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

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2460
https://elibrary.ru/PMVGBF

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Влияние сонохимического воздействия на свойства пшеничного крахмала

С. А. Бредихин[1], 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: 16.02.2023
Принята после рецензирования: 09.03.2023
Принята к публикации: 04.04.2023

**А. Н. Мартеха: man6630@rgau-msha.ru, https://orcid.org/0000-0002-7380-0477*
С. А. Бредихин: https://orcid.org/0000-0002-6898-0389
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

© С. А. Бредихин, А. Н. Мартеха, В. В. Торопцев, Ю. Е. Каверина, И. А. Короткий, 2023

Аннотация.
Сонохимическое воздействие успешно применяется в пищевой промышленности в процессах эмульгирования, гомогенизации, диспергирования и модификации вязкости и структуры. Крахмал является одним из распространенных пищевых ингредиентов, независимо от того, входит ли он в состав сырья или добавляется для достижения или улучшения определенных свойств. Цель работы заключалась в изучении влияния сонохимического воздействия на структурно-механические свойства суспензий пшеничного крахмала.
В работе исследовались образцы суспензий, содержащие 10 % пшеничного крахмала. Обработка образцов суспензий проводилась ультразвуком сразу после приготовления с применением ультразвукового аппарата Волна-М (модель УЗТА-1/22-ОМ) или в ультразвуковой ванне (частота 22 кГц, номинальная мощность 100, 150, 300 и 400 Вт). Продолжительность сонохимического воздействия на образцы составила 15 и 30 мин. До и после обработки определяли реологические, физические и текстурные свойства крахмальных суспензий по общепринятым методикам.
Ультразвуковая обработка вызывает механическое повреждение крахмального зерна, делая его внутреннюю часть доступной для влаги при нагревании. Это приводит к изменениям структурно-механических и реологических свойств крахмальных суспензий. Все исследуемые суспензии имели неньютоновский характер. Ультразвуковая обработка увеличивала их коэффициент консистенции с 28,12 до 152,75 мкПа·с. Ультразвуковая обработка привела к снижению температуры клейстеризации всех крахмальных суспензий: с 63,4 до 61,0 °С. Применение ультразвука высокой мощности в течение более короткого периода обработки снижало прочность сформированных гелей до 1,25 Н по сравнению с аналогичным показателем геля нативного крахмала – 4,28 Н.
Обработка суспензий пшеничного крахмала ультразвуком с целью модификации его структурно-механических и реологических свойств может заменить некоторые стандартные методы (химические, физические и ферментативные). Это позволит получить модифицированные крахмалы заданного качества при одновременном снижении энергозатрат и сокращении продолжительности технологического процесса.

Ключевые слова. Крахмал, ультразвук, структурно-механические свойства, реологические свойства, клейстеризация, пищевая промышленность

Для цитирования: Влияние сонохимического воздействия на свойства пшеничного крахмала / С. А. Бредихин [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 600–611. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2460

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2460
https://elibrary.ru/PMVGBF

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

Sonochemical Effects on Wheat Starch

Sergey A. Bredikhin[1], Alexander N. Martekha[1,*], Vasily 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: 16.02.2023
Revised: 09.03.2023
Accepted: 04.04.2023

**Alexander N. Martekha: man6630@rgau-msha.ru, https://orcid.org/0000-0002-7380-0477*
Sergey A. Bredikhin: https://orcid.org/0000-0002-6898-0389
Vasily 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

© S.A. Bredikhin, A.N. Martekha, V.V. Toroptsev, Yu.E. Kaverina, I.A. Korotkiy, 2023

Abstract.
The food industry uses sonochemical treatment as part of emulsification, homogenization, and dispersion, as well as to modify viscosity and structure. Starch is one of the most common food ingredients, both as a raw material or a property-modifying additive. The research objective was to study the effect of sonochemical action on the structural and mechanical properties of wheat starch suspensions.
The study involved suspension samples with 10% wheat starch. The suspension samples were treated with ultrasound using an ultrasonic device Volna-M model UZTA-1/22-OM or in an ultrasonic bath (22 kHz; 100, 150, 300, and 400 W). The treatment time was 15 and 30 min. The rheological, physical, and textural properties were recorded according to conventional methods before and after the treatment.
The ultrasonic treatment caused mechanical damage to the starch, making it more accessible to moisture when heated. As a result, the structural, mechanical, and rheological properties of starch suspensions changed. All the studied suspensions had a non-Newtonian character. The ultrasonic treatment increased their consistency coefficient from 28.12 to 152.75 μPa·s. The gelatinization temperature of all experimental starch suspensions dropped from 63.4 to 61.0°C. The short high-power ultrasound treatment reduced the strength of gels to 1.25 N compared to that of native starch gel (4.28 N).
In this research, the ultrasound treatment of wheat starch suspensions modified the structural, mechanical, and rheological profile of starch and proved able to replace some conventional starch modification procedures, i.e., chemical, physical, or enzymatic. The new approach can provide modified starches of a preset quality while reducing energy costs and processing time.

Keywords. Starch, ultrasound, structural and mechanical properties, rheological properties, gelatinization, food industry

For citation: 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

Введение

В пищевой промышленности внимание уделяется созданию методик, обеспечивающих минимальную обработку пищевых продуктов и способных заменить используемые стандартные процедуры консервирования. Результаты исследований свидетельствуют о том, что многие стандартные методы обработки пищевых продуктов могут быть заменены новыми методами: высокое гидростатическое давление, ультразвук, осциллирующее магнитное поле, пульсирующее электрическое поле и электромагнитное излучение. Данная замена будет способствовать улучшению органолептических свойств продуктов, повышению их пищевой ценности и снижению энергозатрат на осуществление технологического процесса при одновременном сокращении его продолжительности.

Характерной особенностью новых методов является то, что обработка материала происходит при комнатной температуре, вызывая небольшое ее повышение, хотя сам процесс длится сравнительно недолго [1–3]. Наряду с изучением возможностей применения высокого давления для сохранения пищевых продуктов результатов достигли исследования метода ультразвуковой обработки с использованием оборудования высокой номинальной мощности. Пищевая продукция, полученная данным методом, является дополнением, а иногда полной

заменой продуктов, произведенных с помощью традиционных процессов обработки [4–6]. Сегодня ультразвук успешно применяется в пищевой промышленности в процессах эмульгирования, гомогенизации, диспергирования и модификации вязкости и текстуры. Проведенные ранее исследования показывают, что ультразвук вызывает изменение физических свойств биологического материала. Поэтому при применении сонохимических методов в пищевой промышленности важно знать поведение отдельных ингредиентов для оценки влияния ультразвуковой обработки на свойства пищевых продуктов и возможности целенаправленно изменять определенные свойства.

Крахмал является одним из наиболее распространенных пищевых ингредиентов, независимо от того, входит ли он в состав сырья или добавляется с целью достижения или улучшения определенных свойств. Благодаря своим уникальным химическим и физическим свойствам, а также пищевой ценности крахмал является важнейшим полисахаридом в рационе человека. Изучая пищевые привычки людей во всем мире, можно отметить, что от 70 до 80 % энергии поступает из различных видов крахмала, поэтому он занимает центральное место в рационе человека. В природе основная функция крахмала – быть резервным источником энергии, но ученые расширили его функцию, выйдя за пределы первоначального назначения.

Крахмал широко применяется в пищевой промышленности в качестве загустителя и желирующего агента, для стабилизации коллоидных систем, удержания влаги, связывания аромата, улучшения качества продукции, а также в производстве 3D-печатных пищевых объектов [7]. Путем выделения крахмала из природных источников, таких как семена и плоды злаков, получают нативный крахмал, сохраняющий свою первоначальную структуру и характеристики. Из-за таких свойств, как ретроградация и нестабильность в кислых условиях, приводящих к синерезису, а также низкой стабильности при высоких температурах и проблем, связанных с клейстеризацией, нативный крахмал имеет ограниченное применение в пищевой промышленности [8]. Путем проведения различных модификаций с использованием химических, физических и ферментативных методов или их комбинации можно получить большое количество модифицированных крахмалов с отличными от нативного свойствами и возможностями применения как в пищевой, так и в других отраслях промышленности [9–11]. Обработка крахмала ультразвуком с применением оборудования большой номинальной мощности может его модифицировать, т. е. влиять на физико-химические свойства. Поэтому целью данного исследования являлось изучение влияния ультразвука при различной частоте, мощности и времени обработки на структурно-механические и реологические свойства суспензий пшеничного крахмала.

Объекты и методы исследования

В данной работе использовался пшеничный крахмал (ООО «Биотехнологии», Россия). Согласно декларации производителя содержание воды составляло 12,60 %, крахмала – 87,40 %, pH 10 %-ной суспензии крахмала – 7.

Приготовление суспензий. 10 %-ную суспензию готовили путем смешивания соответствующего количества порошкообразного пшеничного крахмала с дистиллированной водой. Приготовленные крахмальные суспензии гомогенизировали на магнитной мешалке и обрабатывали ультразвуком (табл. 1). Для определения набухаемости и индекса растворимости крахмалов 2 %-ные суспензии пшеничного крахмала были приготовлены таким же образом.

Обработка суспензии пшеничного крахмала ультразвуковым аппаратом. Ультразвуковой аппарат представляет собой прибор Волна-М модели УЗТА-1/22-ОМ производства ООО «Центр ультразвуковых технологий» (Бийск, Беларусь).

Характеристики данного ультразвукового аппарата: эффективная выходная мощность – 1000 Вт, напряжение 220 В, частота ультразвука – 22 кГц, амплитуда – 12–260 мкм. Приготовленную крахмальную

Таблица 1. Параметры сонохимического воздействия на крахмальную суспензию

Table 1. Parameters of sonochemical effect on starch suspension

Отметка образца	Способ воздействия	Номинальная мощность ультразвука, Вт	Время воздействия, мин
Контроль	Без обработки	–	–
S1	Ультразвуковая ванна	150	15
S2	Ультразвуковая ванна	150	30
S3	Ультразвуковой зонд	100	15
S4	Ультразвуковой зонд	100	30
S5	Ультразвуковой зонд	300	15
S6	Ультразвуковой зонд	300	30
S7	Ультразвуковой зонд	400	15
S8	Ультразвуковой зонд	400	30

суспензию обрабатывали ультразвуковым зондом диаметром 20 мм с выходной мощностью ультразвука 100, 300 и 400 Вт и частотой 22 кГц. Воздействие длилось 15 и 30 мин с постоянным циклом 100 %.

Обработка суспензии пшеничного крахмала в ультразвуковой ванне. Приготовленные крахмальные суспензии объемом 500 мл помещали в ультразвуковую ванну и обрабатывали ультразвуком частотой 22 кГц в течение 15 и 30 мин (образцы S1 и S2 соответственно). Сонохимический преобразователь номинальной мощностью 150 Вт подключали к внешней поверхности ванны, содержащей 500 мл суспензии, которую подвергали непрерывному воздействию ультразвуковых волн от стенки ванны.

Определение интенсивности применяемого ультразвука. Поскольку при ультразвуковой обработке жидкости выделяется тепло, то мониторинг температуры жидкости, в зависимости от времени, приводит к необходимости расчета общей мощности ультразвука (1):

$$P = m \times C_{\text{р}} \times \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

где P – суммарная мощность ультразвукового излучателя, Вт; m – масса обрабатываемой жидкости, г; $C_{\text{р}}$ – удельная теплоемкость жидкости при постоянном давлении, Дж/кг·К; dT/dt – тангенс угла наклона касательной к кривой температурной зависимости в процессе ультразвуковой обработки. Интенсивность ультразвука выражается в Вт на единицу излучающей поверхности или поверхности зонда (Вт/см^2).

Определение реологических свойств крахмальных суспензий. Все измерения реологических свойств проводили на ротационном реометре Rheometer DV3T при температуре 20 °С. На основе измеренных данных (скорость и напряжение сдвига) рассчитали реологические параметры (коэффициент консистенции и индекс текучести) с использованием методов линейной регрессии. Коэффициент согласованности k (Па·с^n) равен антилогарифмическому значению константы линейной регрессии значений напряжения сдвига и скорости сдвига, а показатель текучести соответствует коэффициенту линейной регрессии. Для расчета реологических параметров использовали закон Оствальда де Вилля:

$$\tau = k \times D^n \quad (2)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; k – коэффициент консистенции, Па·с^n; D – скорость сдвига, с$^{-1}$; n – показатель текучести.

Свойства клейстеризации крахмальных суспензий определяли с использованием прибора Микро Виско-Амилограф Brabender (Германия). При определении свойств образцы подвергались нагреву по температурной программе от 30 до 95 °С со скоростью нагрева 7,5 °С/мин. Образцы выдерживали 1 мин при температуре 50 °С и 5 мин при максимальной температуре 95 °С. По полученным кривым определяли значения следующих показателей: температура начала клейстеризации (°С), максимальная вязкость (BU), величина уменьшения вязкости при охлаждении (BU), увеличение вязкости при нагревании (BU).

Определение набухаемости и показателя растворимости пшеничного крахмала. Общее сухое вещество состоит из всего количества вещества из состава пробы, которое не испаряется при определенных условиях. Способность к набуханию (*SP*) и индекс растворимости крахмала (*WS*) определяли с использованием процедуры, определенной по методике [12]. При определении набухаемости и показателя растворимости использовали предварительно приготовленные 2 %-ные суспензии нативного и обработанного ультразвуком крахмала. Температуры, при которых проводились измерения, составляли 25 и 65 °С. Суспензии нагревали при заданных температурах в течение 5 и 15 мин.

Способность к набуханию (*SP*, г гидратированных молекул/г сухого вещества крахмала) рассчитывали по формуле (3):

$$SP = W_{\text{G}} / W_{\text{STG}} \quad (3)$$

где W_{G} – масса геля, г; W_{STG} – масса сухого вещества в геле, г.

Показатель растворимости (*WS*, %), рассчитывали по формуле (4):

$$WS = \left(\frac{W_1}{W_0}\right) \times 100 \quad (4)$$

где W_1 – доля сухого вещества в супернатанте, %; W_0 – доля сухого вещества в исходной суспензии, %.

Определение текстурных свойств суспензий пшеничного крахмала. Текстурные свойства суспензий пшеничного крахмала определяли путем нагревания предварительно приготовленной суспензии крахмала до 80 °С в течение 15 мин на водяной бане при постоянном перемешивании до образования геля. После образования геля образцы быстро охлаждали до комнатной температуры погружением в воду со льдом и хранили при +4 °С до дальнейшего анализа.

Текстурные свойства образовавшихся гелей определяли через 24 ч. Определение прочности геля проводили на анализаторе текстуры Структурометр СТ-2 (ООО «Лаборатория качества», Россия). Скорость измерительного цилиндра 1 мм/с. Глубина внедрения в образец составила 10 мм.

На основании полученных кривых в течение 2-х циклов измерений были рассчитаны текстурные свойства крахмальных гелей: прочность, адгезионная и когезионная способности, эластичность и жесткость.

Статистическая обработка результатов. В рамках статистической обработки и интерпретации полученных результатов был проведен дисперсионный

анализ (ANOVA). Для обработки результатов использовали программное обеспечение SPSS версии 21.0 (SPSS Inc., США). Для сравнения между группами использовали дисперсионный анализ (ANOVA) при уровне значимости 5 %. Результаты интерпретировали так, что статистически незначимые результаты отмечены буквой a, статистически значимые буквой b.

Результаты и их обсуждение

Распространение акустической волны в среде вызывает изменения, наиболее существенными из которых являются нагрев, кавитация, структурные эффекты, сжатие и расширение, турбулентность и др. Из-за указанных изменений возможно избирательное повышение температуры за счет удельного поглощения акустической энергии.

Акустическая кавитация включает в себя образование, рост и резкое схлопывание мелких пузырьков или пустот в жидкости в результате колебаний давления, поскольку каждый элемент объема подвергается воздействию различного давления. Быстрое схлопывание кавитационных пузырьков вызывает высокий градиент давления и высокие локальные ускорения слоев жидкости в окружающей их среде. Это приводит к сдвиговым напряжениям, не оказывающим существенного влияния на малые молекулы, но обладающим способностью разрывать полимерные цепи при условии, что они длиннее определенных предельных значений. Изменения физических (мутность, набухание и растворимость), текстурных и морфологических характеристик суспензий пшеничного крахмала являются результатом механико-химических или сдвиговых напряжений, возникновение которых обусловлено турбулентностью потока из-за акустической кавитации [13, 14]. Скорость и эффективность процесса ультразвуковой модификации крахмалов зависят от применяемой частоты и мощности ультразвука, происхождения крахмала (соотношение амилозы и амилопектина), размера и структуры крахмальных зерен [15–17].

Имплозивное исчезновение пузырьков из-за высоких частот ультразвука представляет собой адиабатический процесс, который приводит к быстрому кратковременному повышению температуры примерно до 5000 °К в газовой фазе при схлопывании пузырьков и выше 1000 °К в тонком слое жидкой фазы вблизи пузырьков [18]. Вышеупомянутое механико-химическое воздействие можно контролировать при помощи изменения интенсивности воздействия ультразвука (табл. 2).

Интенсивность излучаемых ультразвуковых колебаний рассчитывается исходя из избирательного повышения температуры крахмальных суспензий за счет удельного поглощения акустической энергии при ультразвуковой обработке. На основе взаимосвязи между температурой и временем составляется полином второй степени, а коэффициент направления полученной кривой представляет собой отношение dT/dt, необходимое для определения интенсивности воздействия ультразвука.

Влияние ультразвука на реологические свойства. Реологические параметры суспензий пшеничного крахмала адекватно определяются с применением закона Оствальда де Вилля, т. к. коэффициент детерминации высок (от 0,992 до 0,999). По полученным показателям текучести все образцы классифицируются как нестационарные неньютоновские жидкости, а все модельные крахмальные суспензии демонстрируют дилатантный характер ($n > 1$), что соответствует предполагаемому характеру крахмальных суспензий.

Ультразвуковая модификация крахмальных суспензий приводит к изменению реологических свойств пшеничного крахмала (табл. 3, рис. 1 и 2).

Вязкость крахмальной суспензии можно увеличить или уменьшить, применяя подходящую программу ультразвуковой обработки, которая зависит от частоты колебаний, времени обработки и интенсивности. Соотношение амилозы и амилопектина можно рассматривать как один из основных факторов, влияющих на изменение вязкости крахмальных суспензий

Таблица 2. Интенсивность сонохимической обработки крахмальной суспензии

Table 2. Intensity of sonochemical treatment of starch sus

Образец	Начальная температура образца, °C	Температура образца после испытания, °C	Интенсивность применяемого ультразвука, Вт/см^2
Контроль	20,0	20,0	–
S1	20,1	20,8	1,30
S2	20,1	21,7	2,20
S3	19,8	36,7	34,22
S4	19,7	44,3	41,70
S5	20,5	39,4	37,45
S6	10,6	42,0	57,64
S7	10,2	37,8	52,14
S8	10,0	47,0	77,24

Таблица 3. Реологические характеристики крахмальной суспензии при температуре 20 °C

Table 3. Rheological profile of starch suspension at 20°C

Образец	Эффективная вязкость, мПа·с	Коэффициент консистенции, мкПа·с	Индекс текучести	Коэффициент детерминации
Контроль	5,87	14,75	1,832	0,998
S1	5,80	28,12	1,747	0,997
S2	5,78	42,06	1,691	0,997
S3	5,87	69,01	1,621	0,999
S4	5,88	40,45	1,695	0,992
S5	5,98	22,22	1,784	0,995
S6	6,34	47,09	1,686	0,998
S7	5,90	30,96	1,734	0,999
S8	8,67	152,75	1,565	0,999

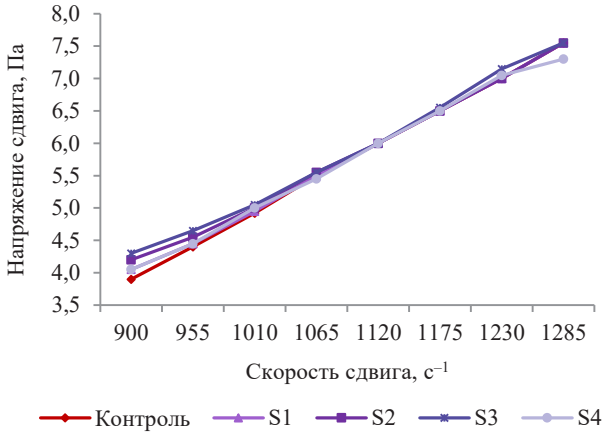

Рисунок 1. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига крахмальной суспензии для образцов S1–S4

Figure 1. Effect of shear rate on shear stress, samples S1–S4

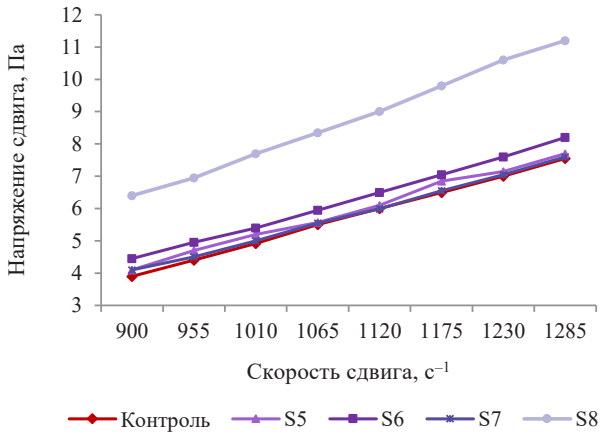

Рисунок 2. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига крахмальной суспензии для образцов S5–S8

Figure 2. Effect of shear rate on shear stress, samples S5–S8

при ультразвуковой модификации [19, 20]. Указанные изменения можно объяснить структурой крахмального зерна. Гранулы крахмала содержат участки средней кристалличности (амилопектин) и аморфные участки (амилоза), в которых полимерные цепи менее упорядочены и более чувствительны к акустической кавитации. Текущие данные указывают на возможность обработки ультразвуком аморфных областей, в то время как компактные кристаллические области с трудом разрушаются ультразвуком. Следствием разложения аморфных областей ультразвуком является увеличение водоудерживающей способности ядра крахмальной гранулы, в результате чего увеличивается вязкость системы. Такие результаты можно объяснить влиянием ультразвука на структуру гранулы крахмала и на структуру самой молекулы крахмала. Проникновение молекул воды в гранулу крахмала облегчается за счет кавитационных сил, создаваемых имплозией кавитации (пузыри). Деполимеризация молекулы крахмала и механические повреждения поверхности, вызванные применением ультразвука, влияют на реологические свойства обработанных суспензий [21, 22]. Схлопывание кавитационных пузырьков вызывает изменения давления и расширяющихся завихрений вблизи гранул. В результате этого возникают силы сдвига, способные создавать зазоры в гранулах крахмала и разрушать полимерные цепи за счет разрыва ковалентных связей. При нарушении кристаллической структуры молекул крахмала молекулы воды связываются со свободными ОН-группами амилозы и амилопектина через водородные связи, что приводит к набуханию [23, 24]. При обработке суспензий пшеничного крахмала в ультразвуковой ванне из-за малой интенсивности ультразвука (1,30–2,20 Вт/см^2) предполагался только его гомогенизирующий эффект. Однако полученные результаты, особенно при более длительной обработке (30 мин – S2), позволяют утверждать, что в крахмальном зерне происходят изменения, влияющие на реологические свойства, т. е. на увеличение вязкости и коэффициента консистенции, по сравнению с суспензиями, приготовленными с нативным пшеничным крахмалом [25, 26].

При обработке крахмальных суспензий в Микро Виско-Амилографе Brabender (рис. 3 и 4, табл. 4,) в результате нагревания в присутствии воды гранулы крахмала превращаются в гель, т. е. гранулы набухают, закристаллизованные части плавятся, а крахмальные цепи гидратируются. Структура изменяется в процессе гелеобразования: плавление кристаллов и расширение двойной спирали, поглощение воды аморфным фоном, изменение фрагментов амилопектина и высвобождение амилозы из гранул [27]. Полученные результаты демонстировали изменение максимальной вязкости и начало клейстеризации суспензий пшеничного крахмала до и после ультразвуковой обработки. Во всех модельных суспензиях наблюдалось увеличение максимальной вязкости. Модельные суспензии, обработанные в ультразвуковой ванне, имели наибольшую максимальную вязкость пшеничного крахмала, а увели-

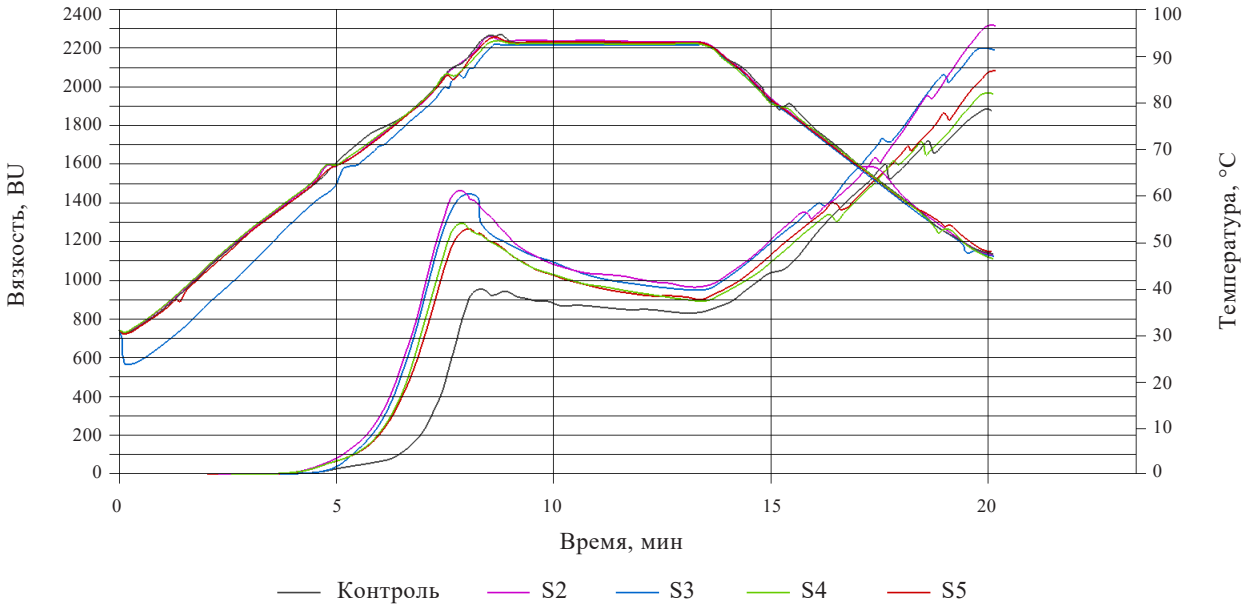

Рисунок 3. Вискограммы нативного (контроль) и обработанного ультразвуком пшеничного крахмала (S1–S4)

Figure 3. Viscograms of native (control) and sonicated wheat starch, samples S1–S4

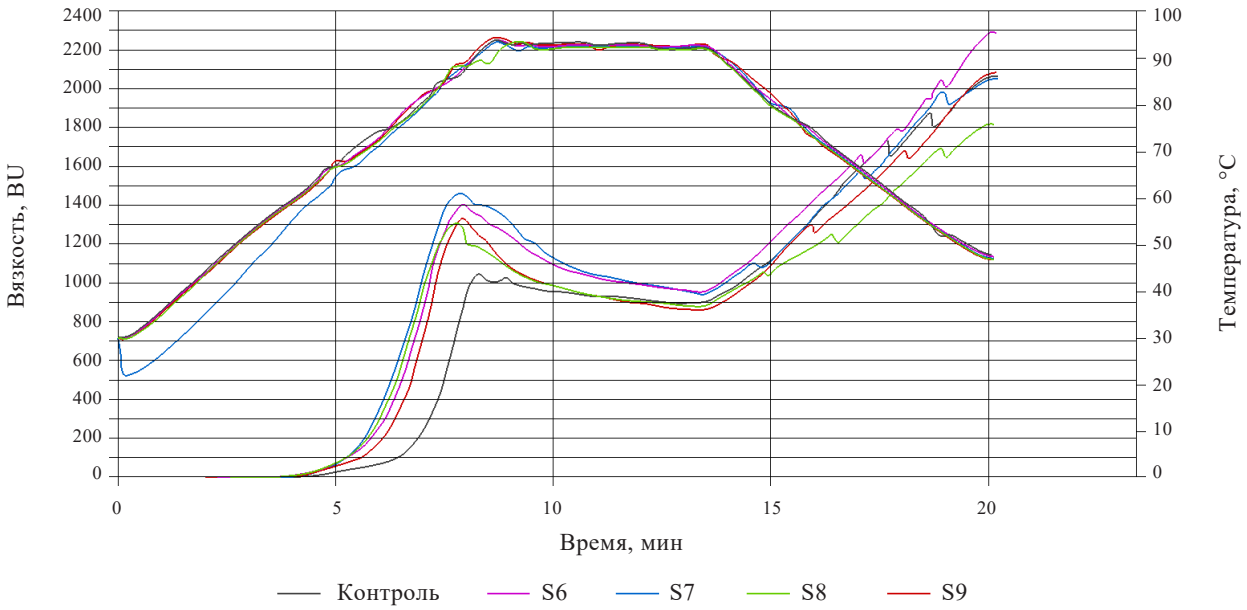

Рисунок 4. Вискограммы нативного (контроль) и обработанного ультразвуком пшеничного крахмала (S5–S8)

Figure 4. Viscograms of native (control) and sonicated wheat starch, samples S5–S8

Таблица 4. Вязкостные характеристики крахмальной суспензии

Table 4. Viscosity profile of starch suspensions

Образец	Максимальная вязкость, BU	Вязкость при охлаждении, BU	Вязкость при нагревании, BU	Температура клейстеризации, °C
Контроль	966	131	897	63,4
S1	1475	504	1093	60,4
S2	1455	499	1062	60,4
S3	1301	398	864	60,3
S4	1273	364	922	60,3
S5	1289	404	991	61,1
S6	1353	476	893	61,1
S7	1220	405	718	61,0
S8	1232	434	939	61,0

чение номинальной мощности ультразвукового излучателя приводило к линейному уменьшению максимальной вязкости. Начало клейстеризации в модельных суспензиях пшеничного крахмала уменьшилось по сравнению с нативным. Снижение начальных температур клейстеризации свидетельствует о более раннем начале стадии набухания гранул при нагревании. Такое поведение связано с увеличением доли аморфных областей в гранулах крахмала при ослаблении и разрушении кристаллических областей в крахмале [28]. Таким образом, установленные эффекты ультразвуковой обработки крахмальных суспензий находятся в соответствии с общим снижением связывающей способности крахмальных цепей, а также с увеличением гидратации крахмальных зерен. Следовательно, процесс клейстеризации может начаться при более низких температурах, а большее набухание гранул приведет к увеличению максимальной вязкости.

Влияние ультразвука на физические свойства. Способность к набуханию и растворимость могут быть изменены ультразвуковой модификацией (рис. 5–8), интенсивность которой зависит от номинальной мощности и источника ультразвука (зонд или ванна), времени обработки и применяемой частоты [29].

Способность к набуханию и показатель растворимости позволяют судить о степени двустороннего взаимодействия цепей крахмала в пределах аморфной и кристаллической областей крахмального зерна. Их взаимодействие определяется соотношением амилозы и амилопектина, содержанием фосфора, их конформацией и степенью разветвленности [30].

Результаты, представленные на рисунках 5–8, показывают тенденцию повышения способности к набуханию и индекса растворимости с увеличением

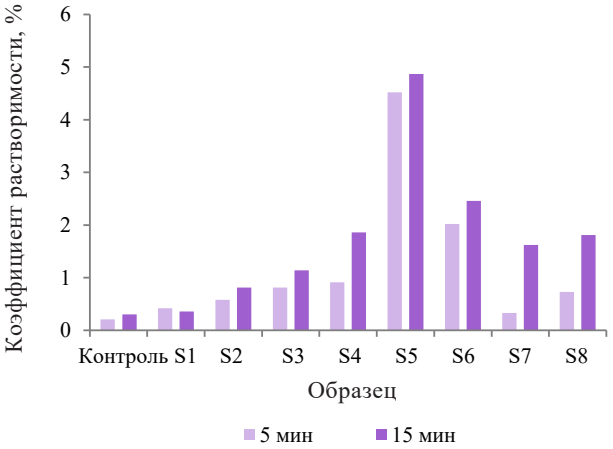

Рисунок 5. Влияние ультразвука на коэффициент растворимости крахмальной суспензии при температуре 25 °C

Figure 5. Effect of ultrasound on solubility coefficient of starch suspensions at 25°C

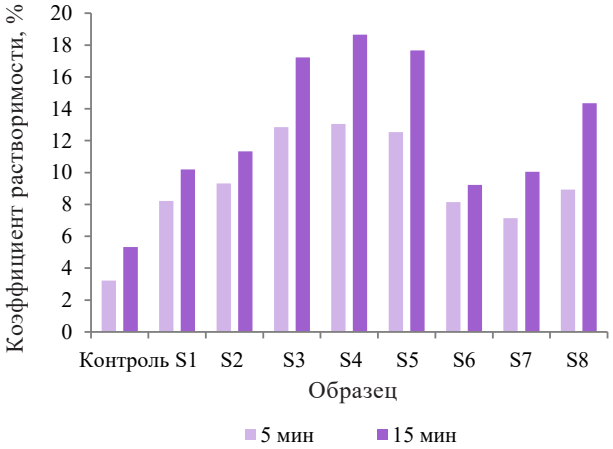

Рисунок 6. Влияние ультразвука на коэффициент растворимости крахмальной суспензии при температуре 65 °C

Figure 6. Effect of ultrasound on solubility coefficient of starch suspensions at 65°C

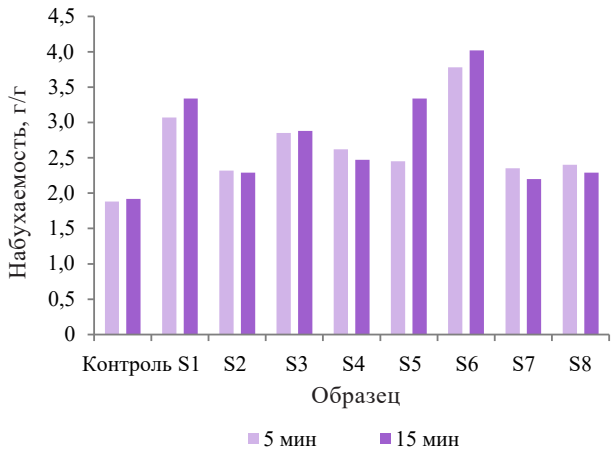

Рисунок 7. Влияние ультразвука на набухаемость крахмальной суспензии при температуре 25 °С

Figure 7. Effect of ultrasound on swelling of starch suspensions at 25°C

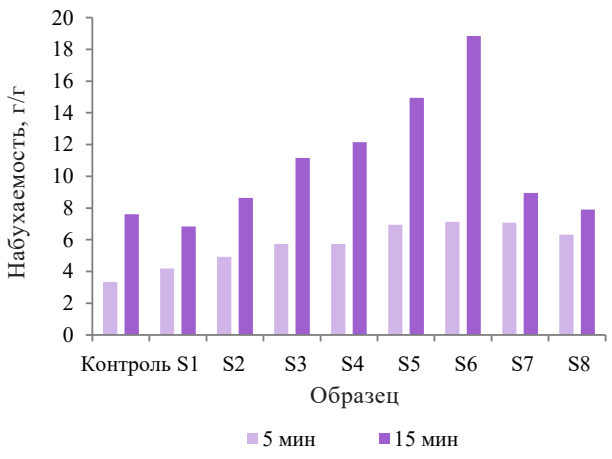

Рисунок 8. Влияние ультразвука на набухаемость крахмальной суспензии при температуре 65 °С

Figure 8. Effect of ultrasound on swelling of starch suspensions at 65°C

времени обработки. Обработка крахмальных суспензий ультразвуком высокой интенсивности приводит к структурной перестройке крахмального зерна. В результате этого происходит взаимное отталкивание крахмальных зерен, способствующее связыванию воды между аморфными участками гранул и последующему увеличению их плотности, способности к набуханию и растворимости [31]. Наибольшее увеличение набухающей способности пшеничного крахмала наблюдалось после обработки ультразвуковым датчиком номинальной мощностью 300 Вт (рис. 6). Повышение растворимости может быть связано с разрывом гликозидных связей в полимерных цепях молекулы крахмала и структурным ослаблением гранулы крахмала из-за обработки ультразвуком. Это соотносится с результатами исследований, показывающих, что увеличение способности к набуханию влечет за собой повышение растворимости [32].

Молекулы амилозы и молекулы с низкой молекулярной массой диффундируют в окружающую среду за счет разрушения структуры гранул крахмала. В результате этого гранулы, демонстрирующие более высокую степень набухания, способны высвобождать большее количество молекул амилозы (рис. 5–8). Кроме того, при увеличении мощности ультразвука повышаются способность к набуханию и индекс растворимости. Увеличение способности к набуханию обработанных ультразвуком крахмалов может быть связано со степенью деградации крахмала, определяющей свойства набухания кукурузного крахмала. Это объясняется разрушением аморфных слоев, которые дестабилизируют кристаллический слой, тем самым увеличивая гидратацию и набухание крахмала.

Влияние ультразвука на текстурные свойства. Текстурные свойства крахмальных гелей изменяются в зависимости от мощности и частоты колебаний применяемого ультразвука, а также времени обработки крахмальных суспензий (табл. 5, рис. 9).

Прочность гелей пшеничного крахмала после обработки суспензий ультразвуком (ультразвуковая ванна и ультразвуковой датчик) в течение 30 мин вызывала повышение прочности образованных гелей по сравнению с нативным крахмалом. Прочность геля крахмала обусловлена его ретроградацией, связанной с синерезисом воды и амилопектина. Высокая прочность гелей является следствием высокой доли амилозы и длинных цепей амилопектина, а также способностью молекул амилозы образовывать «сеть», которая удерживает молекулы воды в геле. Молекулы амилозы соединяются в структуру двойной спирали, а молекулы амилопектина соединены друг с другом посредством коротких внешних цепей [33]. При применении ультразвука высокой мощности в течение более короткого периода обработки (15 мин – образцы S1, S3 и S7) прочность сформированных гелей оказалась ниже, чем прочность геля нативного крахмала (рис. 9, табл. 3). Это можно объяснить деградацией молекулы крахмала за счет разрушения и перемещения цепей амилозы и амилопектина, в то время как применение гораздо более высокой мощности ультразвуковой обработки (400 Вт) еще больше разрушит гранулы крахмала, а повреждение вызовет снижение потенциала образования геля (S7 и S8).

Адгезионная способность крахмальных гелей, обработанных ультразвуком, обычно ниже, чем у гелей нативного крахмала. Исключением являются гели, обработанные ультразвуком мощностью

Таблица 5. Текстурные параметры крахмальной суспензии

Table 5. Textural profile of starch suspensions

Образец	Прочность, Н	Адгезионная способность, Н/мм	Когезионная способность	Эластичность	Жесткость
Контроль	4,28 ± 0,11[a]	1,228 ± 0,090[a]	0,333 ± 0,080[a]	0,931 ± 0,080[a]	1,418 ± 0,050[a]
S1	3,11 ± 0,10[b]	1,164 ± 0,080[a]	0,434 ± 0,060[b]	0,977 ± 0,070[a]	1,343 ± 0,040[a]
S2	7,44 ± 0,10[c]	0,923 ± 0,070[b]	0,788 ± 0,050[b]	0,996 ± 0,060[a]	5,848 ± 0,040[b]
S3	2,56 ± 0,10[b]	1,064 ± 0,080[a]	0,382 ± 0,060[a]	0,933 ± 0,070[a]	0,973 ± 0,030[b]
S4	8,30 ± 0,11[b]	1,373 ± 0,080[a]	0,267 ± 0,060[a]	0,941 ± 0,080[a]	2,208 ± 0,050[b]
S5	4,72 ± 0,12[a]	1,249 ± 0,090[a]	0,222 ± 0,060[b]	0,933 ± 0,070[a]	1,042 ± 0,060[b]
S6	9,85 ± 0,11[b]	1,271 ± 0,070[a]	0,684 ± 0,060[b]	1,002 ± 0,060[b]	6,726 ± 0,040[b]
S7	1,25 ± 0,11[b]	0,856 ± 0,070[b]	0,440 ± 0,090[b]	0,954 ± 0,070[a]	0,548 ± 0,060[b]
S8	0,92 ± 0,10[b]	0,720 ± 0,070[b]	0,599 ± 0,090[b]	0,980 ± 0,100[a]	0,550 ± 0,070[b]

*Результаты представлены как среднее значение двух определений ± стандартное отклонение.

*The results are presented as the mean of two determinations ± standard deviation.

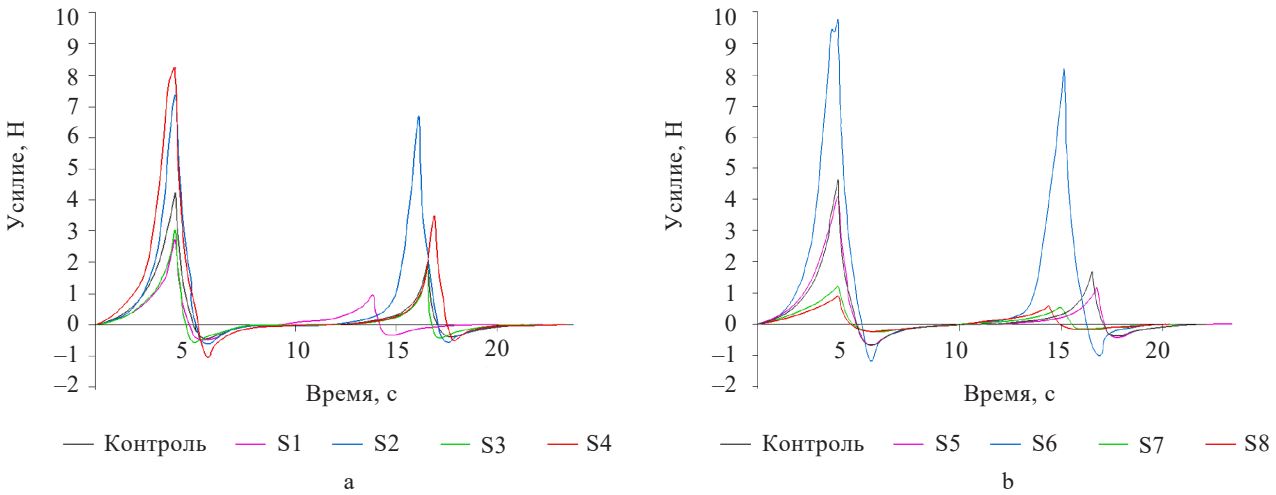

Рисунок 9. Анализ текстурных свойств геля пшеничного крахмала до (a) и после (b) обработки ультразвуком

Figure 9. Textural properties of wheat starch gel before (a) and after (b) sonication

100 Вт/30 мин (S4), 300 Вт/15 мин (S5) и 300 Вт/30 мин (S6). Когезионная способность, показывающая, насколько эффективнее крахмальный гель оказывает сопротивление повторному воздействию на него, была выше у гелей, подвергавшихся более длительной ультразвуковой обработке (S2, S6 и S8) по сравнению с нативным образцом. Наибольшее влияние на когезионную способность крахмальных гелей оказала обработка 30 мин в ультразвуковой ванне (S2). Эластичность всех образовавшихся гелей после обработки ультразвуком была выше, чем у гелей нативного крахмала. Наибольшую эластичность и эластичность показали образцы S6.

Выводы

Результаты работы показали, что обработка суспензии пшеничного крахмала ультразвуком высокой интенсивности вызывает механическое повреждение крахмального зерна, делая его внутреннюю часть более доступной для влаги при нагревании. Это приводит к изменению структурно-механических и реологических свойств крахмальных суспензий. Установлено, что интенсивность изменения реологических и теплофизических свойств зависит от частоты, времени обработки и интенсивности применяемого ультразвука. Ультразвуковая обработка вызывает увеличение коэффициента консистенции всех испытанных систем и снижение температуры клейстеризации всех крахмальных суспензий. Снижение начальных температур клейстеризации свидетельствует о более ранней стадии набухания гранул при нагревании.

Полученные результаты обозначили тенденцию к улучшению набухаемости и повышению показателя растворимости с увеличением времени обработки и номинальной мощности ультразвука. Наибольшее увеличение набухаемости и показателя растворимости пшеничного крахмала наблюдалось

после обработки ультразвуковым зондом номинальной мощностью 300 Вт. Дальнейшее увеличение мощности ультразвука снижает растворимость и набухаемость пшеничного крахмала. Прочность гелей пшеничного крахмала после обработки суспензий ультразвуком в течение 30 мин выше, чем у нативного крахмала, а при обработке в течение 15 мин ниже, чем у гелей, приготовленных с использованием нативного крахмала. Другие исследованные текстурные свойства (адгезионная и когезионная способности, эластичность и жесткость) были выше у обработанных ультразвуком крахмальных гелей по сравнению с нативным образцом.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что обработка суспензий пшеничного крахмала ультразвуком высокой интенсивности с целью модификации его структурно-механических и реологических свойств может заменить некоторые применяемые процедуры модификации крахмала (химические, физические и ферментативные). Это позволит получать модифицированные крахмалы заданного качества при одновременном сокращении продолжительности технологического процесса и снижении энергозатрат на его осуществление.

Критерии авторства

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

S.A. Bredikhin supervised the research. Other authors performed the experiments, processed the obtained data, and wrote the manuscript.

Conflict of interest

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

References/Список литературы

1. Vela AJ, Villanueva M, Li C, Hamaker B, Ronda F. Ultrasound treatments of tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter] flour rupture starch α-(1,4) bonds and fragment amylose with modification of gelatinization properties. LWT. 2023;174. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114463

2. Eremeeva NB, Makarova NV, Zhidkova EM, Maximova VP, Lesova EA. Ultrasonic and microwave activation of raspberry extract: antioxidant and anti-carcinogenic properties. Foods and Raw Materials. 2019;7(2):264–273. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-264-273

3. Ermolaev VA, Prosekov AYu. Vacuum technologies of milk-protein concentrates. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat; 2010. 211 p. (In Russ.). [Ермолаев В. А., Просеков А. Ю. Вакуумные технологии молочно-белковых концентратов. Кемерово: Кузбассвузиздат, 2010. 211 с.]. https://elibrary.ru/QNHYGD

4. Shi M, Wang F, Lan P, Zhang Y, Zhang M, Yan Y, *et al.* Effect of ultrasonic intensity on structure and properties of wheat starch-monoglyceride complex and its influence on quality of norther-style Chinese steamed bread. LWT. 2021;138. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110677

5. Li S, Li Q, Zhu F, Song H, Wang C, Guan X. Effect of vacuum combined ultrasound treatment on the fine structure and physiochemical properties of rice starch. Food Hydrocolloids. 2022;124. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107198

6. Tang J, Liang Q, Ren X, Raza H, Ma H. Insights into ultrasound-induced starch-lipid complexes to understand physicochemical and nutritional interventions. International Journal of Biological Macromolecules. 2022;222:950–960. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.242

7. Zhang J, Li Y, Cai Y, Ahmad I, Zhang A, Ding Y, *et al.* Hot extrusion 3D printing technologies based on starchy food: A review. Carbohydrate Polymers. 2022;294. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119763

8. Zhuang J, Liu H, You L, Xu F, Zeng H, Zeng S. Influence of ultrasonic-microwave power on the structure and *in vitro* digestibility of lotus seed starch-glycerin monostearin complexes after retrogradation. International Journal of Biological Macromolecules. 2023;228:59–67. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.188

9. Navikaite-Snipaitiene V, Rosliuk D, Almonaityte K, Rutkaite R, Vaskeliene V, Raisutis R. Ultrasound-activated modified starch microgranules for removal of ibuprofen from aqueous media. Starch – Stärke. 2022;74(5–6). https://doi.org/10.1002/star.202100261

10. Rahaman A, Kumari A, Zeng X-A, Farooq MA, Siddique R, Khalifa I, *et al.* Ultrasound based modification and structural-functional analysis of corn and cassava starch. Ultrasonics Sonochemistry. 2021;80. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105795

11. Almeida RLJ, Santos NC, dos Santos Pereira T, Monteiro SS, da Silva LRI, da Silva Eduardo R, *et al.* Extraction and modification of Achachairu's seed (*Garcinia humilis*) starch using high-intensity low-frequency ultrasound. Journal of Food Process Engineering. 2022;45(5). https://doi.org/10.1111/jfpe.14022

12. Chang Y-H, Lin J-H, Chang S-Y. Physicochemical properties of waxy and normal corn starches treated in different anhydrous alcohols with hydrochloric acid. Food Hydrocolloids. 2006;20(2–3):332–339. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.02.024

13. Jamalabadi M, Saremnezhad S, Bahrami A, Jafari SM. The influence of bath and probe sonication on the physicochemical and microstructural properties of wheat starch. Food Science and Nutrition. 2019;7(7):2427–2435. https://doi.org/10.1002/fsn3.1111

14. Bredihin SA, Andreev VN, Martekha AN, Schenzle MG, Korotkiy IA. Erosion potential of ultrasonic food processing. Foods and Raw Materials. 2021;9(2):335–344. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-335-344

15. Abedi E, Pourmohammadi K, Jahromi M, Niakousari M, Torri L. The effect of ultrasonic probe size for effective ultrasound-assisted pregelatinized starch. Food and Bioprocess Technology. 2019;12:1852–1862. https://doi.org/10.1007/s11947-019-02347-2

16. Sun Y, Yang Y, Zheng L, Zheng X, Xiao D, Wang S, *et al.* Physicochemical, structural, and digestive properties of banana starch modified by ultrasound and resveratrol treatments. Foods. 2022;11(22). https://doi.org/10.3390/foods11223741

17. Wang L, Wang M, Zhou Y, Wu Y, Ouyang J. Influence of ultrasound and microwave treatments on the structural and thermal properties of normal maize starch and potato starch: A comparative study. Food Chemistry. 2022;377. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131990

18. Luo J, Xu W, Li R. Collapse of cavitation bubbles near air bubbles. Journal of Hydrodynamics. 2020;32(5):929–941. https://doi.org/10.1007/s42241-019-0061-x

19. Shang L, Wu C, Wang S, Wei X, Li B, Li J. The influence of amylose and amylopectin on water retention capacity and texture properties of frozen-thawed konjac glucomannan gel. Food Hydrocolloids. 2021;113. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106521

20. Zhang Y, Li B, Zhang Y, Xu F, Zhu K, Li S, *et al.* Effect of degree of polymerization of amylopectin on the gelatinization properties of jackfruit seed starch. Food Chemistry. 2019;289:152–159. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.033

21. Golkar A, Milani JM, Motamedzadeghan A, Kenari RE. Physicochemical, structural, and rheological characteristics of corn starch after thermal-ultrasound processing. Food Science and Technology International. 2021;29(2). https://doi.org/10.1177/10820132211069242

22. Bredikhin SA, Andreev VN, Martekha AN, Soldusova EA. Investigation of the process of structure formation during ultrasonic homogenization of milk. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;954. https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012014

23. Pan B, Tao J, Bao X, Xiao J, Liu H, Zhao X, *et al.* Quantitative study of starch swelling capacity during gelatinization with an efficient automatic segmentation methodology. Carbohydrate Polymers. 2021;255. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117372

24. Joyner HS, Wicklund RA, Templeton CM, Howarth LG, Wong S-S, Anvari M, *et al.* Development of starch texture rheological maps through empirical modeling of starch swelling behavior. Food Hydrocolloids. 2021;120. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106920

25. 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. https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012089

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. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2402

27. Schmidt C, Brunner M, Berger C, Zahn S, Rohm H. Solubility and swelling of soils from native starch. International Journal of Food Science and Technology. 2022;57(10):6755–6762. https://doi.org/10.1111/ijfs.15911

28. Samarakoon ERJ. Impact of physical modifications on starch nutritional fractions: Rapidly Digestible Starch, Slowly Digestible Starch and Resistant Starch. Journal of Food Bioactives. 2020;12:106–121. https://doi.org/10.31665/JFB.2020.12249

29. Liu Y, Li M, Zhu C, Wei M. Effect of synergic pretreatment with ultrasound and alkaline hydrogen peroxide on enzymolysis and physicochemical properties of corn starch. Biomass Conversion and Biorefinery. 2021;13:12667–12678. https://doi.org/10.1007/s13399-021-02095-4

30. Sun J, Sun L, Chen X, Raza H, Wu G, Liang Q, *et al.* Characterization of arrowhead-derived type 3 resistant starch prepared by ultrasound-assisted α-amylase degradation. Journal of Food Quality. 2023;2023. https://doi.org/10.1155/2023/2301485

31. Liu Z, Tian S, Lv C, Chen Z. Preparation and physicochemical properties of *Cyperus esculentus* starch from its tubers using ultrasound-assisted alkali method. BioResources. 2022;18(1):60–72. https://doi.org/10.15376/biores.18.1.60-72

32. Zhou Y, Wang M, Wang L, Liu L, Wu Y, Ouyang J. Comparison of the effect of ultrasound and microwave on the functional properties and in vitro digestibility of normal maize starch and potato starch. Journal of Food Process Engineering. 2022;46(2). https://doi.org/10.1111/jfpe.14222

33. Kaur B, Venkatrao KB, Panesar PS. Chopra HK, Anal AK. Optimization of ultrasound-assisted enzymatic extraction of resistant starch from green banana peels and its structural characterization. Journal of Food Science and Technology. 2022;59(12):4663–4672. https://doi.org/10.1007/s13197-022-05546-6

34. Zeng L, Zhang L, Li K, He J, Xin H, Wang Q. Effect of gelatinization processing on the antioxidant, digestion, and physicochemical properties of wheat starch enhanced with tannic acid. LWT. 2020;125. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109228