля. При гидромодуле 1,75 показатели комплексной вязкости для образцов теста с добавлением сухого молока и без него отличаются незначительно. Таким образом, при содержании воды выше определенного значения добавление сухого молока не влияет на комплексную вязкость материала.

Для теста с гидромодулем 1,1 густая консистенция смеси муки и воды приводит к преждевременному прекращению процесса замеса до окончания термомеханической обработки. Тесто получается комковатым и неоднородным, что может быть объяснено значительной долей неклейстеризованных крахмальных гранул.

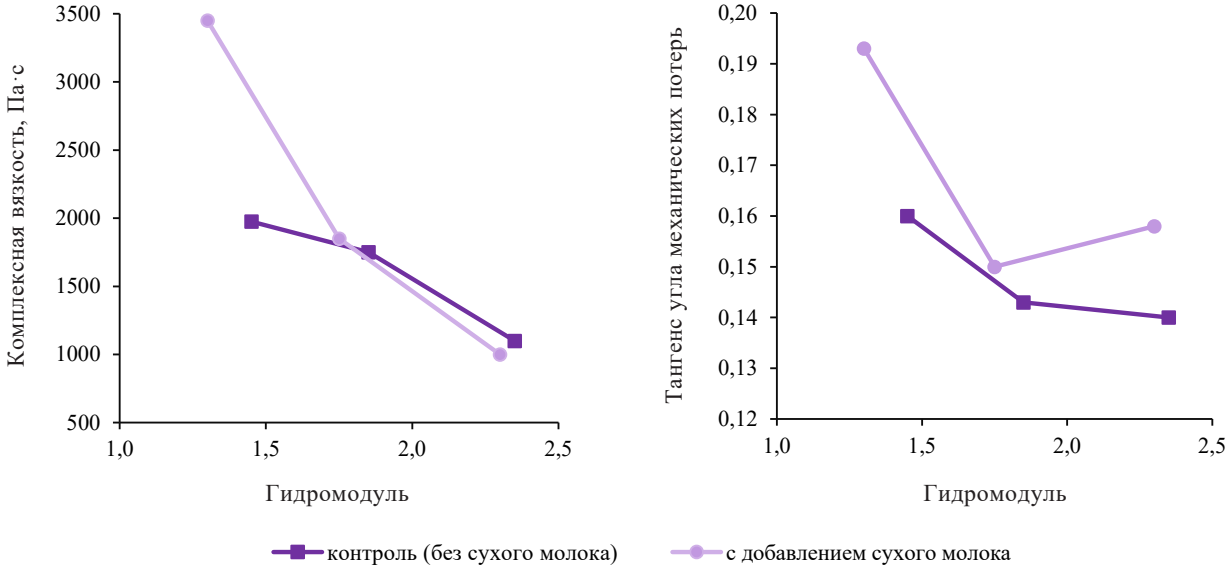

Рисунок. Вязкоупругие свойства теста с добавлением сухого молока и без него

Figure. Visco-elastic properties of dough with and without milk powder

При добавлении сухого молока вместо части муки при том же количестве добавленной воды гидромодуль увеличивается до 1,3. Важно обеспечить сохранение макроскопически однородной структуры теста до окончания термомеханической обработки. Отклонение значений вязкости, рассчитанное по повторным измерениям, для этого теста больше, чем для более жидкого, что свидетельствует об определенной неоднородности густого теста.

Изменение *tan δ* в зависимости от гидромодуля имеет ту же тенденцию, что и для комплексной вязкости. При гидромодуле, равном или превышающем 1,45, для теста, как с добавлением сухого молока, так и без него, значения *tan δ* находятся в диапазоне от 0,16 до 0,14. Эти результаты подтверждают, что добавление сухого молока слабо влияет на вязкоупругие свойства теста при избытке воды.

Образец теста с гидромодулем, меньшим или равным 1,3, демонстрирует *tan δ*, превышающий 0,19, что указывает на значительно более низкую степень структурирования по сравнению с образцом теста, имеющим более высокое значение гидромодуля. Значения модуля упругости (G') логически выше для теста с наименьшим гидромодулем (21,2 кПа для гидромодуля 1,3 теста с сухим молоком, против 12,1 кПа для гидромодуля 1,45 контрольного образца теста, таблица 2). Это показывает, что добавление сухого молока по условиям данного эксперимента не позволяет зафиксировать какого-либо заметного увеличения смазывающего эффекта. Жесткость частиц зависит от степени клейстеризации крахмала и структуры белковой матрицы, распределенной между гранулами [25].

При гидромодуле 1,45 содержание воды ограничивает клейстеризацию гранул крахмала, делая ее частичной. Исходя из этого, при гидромодуле 1,3 данный процесс протекает еще хуже. В зависимости от соотношения между всеми присутствующими компонентами (крахмалом, белками, пентозанами, молочными белками) термомеханическая обработка по-разному трансформирует и организует структуру теста, что, в свою очередь, влияет на реологические свойства.

Модуль упругости, измеренный при небольших деформациях без перемещения частиц теста относительно друг друга, отражает информацию о жесткости частиц [26]. Сила сопротивления потоку ($F_М$) соответствует среднему значению силы, измеренной во время прохождения теста через узкое кольцевое пространство при обратной экструзии. Сила сопротивления потока теста учитывает не только жесткость частиц, но и адгезию между ними и стенками экструзионного цилиндра. Поэтому представляет интерес определение соотношения $F_М/G'$ для расчета величины адгезии, играющей важную роль в пластичности тестового пласта. Для этого свойства теста, приготовленного с добавлением сухого молока, изучали с помощью показателя $F_М/G'$. В таблице 1 приведены характеристики жесткости (модуль упругости), текучести (сила сопротивления) и адгезии ($F_М/G'$), измеренных в тесте, приготовленном с добавлением сухого молока и без него, при массовой доле воды 65 и 70 % соответственно.

Для теста с массовой долей воды 65 %, а также для теста с массовой долей воды 60 % и добавлением 5 % сухого молока по массе, величины силы сопротивления имеют значения одного порядка. Жесткость частиц этих двух видов теста сильно различается (модуль упругости в первом случае почти в два раза меньше), что приводит к значительно большему показателю $F_М/G'$ для теста, не содержащего сухого молока. При увеличении массовой доли воды до 70 % соотношение $F_М/G'$ уменьшится и достигнет значения 1,07, очень близкого к аналогичному показателю теста с 60 % влаги и 5 % сухого молока. В данной рецептуре формирование белкового матрикса ограничено. Лактоза, содержащаяся в сухом молоке, может изменить структуру белков теста, что после их денатурации приведет к снижению адгезионных свойств теста. Согласно другому предположению, структура теста меняется за счет специфических взаимодействий между белками сыворотки и белками муки во время их денатурации [27].

Влияние сывороточных белков на реологию пшеничного теста. Добавление 5 % сухого молока в ранее описанных экспериментах соответствовало 2 % белка, из которых 20 % составлял сывороточный белок. В настоящем эксперименте в рецептуре теста сухое молоко массовой долей 0–5 % заменяли порошком изолята сывороточного белка, на 80 % состоящего из сывороточного белка. Общая массовая доля воды в тесте составляла 60 %, количество муки оставалось постоянным и равным 35 % от общей массы теста. Суммарная массовая доля сывороточных белков варьировалась от 0,5 % (в смеси, содержащей 5 % сухого молока и 0 % изолята сывороточного белка) до 4 % (в смеси с 0 % сухого молока и 5 % изолята сывороточного белка). Реологические свойства теста в

Таблица 1. Структурно-механические свойства теста с добавлением сухого молока и без него

Table 1. Structural and mechanical properties of dough with and without milk powder

Относительная влажность теста, %	Массовая доля сухого молока, %	Гидромодуль	Модуль упругости, кПа	Сила сопротивления, Н	$F_М/G'$, м^2
65 (контроль)	–	1,45	12,1 ± 1,5	23,4 ± 3,8	1,93
70	–	1,85	11,1 ± 1,8	11,9 ± 0,7	1,07
60	5	1,30	21,2 ± 3,6	21,4 ± 0,5	1,00

зависимости от содержания сухого молока и изолята сывороточного белка представлены в таблице 2.

Замена части сухого молока на сывороточный белок влияет на формирование текстуры изделий из пшеничного теста после термомеханической обработки. Увеличение содержания изолята сывороточного белка в смеси до 5 % вызывает снижение комплексной вязкости более чем в 2 раза по сравнению с вязкостью, измеренной для теста с 5 % сухого молока в составе. Тесто, содержащее 5 % изолята сывороточного белка в составе, по окончании термомеханической обработки показывает лишь незначительное увеличение вязкости, вытекает при наклоне емкости и фактически является непригодным для трехмерной печати.

Количество клейстеризованных крахмальных зерен настолько мало, что дисперсионная среда, окружающая крахмальные зерна, остается в жидком состоянии. При добавлении изолята сывороточного белка 1 до 2,5 % от общей массы порции теста наблюдается изменение текстуры, вызывающее снижение комплексной вязкости теста, но менее существенное, чем в предыдущем случае. Аналогично комплексной вязкости изменяется и модуль упругости в зависимости от процентного содержания сывороточных белков, что приводит к уменьшению эластичности теста. Значение *tan δ* для всех рассматриваемых рецептур составляет около 0,19, независимо от концентрации сывороточного белка.

Для образца с 5 % изолята сывороточного белка было получено стандартное отклонение (± 0,10) значений величины *tan δ*, что указывает на гетерогенность структуры теста. Величина *tan δ* теста, содержащего сухое молоко и сывороточный белок, близка к измеренной для образца с гидромодулем 1,1, в котором процесс клейстеризации был затруднен, и превышает *tan δ* образцов теста с гидромодулями 1,45 и 1,85. Значительное снижение интенсивности процесса клейстеризации в присутствии сывороточных белков является причиной снижения вязкости.

Существует предположение, подтвержденное результатами исследований, состоящее в том, что при наличии в тесте из пшеничной муки сывороточных белков часть присутствующей влаги связывается с молекулами этих белков вместо крахмальных зерен, что вызывает повышение температуры клейстеризации крахмала [28]. Если при нейтральном pH и комнатной температуре сывороточные белки связывают меньше воды, чем казеины (0,32 г воды/г белка), то при денатурации и агрегации их водоудерживающая способность значительно возрастает [29, 30].

Основной сывороточный белок сыворотки, *β*-лактоглобулин, термочувствителен и способен агрегироваться в сферические объекты размером от 1 до 100 мкм в зависимости от концентрации белка, параметров нагрева (температура, время пребывания, сдвиг) и окружающей среды (pH, ионная сила, присутствие других белков и т. д.) [31]. Во всех исследуемых нами образцах теста образование крупных связанных агрегатов сывороточных белков маловероятно из-за низкой концентрации последних и насыщенности среды гранулами, волокнами и нерастворимыми белками.

Изменения в структуре сывороточных белков, вызванные термической денатурацией, увеличивают их водоудерживающую способность и усиливают эффект связывания влаги их молекулами, что, при достижении определенной концентрации белков, приводит к затруднению процесса клейстеризации. В случае полной клейстеризации гранул крахмала они занимают большой объем и стабилизируют вязкость теста.

Чтобы оценить пригодность к 3D-печати полученных с добавлением 0–5 % изолята сывороточного белка образцов теста, оценивали показатели их текучести и адгезии. Сила сопротивления течению, измеренная методом обратной экструзии, модуль упругости и соотношение F_M/G' трансформированного теста в зависимости от концентрации сывороточного белка, представлены в таблице 2.

Жесткость и текучесть в целом развивается одинаково в зависимости от доли сывороточных белков. Самые высокие значения наблюдаются при небольшом количестве изолята сывороточного белка (0–1 %). Значения модуля упругости и силы сопротивления резко и линейно уменьшаются по мере увеличения доли сывороточного белка, заменяющего сухое молоко. Значения силы сопротивления теста, содержащего

Таблица 2. Реологические свойства теста в зависимости от концентрации молочных компонентов

Table 2. Effect of various concentrations of milk components on rheological properties of dough

Относительная влажность теста, %	Массовая доля изолята сывороточного белка, %	Массовая доля сухого молока, %	Гидромодуль	Комплексная вязкость, Па·с	Тангенс угла механических потерь, *tan δ*	Модуль упругости, кПа	Сила сопротивления, Н	F_M/G', м^2
60	5	–	1,30	1500 ± 107	0,200 ± 0,050	9,00 ± 0,90	7,5 ± 0,5	0,800
60	2,5	2,5		2800 ± 75	0,185 ± 0,005	17,25 ± 0,60	20,0 ± 0,6	1,120
60	1	4		3450 ± 331	0,187 ± 0,010	21,25 ± 2,00	23,5 ± 2,0	1,075
60	–	5		3425 ± 95	0,186 ± 0,005	21,20 ± 0,60	21,4 ± 0,5	1,000

0–2,5 % изолята сывороточного белка, соотносятся со значением контрольного образца теста с гидромодулем 1,45. Однако соответствующие значения модуля упругости значительно выше, чем у контрольного образца, что свидетельствует о большей жесткости частиц теста.

Данные таблицы 2 демонстрируют, что отношение $F_м/G'$ всех образцов теста, содержащих молочные ингредиенты, намного ниже, чем аналогичный параметр контрольного образца теста без добавления молочных ингредиентов с гидромодулем 1,45. По данному показателю образцы теста с массовой долей изолята сывороточного белка 0–2,5 % близки к контрольному образцу теста без добавления молочных ингредиентов с гидромодулем 1,85. Таким образом, добавление молочных ингредиентов изменяет адгезионные свойства частиц теста.

M. Wesołowska-Trojanowska и др. в своей работе продемонстрировали влияние добавления сывороточных белков на структуру геля белков глютена [32]. Авторы указывают на то, что денатурированные сывороточные белки способны препятствовать образованию геля денатурированных белков глютена посредством образования водородных и дисульфидных связей с субъединицами глютенина. Это приводит к образованию другой, более компактной формы организации геля из-за белка глютена, который становится менее эластичным, и, возможно, более хрупким при значительных деформациях. Более высокие значения *tan δ* соответствуют менее структурированному гелю. Снижение модуля упругости по мере увеличения доли добавленного изолята сывороточного белка свидетельствует о наличии менее эластичных частиц. Интерпретация различных уровней адгезии представляется более сложной задачей.

Влияние йогурта на реологию пшеничного теста. В таблице 3 показано изменение реологических свойств теста, в том числе значения температуры начала клейстеризации, при которой вязкость теста начинает быстро увеличиваться в зависимости от гидромодуля и концентрации йогурта в тесте.

По сравнению с контрольным образцом (без добавления йогурта) введение в тесто йогурта в количестве 20 и 72 % вызывает повышение температуры начала клейстеризации на 3,4 и 7,4 °С соответственно. Чем выше концентрация йогурта, тем сильнее возрастает содержание сахара. Температура начала клейстеризации увеличивается сильнее при добавлении в тесто 40 % йогурта. Вид сахаров, находящихся в тесте, влияет на температуру начала клейстеризации. Причиной этого может быть наличие лактозы вместо сахарозы. Еще одно предположение заключается в том, что часть воды, находящейся в йогурте, содержится в микрогелях и гораздо менее доступна для клейстеризации крахмала. Следовательно, даже при одинаковом массовом содержании воды крахмал поглощает значительно меньшее ее количество, что может стать лимитирующим фактором процесса клейстеризации. Поэтому не все крахмальные гранулы клейстеризованы в конце стадии термомеханической обработки теста, содержащего йогурт.

Вязкость теста при температурной обработке возрастает по мере увеличения концентрации йогурта в тесте. Введение твердых предметов в тесто приводит к увеличению его вязкости перед нагревом и, следовательно, клейстеризации крахмальных зерен. Уровень консистенции варьируется в зависимости от состава дисперсионной среды, свойств и концентрации диспергированных в ней объектов.

Вязкость теста с массовой долей йогурта 20 %, имеющая значение 2100 Па·с, близка к вязкости контрольного образца теста с гидромодулем 1,45. Величины вязкости образцов теста с массовыми долями йогурта 40 и 72 % аналогичны друг другу, они выше, чем вязкость теста без добавления йогурта.

Значение *tan δ* находится в интервале 0,14–0,16 для всех полученных образцов теста, за исключением теста с добавлением 72 % йогурта, для которого было получено значение 0,187. Степень структурирования в этом тесте значительно ниже, чем в контрольном образце теста с массовой долей влаги 65 % и гидромодулем 1,45. Введение йогурта в тесто свыше определенной концентрации приводит к заметному изменению свойств частиц теста, образующихся в ходе термомеханической обработки.

Микрогели йогурта, с диспергированными в их структуре денатурированными белками, более жесткими, чем гранулы клейстеризованного крахмала, по всей видимости, при добавлении их в тесто способствуют увеличению жесткости частиц последнего. При добавлении в тесто йогурта в количестве 72 % крахмальные гранулы клейстеризуются лишь частично

Таблица 3. Реологические свойства теста в зависимости от концентрации йогурта

Table 3. Effect of yogurt concentrations on rheological properties of dough

Относительная влажность теста, %	Массовая доля йогурта, %	Гидромодуль	Температура начала клейстеризации, °С	Комплексная вязкость, Па·с	Тангенс угла механических потерь
65 (контроль)	–	1,45	60,30 ± 0,30	1975 ± 263	0,160 ± 0,010
65	20	1,60	63,70 ± 1,20	2100 ± 372	0,150 ± 0,007
65	40	1,75	65,50 ± 0,80	3200 ± 414	0,147 ± 0,007
65	72	2,10	67,70 ± 0,23	3300 ± 116	0,187 ± 0,030

из-за резкого повышения температуры, способствующего увеличению вязкости и большего количества несвязанной влаги. Эти два процесса, связанные с наличием большого количества микрогелей с жесткими частицами, в итоге позволяют получить тесто большей вязкости, чем тесто без добавления йогурта. В тесте с йогуртовыми микрогелями гранулы клейстеризованного крахмала находятся совместно с неклейстеризованными гранулами. Последние не взаимодействуют с белками глютена, которые после денатурации под воздействием тепла продолжают играть роль связующего звена между гранулами крахмала и микрогелями йогурта, но уже с меньшим количеством волокон глютена [33]. Это способствует более высоким значениям *tan δ*, выражающимся в увеличении вязкости.

Дополнительные исследования теста с добавлением йогурта в количестве от 40 до 72 % от общей массы позволят подтвердить или опровергнуть существование плато оптимальной вязкости теста, соответствующего определенной массовой доле добавленного йогурта, расположенной между 40 и 72 %. При выходе за пределы этой оптимальной вязкости будет наблюдаться снижение эластичности теста и, соответственно, уменьшение степени структурированности теста, как и в экспериментах с добавлением сывороточного белка.

Выводы

Результаты данного исследования позволили определить оптимальный состав пшеничного теста с добавлением молочных ингредиентов, характеризующегося реологическими показателями, соотносящимися со свойствами контрольного образца, что свидетельствует о пригодности данного теста к трехмерной печати.

Изучение характеристик теста различного состава демонстрирует влияние гидротермических преобразований крахмала и белков на реологические свойства теста. Пшеничное тесто с влажностью 65 % и содержанием (по массе) одного из компонентов – 5 % сухого молока, 0–2,5 % изолята сывороточного белка или 20 % йогурта – имело значения реологических характеристик, находящихся в определенных диапазонах: комплексной вязкости – 1900–2100 Па·с, тангенса угла механических потерь – 0,14–0,16 и силы сопротивления – 20,0–23,5 Н. Полученные значения были близки к оптимальным показателям реологических характеристик контрольного образца, пригодного для 3D-печати.

Тенденция изменения реологических свойств хорошо согласуется со стабильностью размеров, которую можно использовать для количественной оценки и прогнозирования деформационного поведения материалов после 3D-печати. Результаты исследований могут быть использованы при разработке составов мучных изделий, предназначенных для изготовления методом экструзионной 3D-печати.

В дальнейшем планируется проведение экспериментов по 3D-печати пшеничного теста с добавлением молочных ингредиентов, а также определение оптимальных кинематических и геометрических параметров процесса экструзионной 3D-печати.

Критерии авторства

А. Н. Мартеха руководил работой. Все авторы принимали участие в исследованиях, обработке данных и написании текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

A.N. Martekha supervised the research. Other team members performed the experiments, processed the obtained data, and wrote the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. Pulatsu E, Su J-W, Lin J, Lin M. Factors affecting 3D printing and post-processing capacity of cookie dough. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2020;61:102316. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102316

2. Hussein AMS, Abd El-Aal HA, Morsy NM, Hassona MM. Chemical, rheological, and sensory properties of wheat biscuits fortified with local buckwheat. Foods and Raw Materials. 2024;12(1):156–167. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-1-597; https://www.elibrary.ru/QBBVPY

3. Cui Y, Chen J, Zhang S. The effect of degree of esterification of pectin on the interaction between pectin and wheat gluten protein. Food Hydrocolloids. 2023;136:108272. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108272

4. Bredikhin SA, Martekha AN, Toroptsev VV, Kaverina YuE, Korotkiy IA. Sonochemical Effects on Wheat Starch. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):590–611. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2460; https://www.elibrary.ru/PMVGBF

5. Kaneda I. Edible microgel as a texture modifier. Food Science and Technology Research. 2021;27(5):687–693. https://doi.org/10.3136/fstr.27.687

6. Leverrier C, Almeida G, Menut P, Cuvelier G. Design of Model Apple Cells Suspensions: Rheological Properties and Impact of the Continuous Phase. Food Biophysics. 2017;12:383–396. https://doi.org/10.1007/s11483-017-9494-3

7. Wang Y, Sun B, Hao Z, Zhang J. Advances in Organic–Inorganic Hybrid Latex Particles via In Situ Emulsion Polymerization. Polymers. 2023;15(14):2995. https://doi.org/10.3390/polym15142995

8. Asyrul-Izhar AB, Bakar J, Sazili AQ, Goh YM, Ismail-Fitry MR. Emulsion Gels Formed by Electrostatic Interaction of Gelatine and Modified Corn Starch via pH Adjustments: Potential Fat Replacers in Meat Products. Gels. 2023;9(1):50. https://doi.org/10.3390/gels9010050

9. Borker NS, Koch DL. Shear rheology of a dilute suspension of thin rings. Journal of Rheology. 2023;67(3):723. https://doi.org/10.1122/8.0000628

10. Lee YJ, Jin H, Ahn KH. Brownian dynamics simulation on the parallel superposition rheology of a colloidal gel. Journal of Rheology. 2024;68(1):39–57. https://doi.org/10.1122/8.0000672

11. Kailasham R, Chakrabarti R, Prakash JR. Shear viscosity for finitely extensible chains with fluctuating internal friction and hydrodynamic interactions. Journal of Rheology. 2023;67(1):105–123. https://doi.org/10.1122/8.0000498

12. Kim YH, Shim TS, Kim JM. Lateral particle migration in shear-thinning colloidal dispersion. Korea-Australia Rheology Journal. 2022;34:327–334. https://doi.org/10.1007/s13367-022-00043-w

13. Bredikhin SA, Martekha AN, Andreev VN, Soldusova EA, Karpova NA. Investigation of the structural and mechanical characteristics of mayonnaise with the addition of linseed oil. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;979(1):012089. https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012014

14. Huang QX, Yang J, Hu M, Lu W, Zhong K, Wang Y, *et al.* Milk fat globule membrane proteins are involved in controlling the size of milk fat globules during conjugated linoleic acid–induced milk fat depression. Journal of Dairy Science. 2022;105(11):9179–9190. https://doi.org/10.3168/jds.2022-22131

15. Gilbert A, Rioux L-E, St-Gelais D, Turgeon SL. Smoothing temperature and ratio of casein to whey protein: Two tools to improve nonfat stirred yogurt properties. Journal of Dairy Science. 2021;105(10):10485–10499. https://doi.org/10.3168/jds.2020-20040

16. Gilbert A, Rioux L-E, St-Gelais D, Turgeon SL. Studying stirred yogurt microstructure using optical microscopy: How smoothing temperature and storage time affect microgel size related to syneresis. Journal of Dairy Science. 2020; 103 (3):2139–2152. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16787

17. Serna-Hernandez SO, Escobedo-Avellaneda Z, García-García R, Rostro-Alanis MdJ, Welti-Chanes J. Microscopical Evaluation of the Effects of High-Pressure Processing on Milk Casein Micelles. Molecules. 2022;27(21):7179. https://doi.org/10.3390/molecules27217179

18. Antuma LJ, Braitmaier SH, Garamus VM, Hinrichs J, Boom RM, Keppler JK. Engineering artificial casein micelles for future food: Preparation rate and coagulation properties. Journal of Food Engineering. 2024;366:111868. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111868

19. Chen J, Lin K, Zhang L, Zhang Z, Miao S, Zheng B, *et al.* The effect of fat on properties and filling characteristics of myofibrillar protein emulsion microgels. Food Bioscience. 2022;50:102104. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102104

20. Nussbaum N, Bergfreund J, Vialetto J, Isa L, Fischer P. Microgels as globular protein model systems. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2022;217:112595. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112595

21. Rahman MdA, Roy J, Mahomud MdS. Textural and antioxidant properties of mozzarella cheese fortified with dehydrated oyster mushroom flour. Foods and Raw Materials. 2023;11(2):251–258. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-2-574; https://www.elibrary.ru/PDZATD

22. Diniyah N, Iguchi M, Nanto M, Yoshino T, Subagio A. Dynamic Rheological, Thermal, and Structural Properties of Starch from Modified Cassava Flour (MOCAF) with Two Cultivars of Cassava. Industria: Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri. 2023;12(1):89–101. https://doi.org/10.21776/ub.industria.2023.012.01.8

23. Wong SS, Wicklund R, Bridges J, Whaley J, Koh YB. Starch swelling behavior and texture development in stirred yogurt. Food Hydrocolloids. 2019;98:105274. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105274

24. Kaverina YuE, Toroptsev VV. 3D printing technology of pasta dough. International scientific and practical conference of young scientists and specialists of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences. 2023;(1):113–117. (In Russ.). [Каверина Ю. Е., Торопцев В. В. Технология трехмерной печати макаронного теста // Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук. 2023. № 1. С. 113–117]. https://www.elibrary.ru/TPYNUI

25. Rakita S, Torbica A, Pezo L, Nikolić I. Effect of Climatic Conditions on Wheat Starch Granule Size Distribution, Gelatinization and Flour Pasting Properties. Agronomy. 2023;13(6):1551. https://doi.org/10.3390/agronomy13061551

26. Bredikhin SA, Martekha AN, Andreev VN, Kaverina YuE, Korotkiy IA. Rheological Properties of Mayonnaise with Non-Traditional Ingredients. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(4):739–749. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2402; https://www.elibrary.ru/DNZOKM

27. Zhang L, Zhou R, Zhang J, Zhou P. Heat-induced denaturation and bioactivity changes of whey proteins. International Dairy Journal. 2021;123:105175. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105175

28. Shan S, Chen D, Federici E, Jones OG, Campanella OH. The effects of whey protein fibrils on the linear and non-linear rheological properties of a gluten-free dough. Frontiers in Nutrition. 2022;9:909877. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.909877

29. Tang X, Liu J. A Comparative Study of Partial Replacement of Wheat Flour with Whey and Soy Protein on Rheological Properties of Dough and Cookie Quality. Journal of Food Quality. 2017;(1):1–10. https://doi.org/10.1155/2017/2618020

30. Saadi S, Makhlouf C, Nacer NE, Halima B, Faiza A, Kahina H, *et al.* Whey proteins as multifunctional food materials: Recent advancements in hydrolysis, separation, and peptidomimetic approaches. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2024;23(1):e13288. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13288

31. Gasparini A, Buhler S, Faccini A, Sforza S, Tedeschi T. Thermally-Induced Lactosylation of Whey Proteins: Identification and Synthesis of Lactosylated β-lactoglobulin Epitope. Molecules. 2020;25(6):1294. https://doi.org/10.3390/molecules25061294

32. Wesołowska-Trojanowska M, Tomczyńska-Mleko M, Terpiłowski K, Kawecka-Radomska M. Ternary Biopolymer Based on Wheat Gluten, Whey Protein Concentrate and Montmorillonite. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. 2016;26:555–562. https://doi.org/10.1007/s10904-016-0348-0

33. Wouters AGB, Rombouts I, Fierens E, Brijs K, Blecker C, Delcour JA, *et al.* Foaming and air-water interfacial characteristics of solutions containing both gluten hydrolysate and egg white protein. Food Hydrocolloids. 2018;77:176–186. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.033