

Процессы и аппараты пищевых производств

Processes and devices for food production

DOI: <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-17-23>

Оригинальная статья/Research article

УДК 664.681

Open Access

Available online at vestnik-vsuet.ru

Формирование структуры дисперсных систем в неравновесном состоянии в условиях совмещения двух видов кавитационных воздействий

Михаил А. Талейсник	¹	mki.niikp@mail.ru	 0000-0002-6289-8456
Лариса М. Аксенова	²	mki.niikp@mail.ru	
Антон И. Акимов	¹	akian02@mail.ru	 0000-0002-7784-4661
Инесса И. Мизинчикова	¹	mki.niikp@mail.ru	 0000-0002-6703-5270
Михаил А. Пестерев	¹	mb-niikp@mail.ru	 0000-0002-0980-1862

¹ ВНИИ КП – филиал «Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, ул. Электроводская, 20 стр.3, г. Москва, 107023, Россия

² Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, ул. Талалихина, 26, г. Москва, 109316, Россия

Аннотация. Приведено описание существующего способа получения инвертного сиропа стадийно в большом объеме в условиях использования одного вида потока энергии. Целью настоящей работы является разработка принципов перехода от макростатического равновесия к разработке каждого микростатического объема жидких дисперсных систем в процессе их получения в условиях неравновесного состояния, создаваемого совмещением двух видов кавитационных воздействий: гидродинамического и акустического воздействия. Описаны свойства дисперсных систем и выбран объект исследований – инвертный сироп с количеством сухих 80% и редуцирующих 79-80% веществ. Инвертный сироп со 100% инверсией сахарозы на глюкозу и фруктозу широко применяется при производстве мучных кондитерских изделий и ряда пастило-мармеладных изделий. Установлены принципы образования агрегатов из молекул сахарозы на стадии растворения сахара, образование пустот и зарождение пузырьков газовой фазы. Рассмотрены условия создания неравновесного состояния сиропа в условиях использования двух видов потоков энергии, путем совмещения гидродинамической и акустической кавитации. Показан характер преобразования состояния пузырьков в условиях изменения геометрии потока газожидкостных систем и возбуждением в них звуковых колебаний. Описан механизм структурообразования газо-жидкостной системы в условиях влияния акустических колебаний на структуру. Показан характер превращения высококонцентрированных газожидкостных систем после схлопывания пузырьков газовой фазы, что явилось определяющим фактором образования новых видов материалов. Практическим выходом настоящей работы явилось создание инвертного сиропа со 100% содержанием фруктозы и глюкозы в сухих веществах. Получение эмульсии для мучных кондитерских изделий, и мармелада на основе свежих фруктов и овощей. Эффективность совмещения двух видов кавитационного воздействия открывает перспективу создания новых видов кондитерских изделий с принципиально новыми свойствами, с сохранением нативных витаминов и микроэлементов.

Ключевые слова: жидкие среды, инвертный сироп, кавитация, сжимаемость, селективность, микроскопический уровень, модифицированные свойства

Formation of structure of disperse systems in non-equilibrium state under conditions of combination of two types of cavitation effects

Mikhail A. Taleysnik	¹	mki.niikp@mail.ru	 0000-0002-6289-8456
Larisa M. Aksenova	²	mki.niikp@mail.ru	
Anton I. Akimov	¹	akian02@mail.ru	 0000-0002-7784-4661
Inessa I. Mizinchikova	¹	mki.niikp@mail.ru	 0000-0002-6703-5270
Mikhail A. Pesterev	¹	mb-niikp@mail.ru	 0000-0002-0980-1862

¹ All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry - Branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food System of RAS, Elektrovodskaya, 20, Moscow, 107023, Russia

² V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food System of RAS, Talalikhina, 26, Moscow, 109316, Russia

Abstract. The description of the existing method for producing invert syrup in stages in a large volume under the conditions of using one type of energy flow is given. The purpose of this work is to develop the principles of transition from macrostatic equilibrium to the development of each microstatic volume of liquid dispersed systems in the process of their production in a non-equilibrium state created by the combination of two types of cavitation effects: hydrodynamic and acoustic effects. The properties of dispersed systems are described and the object of research is invert syrup with the amount of dry 80% and reducing 79-80% substances. Invert syrup with 100% inversion of sucrose to glucose and fructose is widely used in the production of flour confectionery and a number of pastille and marmalade products. The principles of formation of aggregates from sucrose molecules at the stage of sugar dissolution, the formation of voids and the nucleation of gas phase bubbles are established. The conditions for creating a non-equilibrium state of syrup under the conditions of using two types of energy flows, by combining hydrodynamic and acoustic cavitation, are considered. The character of the transformation of the state of bubbles under conditions of changing the flow geometry of gas-liquid systems and the excitation of sound vibrations in them is shown. The mechanism of structure formation of a gas-liquid system under the influence of acoustic vibrations on the structure is described. The character of transformation of highly concentrated gas-liquid systems after the collapse of gas phase bubbles is shown, which was the determining factor in the formation of new types of materials. The practical output of this work was the creation of invert syrup with 100% fructose and glucose content in dry substances. Preparation of an emulsion for flour confectionery products and marmalade based on fresh fruits and vegetables. The effectiveness of combining two types of cavitation exposure opens up the prospect of creating new types of confectionery products with fundamentally new properties, while preserving native vitamins and nutrients.

Keywords: liquid media, invert syrup, cavitation, compressibility, selectivity, microscopic level, modified properties

Для цитирования
Талейсник М.А., Аксенова Л.М., Акимов А.И., Мизинчикова И.И., Пестерев М.А. Формирование структуры дисперсных систем в неравновесном состоянии в условиях совмещения двух видов кавитационных воздействий // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 4. С. 17–23.
doi:10.20914/2310-1202-2020-4-17-23

For citation
Taleysnik M.A., Aksenova L.M., Akimov A.I., Mizinchikova I.I., Pesterev M.A. Formation of structure of disperse systems in non-equilibrium state under conditions of combination of two types of cavitation effects. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 4. pp. 17–23. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-4-17-23

Введение

В кондитерской промышленности нашли широкое применение высококонцентрированные жидкие дисперсные системы с количеством сухих веществ не менее 70%, и с полным отсутствием трансляционного движения: сахарные и инвертные сиропы, различные эмульсии и суспензии [1]. Отличительной их особенностью является большое количество агрегатов из твердых частиц с высокой дисперсностью, окруженных оболочками из дисперсионной среды. За счет возникновения молекулярного силового поля на границе раздела фаз, монослой оболочки, приобретающий специфические модифицированные свойства, прочно удерживается на всей поверхности данных частиц [1].

Определяющим фактором образования агрегатов из частиц дисперсной фазы является возникновение молекулярных сил сцепления между ними [2].

В существующих традиционных технологиях производства пищевых масс, в частности кондитерских, образование жидких дисперсных систем осуществляется в большом объеме с подводом одного вида потока энергии. И технологические процессы осуществляются настолько медленно, что в каждый момент времени в системе устанавливается некоторое равновесное макроскопическое состояние, и данное состояние можно контролировать температурой, плотностью или молярной концентрацией. Поэтому макроскопическое равновесие во всем технологическом объеме достигается за весьма продолжительное время.

Более того, биологические свойства обрабатываемой среды могут ухудшиться из-за чрезмерной продолжительной термической обработки.

Работами института доказана эффективность получения жидких дисперсных систем в динамических условиях созданием неравновесного состояния за счет подачи двух видов потока энергии, путем совмещения гидродинамической и акустической кавитации [3].

В настоящей работе отражены пути решения данной проблемы с учетом особенностей структурообразования используемых жидкостных высококонцентрированных дисперсных систем.

Цель работы – разработка принципов перехода от макростатического равновесия к разработке каждого микростатического объема жидких дисперсных систем в процессе их получения в условиях неравновесного состояния, создаваемого совмещением двух видов кавитационных воздействий.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований выбран инвертный сироп с количеством сухих 80% и редуцирующих 79–80% веществ. Инвертный сироп со 100% инверсией сахарозы на глюкозу и фруктозу широко применяется при производстве мучных кондитерских изделий и ряда пастило-мармеладных изделий. Данный сироп относится к одной из простейших макромолекулярных сред, где процессы образования структур могут проявляться наиболее простым образом.

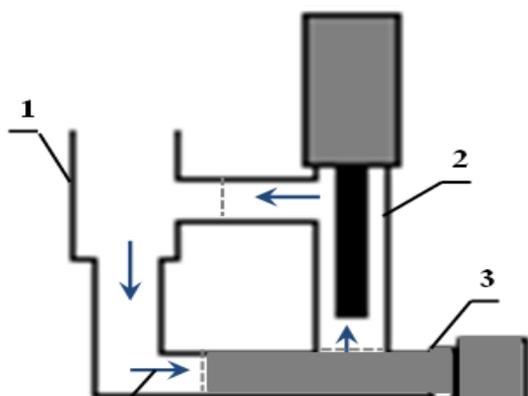
На начальных стадиях технологии инвертного сиропа в процессе нагревания сахарного сиропа до 90°С, в варочном котле в статическом состоянии, при растворении сахара образуется большое количество частиц дисперсной фазы с образованием водных оболочек вокруг них. Прочное сцепление оболочек с частицами на границе раздела фаз, можно объяснить возникновением в монослой оболочки молекулярного силового поля. Работами академика П.А. Ребиндера и его школой доказано своеобразие свойства тончайшего монослоя образовавшихся оболочек дисперсионной среды, которое заключается в удержании влаги за счет молекулярного силового поля, всегда возникающего вследствие некомпенсированности молекулярных сил в междуфазном поверхностном слое [4, 5]. Также своеобразие монослоя заключается в том, что влага находится в уплотненном состоянии, имеет плотность больше единицы и не растворяет обычно растворимые вещества (соль, сахар).

В процессе нагревания сиропа и постоянного повышения количества фруктозы и глюкозы при инверсии сахарозы создаются наиболее благоприятные условия для максимального сближения частиц дисперсной фазы, которые при разрыве оболочек сцепляются с образованием агрегатов из молекул сахарозы различной пространственной формы и размеров (молекулярный размер сахарозы приблизительно равен 1 нм).

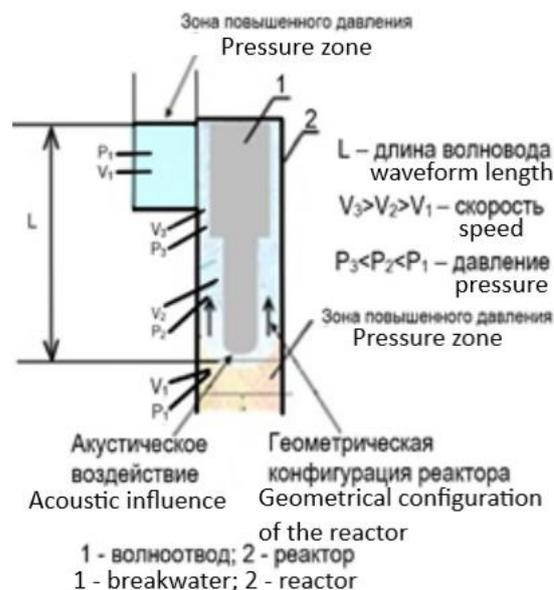
Также установлено, что по углам и ребрам образовавшихся частиц дисперсной фазы, возникают молекулярные силы сцепления, в которых молекулярные силы и потенциальная энергия достигает своих локальных максимумов [6]. В образовавшихся агрегатах из-за уплотнения содержания частиц дисперсной фазы удельная поверхность агрегата значительно меньше, чем суммарная поверхность частиц его образующих. В связи с содержанием сухих веществ в сиропе, порядка 80%, образуется большое количество агрегатов из высокодисперсных частиц дисперсной фазы. При этом суммарная удельная поверхность данных агрегатов значительно снижается в сиропе, что обеспечивает образование значительного количества пустот. Такие пустоты с содержанием газовой фазы, по своей физической сути являются кавитационными зародышами, чьи физические характеристики могут меняться с течением времени. Аналогично, при получении эмульсии с влажностью от 25–32% на начальной стадии по мере повышения плотности также обеспечивается зарождение большого количества пузырьков воздуха.

Таким образом, установлено, что жидкие дисперсные системы с содержанием сухих веществ свыше 70% сжимаемы, и, как правило, содержат большое количество зародышей пузырьков воздуха [7]. После максимально возможного растворения сахара и образования газожидкостной системы (ЖДС)

с большим количеством агрегатов из молекул сахарозы, дальнейшая её инверсия будет осуществляться в условиях создания динамического и неравновесного состояния сиропа. Такое состояние достигается путём установки реактора на продуктивном трубопроводе лабораторной кавитационной установки (рисунок 1, а).



1 – приемная емкость, 2 – реактор, 3 – насос
1 – receiving capacity, 2 – reactor, 3 – pump



(a)

(b)

Рисунок 1. Принципиальная схема кавитационной установки (а), принципиальная схема реактора кавитационной установки (b)

Figure 1. Schematic diagram of cavitation plant (a), schematic diagram of cavitation plant reactor (b)

В реакторе при температуре порядка 95°C инверсия сахарозы осуществляется в условиях подвода двух видов потоков энергии – совмещения гидродинамической и акустической кавитации (рисунок 1, b). Получение инвертного сиропа обеспечивается многократным прохождением реактора в режиме рециркуляции [8].

и происходит накопление поверхностной потенциальной энергии.

При переходе от макроскопического к микроскопическому уровню получения газожидкостных систем становится возможным управление различными технологическими потоками. В настоящей работе такое управление обеспечивается совмещением быстрых и медленных гидродинамических процессов [9]. Данные процессы могут быть организованы заданным образом в потоке ЖДС на лабораторной кавитационной установке, в реакторе которой обеспечивается совмещение двух видов кавитационных воздействий – гидродинамического медленного и акустического быстрого. В установке ЖДС из приемной емкости по трубопроводам насосом прокачивается через реактор, который создается путем установки в трубопроводе волновода созданием узкого зазора между ними около 3 мм.

При наличии акустической кавитации с высокочастотным колебанием волновода порядка 24 кГц обеспечивается волнообразное движение потока в вертикальном направлении при одновременном образовании сложного турбулентного движения (рисунок 2) [2, 5].

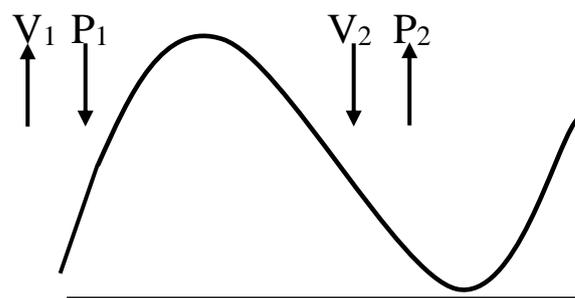


Рисунок 2. Схема цикла колебаний пузырька газовой фазы в условиях акустической кавитации
 $V_1 > V_2$; $P_1 < P_2$.

V_1, P_1 скорость и давление на подъеме волны
 V_2, P_2 скорость и давление на спуске волны

Figure 2. Scheme of gas phase bubble oscillation cycle under conditions of acoustic cavitation

V_1, P_1 speed and pressure at wave rise
 V_2, P_2 speed and pressure at wave descent

Создаются условия гидродинамической кавитации (ГДК). В соответствии с законом гидродинамики, при резком увеличении скорости потока и частичным нарушением сплошности твердых частиц, происходит значительное падение давления [9, 10]. При этом значительно увеличивается объём газовых пузырьков

Из-за резкого увеличения скорости движения и понижения давления в цикле колебаний кавитационного пузырька на подъеме волны, дополнительно увеличивается его объем, т. к. создается кратковременное разрежение и дальнейшее аккумулярование поверхностной энергии.

Далее на спуске волны давление резко возрастает. В условиях деформационных процессов пузырьки сжимаются, и при схлопывании происходит выброс энергии с образованием ударной волны, вызывающей максимальное диспергирование агрегатов из частиц твердой фазы. На выходе из реактора при повышении давления оставшиеся пузырьки схлопываются с выделением запасенной энергии и с дополнительным разрушением агрегатов. Такое селективное воздействие способно инициировать различные кинетические реакции, меняющие структуру среды в т. ч. с образованием материалов с новыми свойствами [12].

Например, в процессе схлопывания пузырька, по нашему мнению, количество выделяющейся энергии может оказаться достаточным для диссоциации молекул воды [13]. Можно предположить, что в результате этого произойдет образование новых свойств пищевых продуктов, на основе фруктозы и глюкозы, образовавшихся ранее на стадии инверсии сахарозы

Результаты и обсуждение

В настоящее время технически сочетание гидродинамических и акустических эффектов, при которых инициируется протекание физико-химических процессов, как было указано выше, реализуется на лабораторной кавитационной установке, обеспечивающей максимальное накопление энергии и ее высвобождение с интенсивным технологическим эффектом (рисунок 3) [14].



Рисунок 3. Лабораторная кавитационная установка – здесь осуществляется распределение скорости потока и распределение давления

Figure 3. Laboratory cavitation plant – flow rate distribution and pressure distribution are performed here

Эффективность совмещения акустического и гидродинамического воздействия обеспечила 100% инверсию сахарозы на фруктозу и глюкозу, с ускорением технологического процесса по сравнению с классической технологией (рисунок 4).

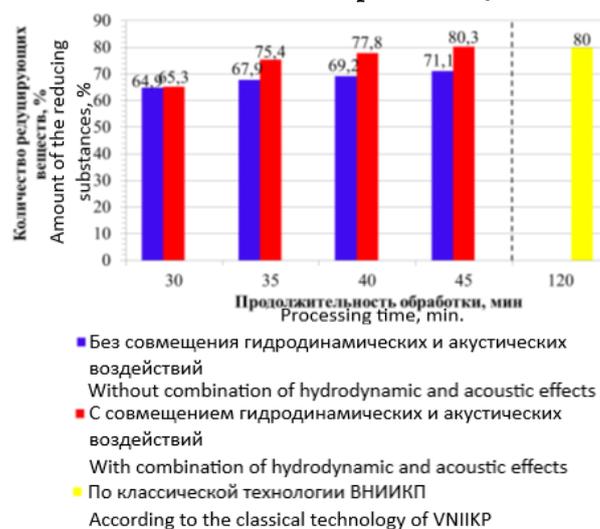


Рисунок 4. Инвертный сироп, приготовленный различными технологиями

Figure 4. Invert syrup prepared by various technologies

Показано, что совмещение быстрых акустических и медленных гидродинамических воздействий позволяет управлять процессами структурообразования в пищевых средах, в которых определяющим фактором является контактное взаимодействие частиц дисперсной фазы [15]. Образование максимально возможного количества частиц с минимальным расстоянием между ними обеспечивает получение высококонцентрированной устойчивой структуры и как следствие увеличение сроков хранения инвертного сиропа (практически до двух лет).

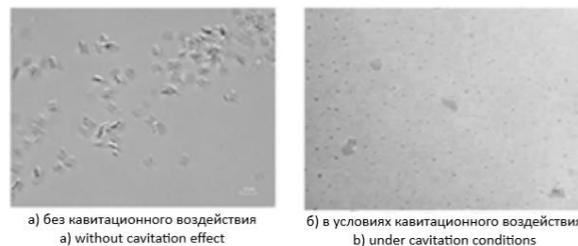


Рисунок 5. Микрофото инвертного сиропа

Figure 5. Micro-photos of invert syrup

По ранней технологии, разработанной ВНИИКП, минимальные размеры агрегатов составляли 2–3 мкм (рисунок 5). Применение кавитационного воздействия впервые обеспечило получение инвертного сиропа с более значительной степенью дисперсности. Отличительной особенностью инвертного сиропа является дегазация, после схлопывания пузырьков на выходе из реактора, с выделением энергии [2].

К отличительным особенностям следует также отнести отсутствие условий для седиментации агрегатов и возникновения броуновского движения, из-за высокой плотности сиропа.

Необходимо отметить высокую микробиологическую безопасность сиропа, так как повышенная плотность препятствует жизнедеятельности бактерий. В процессе структурообразования сиропа, наличие большого количества микроагрегатов (образующихся в результате инверсии сахарозы и диспергируемых в условиях кавитационных воздействий) является определяющим фактором их взаимодействия с образованием структуры путём образования коагуляционных и точечных контактов с рядом принципиально новых модифицированных свойств (рисунок 6).

К таким свойствам следует отнести:

- образование ярко-желтого соломенного цвета;
- отсутствие седиментации агрегатов и их броуновского движения;
- длительный срок годности с сохранением показателей качества;
- высокую микробиологическую безопасность;
- повышение антиокислительной способности.

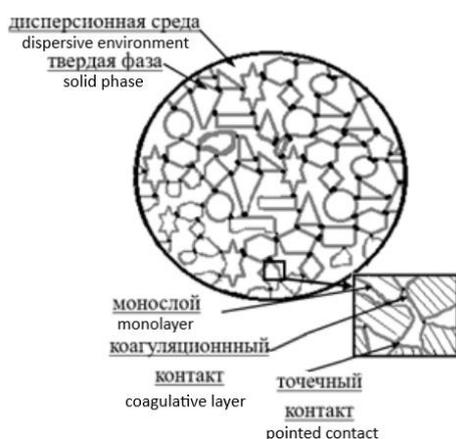
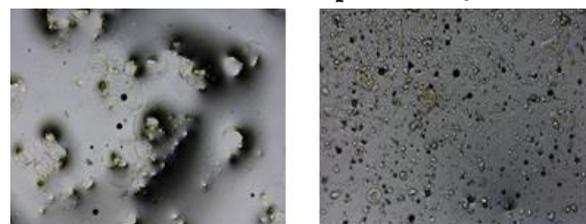


Рисунок 6. Структура суспензированной эмульсии, полученной по инновационной технологии

Figure 6. Structure of a suspension emulsion obtained by innovative technology

Эффективность совмещения двух видов подвода кавитационных воздействий подтверждена при получении сахарного печенья на стадиях получения суспензии и суспензированной эмульсии (по Г.А. Маршалкину) [7]. Положительное влияние данного воздействия подтверждено снижением размера твердых частиц дисперсной фазы с 25 (по классической технологии) до 6 мкм, при значительном увеличении количества диспергированных частиц сахарного песка, окруженных оболочкой из дисперсионной среды (рисунок 7.). За счёт своеобразия монослоя оболочек обеспечивается удержание влаги за счет молекулярного силового поля, всегда возникающего вследствие некомпенсированности молекулярных сил в междоузельном поверхностном слое.



а) размер частиц 25 мкм
а) size of particles 25 μm
б) размер частиц 6 мкм
b) size of particles 6 μm

Рисунок 7. Микрофотографии ($\times 500$) суспензий, полученных при механической обработке (а) и кавитационном воздействии (б)

Figure 7. Microphoto ($\times 500$) suspensions obtained during machining (a) and cavitation exposure (b)

К большим преимуществам кавитационных воздействий следует отнести получение стойкой, не расслаивающейся эмульсии, при использовании в рецептурах жидких растительных масел (рисунок 8).

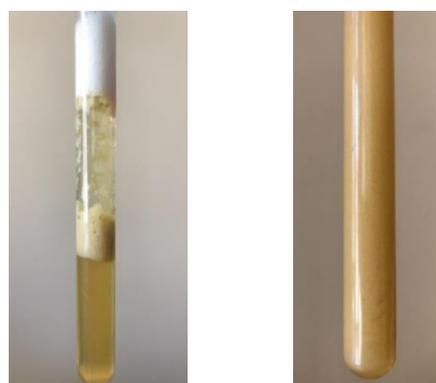


Рисунок 8. Эмульсия, полученная без кавитации и в условиях кавитационной обработки

Figure 8. Emulsion obtained without cavitation and under conditions of cavitation treatment

Готовое печенье получается с модифицированными свойствами и улучшенными качественными показателями: намокаемости до 230 (по классической технологии 180–200), плотности (снижение на 20%), повышенной пористости и рассыпчатости.

Инвертный сироп с количеством сухих веществ 80% и, следовательно, со 100% количеством фруктозы и глюкозы является основой при получении новых видов кондитерских изделий, в частности мармелада, с использованием свежих фруктов и овощей, с сохранением нативных витаминов и минеральных веществ. Например, при создании морковного мармелада количество β -каротина повышалось до 14,0 мг / 100 г., а в мармеладе с использованием пюре из моркови, без применения кавитационных воздействий количество β -каротина не превышало 1–2% [2]. Микробиологические исследования мармелада показали его высокую безопасность.

Заключение

Показана эффективность совмещения двух видов потоков энергии. Открывается перспектива создания кондитерских изделий с увеличенным

сроком годности, а также новых видов кондитерских изделий с принципиально новыми свойствами, с сохранением нативных витаминов и микроэлементов [11].

Литература

- 1 Savenkova T.V., Karimov A.R., Taleysnik M.A. et al. Mechanisms of destruction and synthesis of liquid media, used in the food industry under non-equilibrium conditions // *Food systems* 2019. № 2(4). P. 38–41. doi: 10.21323/2618–9771–2019–2–4–38–41
- 2 Аксенова Л.М. Пищевые технологии будущего и нанопреобразования биополимеров. Краснодар, 2015. 304 с.
- 3 Пацюк Л.К., Алабина Н.М., Борченкова Л.А., Медведева Е.А. и др. Инновационная технология получения новых видов продуктов за счет применения кавитационной обработки // *Инновационные исследования и разработки для научного обеспечения производства и хранения экологически безопасной сельскохозяйственной и пищевой продукции: сборник материалов II Международной научно-практической конференции*. 2017. С. 440–443.
- 4 Нигметзянов Р.И., Казанцев В.Ф., Приходько В.М. и др. Повышение эффективности ультразвуков жидкостной обработки путем активации энергии кавитационных кластеров // *СТИН*. 2019. № 3. С. 19–23.
- 5 He S., Biedermann F., Vankova N. et al. Cavitation energies can outperform dispersion interactions // *Nature Chem.* 2018. № 10. P. 1252–1257. doi: 10.1038/s41557–018–0146–0
- 6 Аверина Ю.М., Моисеева Н.А., Шувалов Д.А., Нырклов Н.П. и др. Кавитационная обработка воды. Свойства воды и эффективность обработки // *Успехи в химии и химической технологии*. 2018. Т. 32. № 14 (210). С. 17–19.
- 7 Haworth K.J., Bader K.B., Rich K.T. et al. Quantitative Frequency-Domain Passive Cavitation Imaging // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2017. V. 64. № 1. P. 177–191. doi: 10.1109/TUFFC.2016.2620492
- 8 Yasui K. *Acoustic cavitation and bubble dynamics*. Springer International Publishing, 2018.
- 9 Karimov A.R., Taleysnik M.A., Savenkova T.V. et al. Physical and chemical features of dynamic of polymeric fluid // *Food systems*. 2018. V. 1. № 3. P. 44–54. doi: 10.21323/2618–9771–2018–1–3–44–54
- 10 Хмельёв В.Н., Цыганок С.Н., Нестеров В.А. Повышение эффективности работы ультразвуковых колебательных систем для кавитационной обработки жидкостей // *Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2018): материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием*. 2018. С. 229–232.
- 11 Wang G., Wu Q., Huang B. Dynamics of cavitation–structure interaction // *Acta Mech. Sin.* 2017. V. 33. P. 685–708. doi: 10.1007/s10409–017–0685–4
- 12 Талейсник М.А., Герасимов Т.В. Практическое обоснование эффективности кавитационной обработки в приготовлении полуфабрикатов для мучных кондитерских изделий // *Кондитерские изделия XXI века: материалы X Юбилейной международной конференции*. 2015. С. 83–84.
- 13 Karimov A.R., Korshunov A.M., Beklemishev V.V. Influence of chemical reactions on the nonlinear dynamics of dissipative flows // *Physica Scripta*. 2015. V. 90. № 8. P. 085203. doi: 10.1088/0031–8949/90/8/085203
- 14 Шестаков С.Д., Красуля О.Н., Богущ В.И., Потороко И.Ю. Технология и оборудование для обработки пищевых сред с использованием кавитационной дезинтеграции. Санкт-Петербург, 2013. 152 с.
- 15 Chunhai Yi., Qianqian Lu, Yun Wang, Yixuan Wang et al. Degradation of organic wastewater by hydrodynamic cavitation combined with acoustic cavitation // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. V. 43. P. 156–165. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.01.013.

References

- 1 Savenkova T.V., Karimov A.R., Taleysnik M.A. et al. Mechanisms of destruction and synthesis of liquid media, used in the food industry under non-equilibrium conditions. *Food systems* 2019. no. 2 (4). pp. 38–41. doi: 10.21323/2618–9771–2019–2–4–38–41
- 2 Aksenova L.M. *Food technologies of the future and nanoformation of biopolymers*. Krasnodar, 2015. 304 p. (in Russian).
- 3 Patsyuk L.K., Alabina N.M., Borchenkova L.A., Medvedev E.A. et al. Innovative technology for obtaining new types of products through the use of cavitation processing. Innovative research and development for scientific support of production and storage of environmentally safe agricultural and food products: collection of materials of the II International Scientific and Practical Conference. 2017. pp. 440–443. (in Russian).
- 4 Nigmatzyanov R.I., Kazantsev V.F., Prikhodko V.M., Sundukov S.K. et al. Increasing the efficiency of ultrasonic liquid treatment by activating the energy of cavitation clusters. *STIN*. 2019. no. 3. pp. 19–23. (in Russian).
- 5 He S., Biedermann F., Vankova N. et al. Cavitation energies can outperform dispersion interactions. *Nature Chem.* 2018. no. 10. pp. 1252–1257. doi: 10.1038/s41557–018–0146–0
- 6 Averina Yu.M., Moiseeva N.A., Shuvalov D.A., Nyrkov N.P. et al. Cavitation treatment of water. Water properties and treatment efficiency. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2018. vol. 32. no. 14 (210). pp. 17–19. (in Russian).
- 7 Haworth K.J., Bader K.B., Rich K.T. et al. Quantitative Frequency-Domain Passive Cavitation Imaging. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2017. vol. 64. no. 1. pp. 177–191. doi: 10.1109/TUFFC.2016.2620492
- 8 Yasui K. *Acoustic cavitation and bubble dynamics*. Springer International Publishing, 2018.
- 9 Karimov A.R., Taleysnik M.A., Savenkova T.V. et al. Physical and chemical features of dynamic of polymeric fluid. *Food systems*. 2018. vol. 1. no. 3. pp. 44–54. doi: 10.21323/2618–9771–2018–1–3–44–54

10 Khmelev V.N., Gypsy S.N., Nesterov V.A. Improving the efficiency of ultrasonic oscillation systems for cavitation treatment of liquids. Measurements, automation and modeling in industry and scientific research (IAMP-2018): Materials of the XIII All-Russian Scientific and Technical Conference of students, graduate students and young scientists with international participation. 2018. pp. 229–232. (in Russian).

11 Wang G., Wu Q., Huang B. Dynamics of cavitation–structure interaction. Acta Mech. Sin. 2017. vol. 33. pp. 685–708. doi: 10.1007/s10409–017–0685–4

12 Taleysnik M.A., Gerasimov T.V. Practical justification of cavitation treatment efficiency in preparation of semi-finished products for flour confectionery products. Confectionery products of the 21st century: proceedings of the 10th Anniversary International Conference. 2015. pp. 83–84. (in Russian).

13 Karimov A.R., Korshunov A.M., Beklemishev V.V. Influence of chemical reactions on the nonlinear dynamics of dissipative flows. Physica Scripta. 2015. vol. 90. no. 8. pp. 085203. doi: 10.1088/0031–8949/90/8/085203

14 Shestakov S.D., Krasulya O.N., Bogush V.I., Potoroko I.Yu. Technology and equipment for processing food media using cavitation disintegration. St. Petersburg, 2013. 152 p. (in Russian).

15 Chunhai Yi., Qianqian Lu, Yun Wang, Yixuan Wang et al. Degradation of organic wastewater by hydrodynamic cavitation combined with acoustic cavitation. Ultrasonics Sonochemistry. 2018. vol. 43. pp. 156–165. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.01.013.

Сведения об авторах

Михаил А. Талейсник к.т.н., заведующий лабораторией технологии производства мучных кондитерских изделий, ВНИИКП – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, ул. Электrozаводская, 20 стр.3, г. Москва, 107023, Россия, mki.niikp@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-6289-8456>

Лариса М. Аксенова д.т.н., академик, заведующий лабораторией физических методов исследований, Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, ул. Талалихина, 26, г. Москва, 109316, Россия, ул. Электrozаводская, 20 стр.3, г. Москва, 107023, Россия, mki.niikp@mail.ru

Антон И. Акимов младший научный сотрудник, отдел стандартизации кондитерских изделий, ВНИИКП – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, ул. Электrozаводская, 20 стр.3, г. Москва, 107023, Россия, akian02@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7784-4661>

Инесса И. Мизинчикова младший научный сотрудник, лаборатория технологии производства мучных кондитерских изделий, ВНИИКП – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, ул. Электrozаводская, 20 стр.3, г. Москва, 107023, Россия, mki.niikp@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-6703-5270>

Михаил А. Пестерев младший научный сотрудник, отдел современных методов оценки качества кондитерских изделий, ВНИИКП – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, ул. Электrozаводская, 20 стр.3, г. Москва, 107023, Россия, mb-niikp@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-0980-1862>

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Mikhail A. Taleysnik Cand. Sci. (Engin.), head of the laboratory of technology for the production of flour confectionery, All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry - Branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food System of RAS, Elektrozavodskaya, 20, Moscow, 107023, Russia, mki.niikp@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6289-8456>

Larisa M. Aksenova Dr. Sci. (Engin.), academician, head of the laboratory of physical research methods, V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food System of RAS, Talalikhina, 26, Moscow, 109316, Russia, mki.niikp@mail.ru

Anton I. Akimov junior researcher, confectionery standardization department, All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry - Branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food System of RAS, Elektrozavodskaya, 20, Moscow, 107023, Russia, akian02@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7784-4661>

Inessa I. Mizinchikova junior researcher, laboratory of technology for the production of flour confectionery, All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry - Branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food System of RAS, Elektrozavodskaya, 20, Moscow, 107023, Russia, mki.niikp@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6703-5270>

Mikhail A. Pesterev junior researcher, department of modern methods for assessing the quality of confectionery product, All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry - Branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food System of RAS, Elektrozavodskaya, 20, Moscow, 107023, Russia, mb-niikp@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0980-1862>

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 16/11/2020	После редакции 24/11/2020	Принята в печать 02/12/2020
Received 16/11/2020	Accepted in revised 24/11/2020	Accepted 02/12/2020