

СОНОХИМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПИЩЕВЫЕ ЭМУЛЬСИИ

*О.Н. Красуля¹, В.И. Бозуш¹, С.С. Хмелев², И.Ю. Потороко³,
Л.А. Цирульниченко³, К.А. Канина⁴, Е.А. Ющина⁵, С. Анандан⁶,
П. Сивашанмурам⁶*

¹ *Московский государственный университет технологий и управления
им. К.Г. Разумовского, г. Москва*

² *Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, г. Бийск*

³ *Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

⁴ *Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,
г. Москва*

⁵ *Московский государственный университет пищевых производств, г. Москва*

⁶ *Институт науки и технологии, г. Тиручирапалли (Индия)*

В настоящее время ультразвуковое кавитационное воздействие на пищевые эмульсии находит широкое применение как основной технологический прием с целью повышения качества готовой продукции, улучшения ее органолептических характеристик, повышения экономических показателей производства. Для выявления оптимальных режимов ультразвукового эмульгирования авторами публикации предложена модель распада капли эмульсии в кавитационно-акустическом поле, позволяющая определить зависимости диаметра капель эмульсии от времени и интенсивности воздействия. Разработанные модели позволили впервые провести комплексные исследования определения зависимости диаметра капель эмульсии от времени при заданном максимальном радиусе кавитационных пузырьков и физических свойств жидких фаз в составе эмульсии. Впервые проведены комплексные теоретические и практические исследования влияния форм и положения абсолютно неподвижных границ на распространение колебаний в кавитирующей жидкой среде (пищевой эмульсии). Для проверки адекватности полученных теоретических моделей проведены исследования зависимости скорости распада капель эмульсии (на примере модельной эмульсии типа «вода-масло») от времени и интенсивности ультразвукового воздействия. По результатам расчетов было выявлено, что результаты серии экспериментов и результаты, полученные с использованием разработанной математической модели, адекватны. На основе полученных теоретических данных разработан проект промышленного аппарата акустической кавитации проточного типа для воздействия на пищевые эмульсии, который отличается от аналогов тем, что в нем установлена цилиндрическая волна через сплошные стенки трубы для пропускания обрабатываемой жидкости.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, модель, пищевая эмульсия, сонохимия.

Процессы получения эмульсий составляют одну из важнейших основ современной пищевой промышленности [1, 2]. Применение ультразвукового кавитационного воздействия является одним из наиболее перспективных способов формирования эмульсий, поскольку обладает низкой энергоёмкостью, возможностью получения тонкодисперсных эмульсий (вплоть до фракций размером 3 мкм и менее) и высокой производительностью [3–5].

Для формирования в различных по свойствам жидких средах кавитационной области с максимально возможным энергетическим воздействием за счет вторичных эффектов (ударные и капиллярные волны), необходимо установить определенные режимы (по интенсивности вводимых ультразвуковых колеба-

ний) и обеспечить определенные условия (объем обрабатываемой среды, форма технологического объема, время воздействия и т. п.) [6].

Для современного пищевого производства промышленное применение ультразвуковых аппаратов диктует необходимость поиска и обеспечения максимально эффективных (оптимальных) режимов воздействия на пищевые среды [7, 8]. Установление и поддержание оптимальных режимов ультразвукового воздействия возможно только при условии познания механизмов реализации ультразвуковых процессов, выявлении и непрерывном контроле параметров технологических сред, характеризующих изменение их свойств [9].

В результате обобщения теоретических и практических результатов по проблематике исследования было установлено, что большинство существующих теорий, описывающих процесс эмульгирования под воздействием кавитации, направлено на рассмотрение поведения отдельного кавитационного пузырька и его взаимодействие с каплями эмульсии [10–13]. Однако в реальных процессах, в которых используется ультразвуковая кавитационная обработка жидких пищевых сред, образуется их кавитационная область, так как единичную кавитационную полость получить практически невозможно. Поэтому, очевидно, что эффективность ультразвуковой обработки будет определяться макроскопическими характеристиками кавитирующей среды в целом (волновое сопротивление, объёмное содержание пузырьков или индекс кавитации и т. д.) [14, 15].

Изложенное выше доказывает, что для практической реализации процесса ультразвукового эмульгирования необходимо выявление оптимальных режимов воздействия и условий распространения колебаний для создания однородного ультразвукового поля в объёме смеси двух взаимно нерастворимых жидкостей и получения эмульсий с заданными дисперсными характеристиками.

Объекты и методы исследования

Для изучения эффектов ультразвукового кавитационного эмульгирования был разработан лабораторный стенд, где источником ультразвукового воздействия служит ультразвуковой аппарат, состоящий из электронного генератора и излучателя с погружным титановым волноводом, имеющим рабочее окончание грибовидной формы. В аппарате предусмотрена возможность вертикального перемещения рабочего органа с целью реализации различных режимов воздействия. Внешний вид ультразвукового излучателя представлен на рис. 1.

Поскольку, согласно обобщению известных результатов теоретических и экспериментальных исследований, максимальная эффективность кавитации обеспечивается на частоте 20–25 кГц, основное внимание уделено выявлению интенсивности ультразвуковых колебаний, необходимой для получения капель эмульсии требуемого диаметра, в конкретном частотном диапазоне.

В качестве объектов исследования использовались пищевые эмульсии типа «раститель-

ное масло-вода». В качестве растительного масла использовалось подсолнечное (дезодорированное, рафинированное с содержанием жира 99,9 %, 1 сорта по ГОСТ 1129-2013). Вода использовалась водопроводная по ГОСТ Р 51232-98, которая имела следующие качественные характеристики: водородный показатель 6,5, жесткость общая – 6,8 мг-экв/л, фенольный индекс 0,20 мг/л. Для проведения эксперимента использовали пищевые эмульсии с различным соотношением ингредиентов:

- первый вариант – 30 % растительное масло + 70 % вода;
- второй вариант – 50 % растительное масло + 50 % вода;
- третий вариант – 5 % растительное масло + 95 % вода;
- четвертый вариант – 1,5 % растительное масло + 98 % вода.

Время ультразвукового воздействия варьировали от 10 до 45 минут, а мощность воздействия от 350 до 700 Вт. Температура пищевой эмульсии перед ультразвуковым воздействием составляла 15 °С.



Рис. 1. Экспериментальный стенд для акустического эмульгирования пищевых эмульсий

С помощью оптического микроскопа были получены фотографии распределения жировых шариков в пищевой эмульсии в зависимости от её концентрации и времени обработки.

Для обработки полученных изображений жировых шариков был использован пакет программ Altami Studio.

Результаты исследований

Для выявления оптимальных режимов ультразвукового эмульгирования авторами разработана модель распада капли эмульсии в кавитационно-акустическом поле. Модель основана на уравнении деформации капли, предложенном зарубежными исследователями [1]:

$$m\ddot{x} = F - kx - d\dot{x}, \quad (1)$$

где m – масса капли, кг; F – внешняя сила, действующая на каплю со стороны потока жидкости, Н; k – коэффициент упругости капли, Н/м; d – коэффициент демпфирования капли, кг/с.

Согласно данному уравнению стенка капли представляется в виде груза массой m на пружине (эквивалентной силам поверхностного натяжения) с демпфером (эквивалентном вязкости дисперсной фазы).

Коэффициент упругости капли определяется по формуле

$$\frac{k}{m} = C_k \frac{\sigma}{\rho_d R^3}, \quad (2)$$

где C_k – коэффициент пропорциональности, зависящий от моды деформации капли; σ – поверхностное натяжение на границе раздела несущей и дисперсной фазы, Н/м; ρ_d – плотность дисперсной фазы, кг/м³.

Коэффициент демпфирования капли определяется по формуле

$$\frac{d}{m} = C_d \frac{\mu_d}{\rho_d R^2}, \quad (3)$$

где C_d – коэффициент пропорциональности, зависящий от моды деформации капли; μ_d – вязкость дисперсной фазы, Па·с.

Внешняя сила F при ультразвуковом кавитационном воздействии пропорциональна амплитуде давления ударной волны в её фронте при схлопывании кавитационного пузырька.

Решение дифференциального уравнения (1) позволяет найти максимальную величину деформации капли и определить возможность её распада. Согласно [1], если максимальная деформация капли больше четверти её диаметра d , то капля распадается на 2 одинаковые капли диаметром $\frac{d}{\sqrt[3]{2}}$. Поэтому зависимость диаметра капли от времени описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = dt_{bu}(d) \ln \frac{1}{\sqrt[3]{2}}, \quad (4)$$

где $t_{bu}(d)$ – зависимость времени распада отдельной капли от её диаметра.

Определение зависимости времени распада отдельной капли от её диаметра осуществляется следующим образом. Согласно уравнению (1) максимальная величина деформации капли пропорциональна внешней силе, действующей на каплю со стороны потока жидкости. Эта сила пропорциональна амплитуде давления ударной волны [2], когда она достигнет стенок капли. Поскольку капля распадается тогда и только тогда, когда максимальная её деформация превышает половину радиуса, то и соответственно распад будет происходить, когда амплитуда давления ударной волны вблизи стенок капли превышает некоторое пороговое значения.

Это означает, что капля будет распадаться за счёт воздействия кавитационных пузырьков, формируемых в некоторой её окрестности из-за рассеяния ударной волны, как показано на рис. 2.

Исходя из выше сказанного, время распада капли определяется интервалом, в течение которого в зоне V_b образуется хотя бы один кавитационный пузырёк.

Временной интервал образования пузырьков, приводящих к распаду капли, определяется на основании вероятностного подхода согласно полученному авторами выражению

$$t \approx \frac{T}{nV_b}, \quad (5)$$

где n – концентрация кавитационных пузырьков, определяемая согласно работе [3], м⁻³; T – период схлопывания пузырьков, с; V_b – объём зоны схлопывания пузырьков, приводящих к распаду капли, м³.

Получены зависимости времени распада капли, которые отображены графически и приведены на рис. 3.

Как следует из полученных зависимостей (см. рис. 3), наибольшее время распада требуется для капель малого диаметра (для 20 мкм время распада в 3 раза превышает время распада каплей размером 100 мкм). Это обусловлено малым объёмом окрестности капли, в которой схлопывающиеся пузырьки приводят к распаду последней. Поэтому для эффективной реализации процесса получения эмульсии с малым диаметром частиц дисперсной фазы необходимо увеличивать радиус кавитационного пузырька, и, следовательно, повышать интенсивность ультразвукового воздействия.

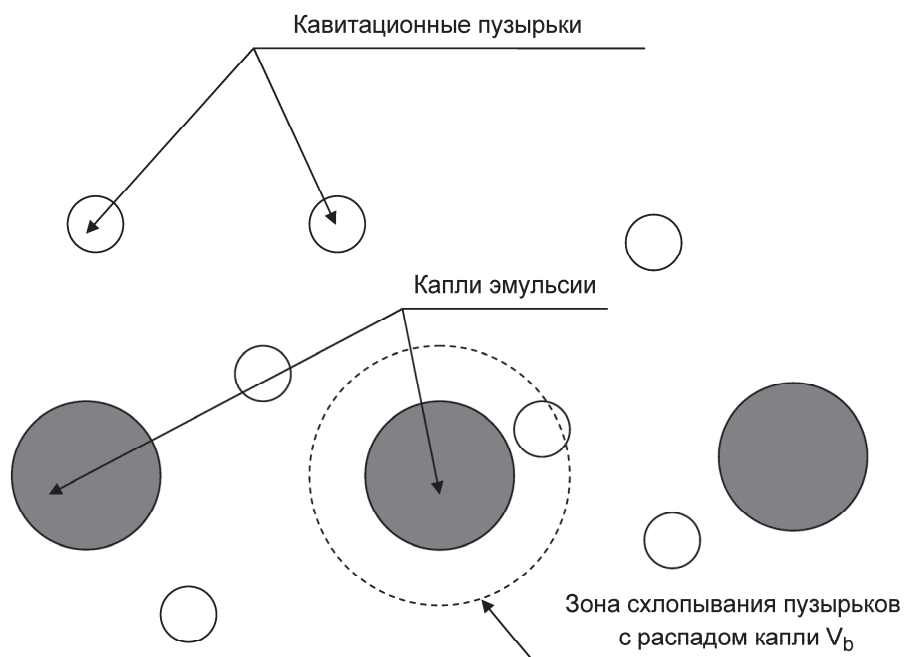


Рис. 2. Схематическое изображение воздействия кавитационных пузырьков на капли эмульсии

При этом для каждого размера капли существует некоторый пороговый радиус, начиная с которого снижение времени распада капли прекращается. Например, минимальное время распада каплей размером 20 мкм достигается при радиусе кавитационного пузырька 250 мкм. А для распада каплей размером 100 мкм – при радиусе пузырька 130 мкм. Превышение порогового радиуса кавитационного пузырька не приведет к увеличению эффективности эмульгирования, более того, если радиус пузырька превысит 300 мкм, то, согласно работе [2], образуется вырожденная кавитация, и процесс эмульгирования может прекратиться.

Найденное время распада капли позволяет найти зависимость диаметра капли от времени (рис. 4) при эмульгировании подсолнечного масла в воде.

Как следует из представленной зависимости, при интенсивности воздействия $1,5 \text{ Вт/см}^2$, даже при обработке в течение 20 мин диаметр каплей всё ещё превышает 20 мкм, что является недостаточным для ряда технологических процессов.

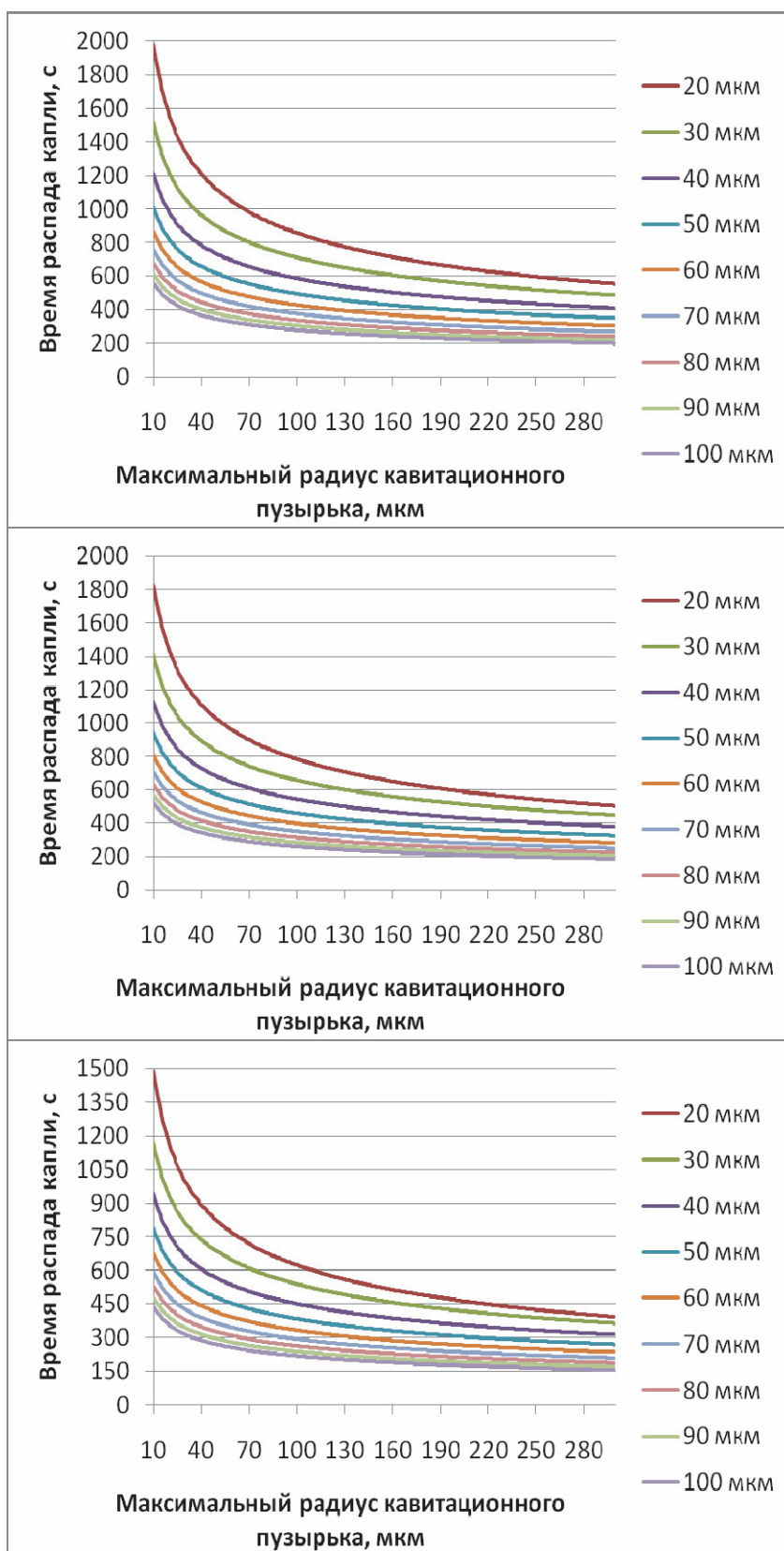
Воздействие с интенсивностью 3 Вт/см^2 позволяет в течение 20 мин получать эмульсии с диаметром каплей 15 мкм. При этом воздействие с интенсивностью 9 Вт/см^2 и более позволяет получать капли эмульсии диа-

метром менее 7–10 мкм уже в течение 20 мин обработки.

Для проверки адекватности полученных теоретических моделей были проведены исследования зависимости скорости распада каплей эмульсии (на примере модельной эмульсии типа вода-масло) от времени и интенсивности ультразвукового воздействия (рис. 5).

Полученные изображения были обработаны с применением программных средств и на основе полученных результатов построены гексограммы распределения размеров жировых шариков при различных режимах сонохимического воздействия (рис. 6).

По результатам расчетов размеров каплей было выявлено, что результаты серии экспериментов и результаты, полученные при помощи математической модели, адекватны. Установлено, что оптимальная концентрация эмульсии представляет соотношение: «30 % – растительное масло и 70 % воды», оптимальное время обработки составляет 40 минут при мощности ультразвукового воздействия 500 Вт, что соответствует интенсивности обработки в 9 Вт/см^2 (режим М4, рис. 4). При таких режимах удастся обеспечить получение максимально однородного распределения жировых шариков со средним диаметром, лежащим в диапазоне 6–8 мкм.



а) поверхностное натяжение на границе несущей и дисперсной фазы 70 мН/м

б) поверхностное натяжение на границе несущей и дисперсной фазы 40 мН/м

в) поверхностное натяжение на границе несущей и дисперсной фазой 10 мН/м

Рис. 3. Зависимости времени распада капли от её максимального радиуса кавитационного пузырька при различных её диаметрах и поверхностных натяжения на границе между несущей и дисперсной фазой

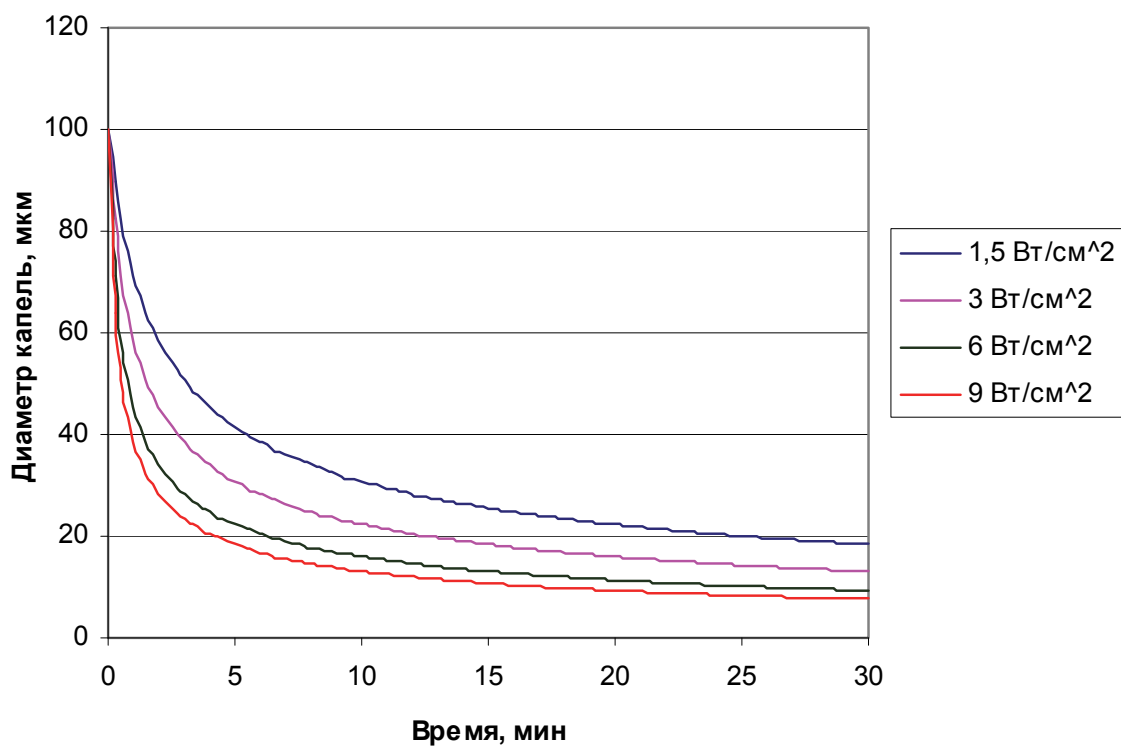


Рис. 4. Зависимости диаметра капель эмульсии от времени при различных интенсивностях воздействия

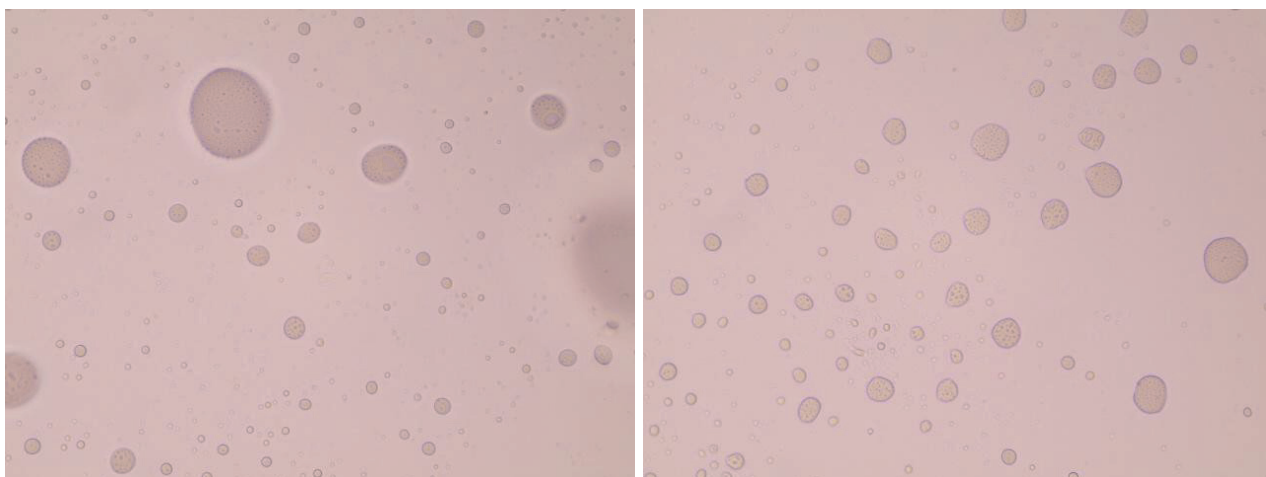


Рис. 5. Фотографии модельной эмульсии (слева – до обработки, справа – после, 1 вариант)

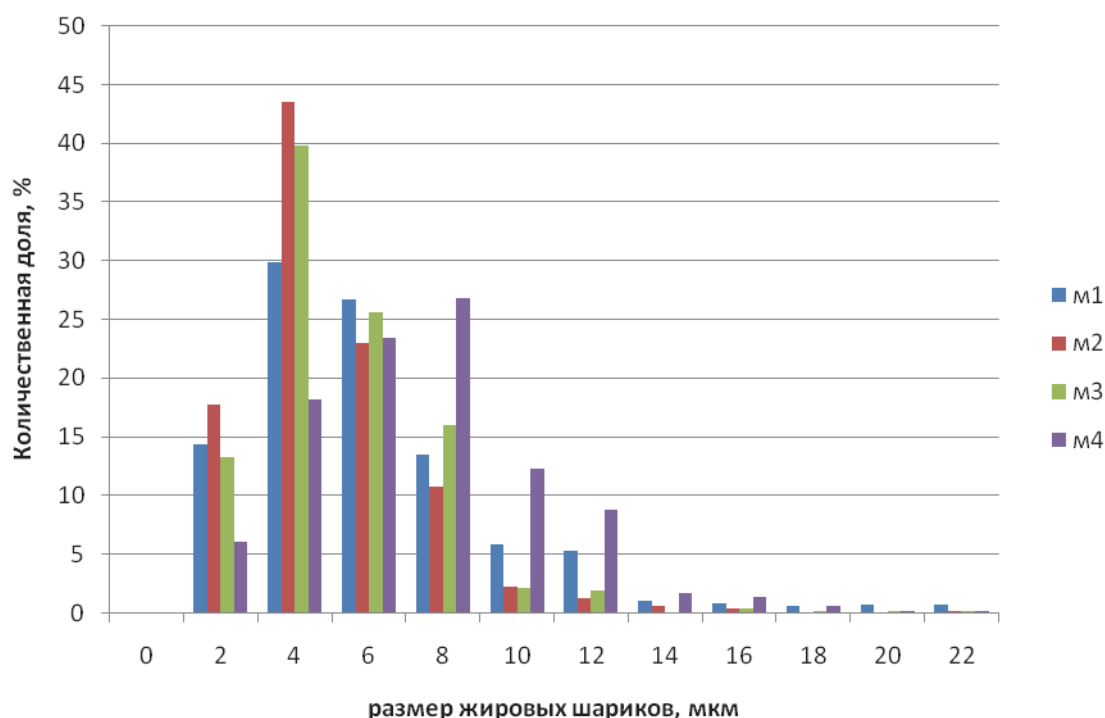


Рис. 6. Гексограмма распределения жировых шариков (м1-м4 режимы обработки)

Впервые проведены комплексные теоретические и практические исследования влияния форм и положения абсолютно неподвижных границ на распространение колебаний в кавитирующей жидкой среде (пищевой эмульсии). Было проведено конечно-элементное моделирование для полученного волнового уравнения распространения колебаний с целью нахождения распределения звукового давления и степени развитости кавитации в технологических объемах. Получено визуальное изображение (рис. 7) распределения амплитуд колебаний давления в среде. Это позволяет проектировать проточные рабочие камеры технологических объемов с оптимальными геометрическими размерами и избегать зон, где технологическая среда не подвергается обработке и, следовательно, снижается работа аппарата в целом.

При помощи дополнительно разработанного измерительного стенда были определены оптимальные формы и размеры технологических объемов для ультразвуковой кавитационной обработки пищевых эмульсий.

Для этого было конструктивно реализовано продольное перемещение торцевой отражающей границы (располагаемой напротив излучателя) для реализации режима как бегу-

щей, так и стоящей волны. Были определены оптимальные значения по размеру технологических камер: диаметр должен составлять не менее 130 мм; длина технологической камеры должна составлять не менее 230 мм.

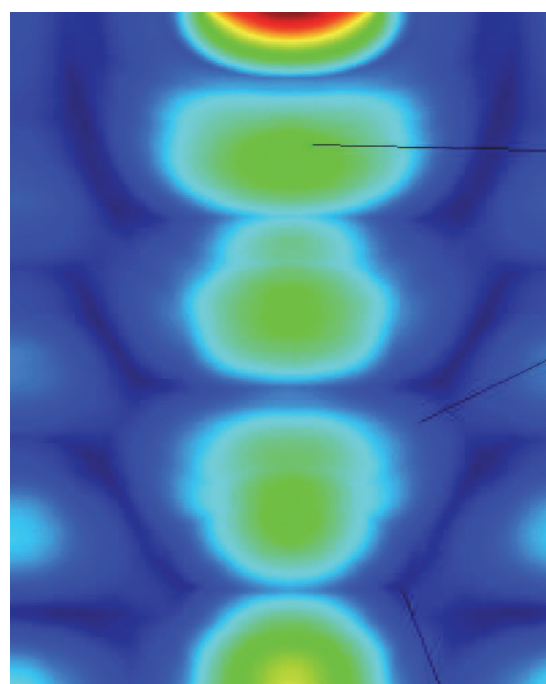


Рис. 7. Распределение амплитуд колебаний давления среды

На основе полученных теоретических данных разработан проект промышленного аппарата акустической кавитации проточного типа для воздействия на пищевые эмульсии, который отличается от аналогов тем, что в нем установлена цилиндрическая волна через сплошные стенки трубы для пропускания обрабатываемой жидкости.

В результате проведенных исследований разработана модель ультразвукового эмульгирования, позволяющая определить зависимости диаметра капель эмульсии от времени и интенсивности воздействия.

Анализ модели позволил установить, что оптимальное время ультразвукового эмульгирования составляет 40 мин.

При этом для получения диаметра капель эмульсии менее 20 мкм в несущей фазе, близкой по вязкости к воде (1 мПа·с), интенсивность воздействия должна составлять не менее 5 Вт/см². В то время как для жидкости вязкостью 40 мПа·с диаметр капель менее 20 мкм достигается при интенсивности воздействия 8 Вт/см².

Полученные результаты могут быть использованы для выбора режимов работы ультразвукового технологического оборудования и разработки конструкции технологической камеры, обеспечивающей требуемой время пребывания эмульсии в аппарате.

Работа выполнялась в рамках проекта РФФИ № 15-58-45028-«ИНД_а»-08-203 «Теоретические аспекты сонохимического воздействия на пищевые эмульсии» совместно с Институтом науки и технологии, город Тиручирапалли (Индия).

Литература

1. Taylor G.I. *The Shape and Acceleration of a Drop in a High Speed Air Stream* // in: Batchelor GK, *The Scientific Papers of G.I. Taylor*. – 1963. – Vol. 3, pp. 457–464. University Press, Cambridge.

2. Khmelev, V.N. *Optimization of these modes and conditions of ultrasonic influence on various technological mediums by mathematical modeling* / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov // *International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2012: Conference Proceedings*. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P. 124–134.

3. Khmelev, V.N. *Determination of Ultrasonic Effect Mode Providing Formation of Cavita-*

tion Area in High-Viscous and Non-Newtonian Liquids / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov, S.S. Khmelev, K.A. Karzakova // *15th International Conference of Young Specialist on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014*. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. 203–207.

4. Хмелёв, В.Н. *Выявление оптимальных режимов и условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких жидкостей* / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, С.С. Хмелёв, К.А. Карзакова // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2013. – № 2. – С. 249–251.

5. Хмелев, В.Н. *Моделирование процессов коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия* / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // *Вести высших учебных заведений Черноземья*. – 2010. – № 2 (20). – С. 48–52.

6. *Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленном, сельском и домашнем хозяйстве* / В.Н. Хмелев, Д.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок. – Барнаул, 2007. – 407 с.

7. *Использование сонохимии при производстве вареных колбасных изделий* / О.Н. Красуля, В.И. Богуш, О.А. Долгова, Т.А. Мишарина // *Мясная индустрия*. – 2013. – № 7. – С. 20–24.

8. Brotchie, A. *Effect of power and frequency on bubble-size distributions in acoustic cavitation* / A. Brotchie, F. Grieser, M. Ashokkumar // *Physical Review Letters*. – 2009. – V. 102 (8), art. no. 084302.

9. *Ultrasonics in food processing* / J. Chandrapala, C. Oliver, S. Kentish, M. Ashokkumar // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2012. – V. 19 (5). – P. 975–983.

10. *The use of ultrasonics for nanoemulsion preparation* / S. Kentish, T.J. Wooster, M. Ashokkumar et al. // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2008. – V. 9 (2). – P. 170–175.

11. Patista, A. *Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production* / A. Patista, D. Bates // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2008. – V. 9 (2). – P. 147–154.

12. *Applications of sonochemistry in Russian food processing industry* / O. Krasulya, S. Sheshtakov, V. Bogush et al. // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2014. – V. 21 (6). – P. 2112–2116.

13. Shanmugam, A. *Characterization of Ultrasonically Prepared Flaxseed oil Enriched Beverage/Carrot Juice Emulsions and Process-Induced Changes to the Functional Properties of Carrot Juice* / A. Shanmugam, M. Ashokkumar // *Food and Bioprocess Technology*. – 2015. – V. 8 (6). – P. 1258–1266.

14. Truhaut, R. *Toxicology, social science*

and the humanitarian / R. Truhaut // *Bulletin de l'Academie Nationale de Medecine*. – 1991. – V. 175 (9). – P. 1385–1402.

15. *Процессы и аппараты пищевой соно-технологии для мясной промышленности* / О.Н. Красуля, С.Д. Шестаков, В.И. Богуш и др. // *Мясная индустрия*. – 2009. – № 7. – С. 43–46.

Красуля Ольга Николаевна. Доктор технических наук, профессор, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (г. Москва), okrasulya@mail.ru

Богуш Владимир Иванович. Кандидат технических наук, доцент, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (г. Москва), vladimir2001@yandex.ru.

Хмелев Сергей Сергеевич. Кандидат технических наук, доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ (г. Бийск), ssh694@yandex.

Потороко Ирина Юрьевна. Доктор технических наук, заведующий кафедры пищевых и биотехнологий, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), potorocho@susu.ac.ru

Цирульниченко Лина Александровна. Кандидат технических наук, доцент кафедры пищевых и биотехнологий, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), linchikz@mail.ru

Канина Ксения Александровна. Инженер кафедры технологии хранения и переработки продуктов животноводства, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева (г. Москва), kseniya.kanina.91@mail.ru

Ющина Елена Анатольевна. Кандидат технических наук, доцент, Московский государственный университет пищевых производств (г. Москва), elena020292@mail.ru

Анандан Самбандам. Доктор технических наук, доцент кафедры наноматериалов и конверсии солнечной энергии, Институт науки и технологии (г. Тиручирапалли, Индия), sanand99@yahoo.com

Сивашанмугам Палани. Доктор технических наук, доцент кафедры наноматериалов и конверсии солнечной энергии, Институт науки и технологии (г. Тиручирапалли, Индия), sanand99@yahoo.com

Поступила в редакцию 12 апреля 2017 г.

THE SONOCHEMICAL IMPACT ON FOOD EMULSIONS

O.N. Krasulya¹, V.I. Bogush¹, S.S. Khmelev², I.Yu. Potoroko³,
L.A. Tsirulnichenko³, K.A. Kanina⁴, E.A. Yushchina⁵, S. Anandan⁶,
P. Sivashanmugam⁶

¹ K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Moscow, Russian Federation

² Biysk Technological Institute, branch of the Altai State Technical University, Biysk, Russian Federation

³ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

⁴ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

⁵ Moscow State University of Food Production, Moscow, Russian Federation

⁶ National Institute of Technology, Tiruchirappalli, India

At present, the ultrasonic cavitation effect on food emulsions is widely used as a main manufacturing method in order to improve the quality of finished products, improve its organoleptic characteristics, and increase economic performance. To identify the optimal modes of ultrasonic emulsification the paper proposes a model for the decay of an emulsion droplet in a cavitation acoustic field, which allows determining dependence of the diameter of emulsion droplets on the time and degree of impact. The developed models make it possible for the first time to carry out comprehensive research on specifying the dependence of the diameter of emulsion droplets on time at a given maximum radius of cavitation bubbles and physical properties of liquid phases in the emulsion. The comprehensive theoretical and practical studies on the influence of shapes and positions of absolutely fixed boundaries on the propagation of vibrations in a cavitating liquid medium (food emulsion) have been conducted for the first time. The studies on the reliance of a decomposition rate of emulsion droplets (using the example of a model water-oil emulsion) on the time and intensity of ultrasonic treatment are carried out to validate the adequacy of the obtained theoretical models. Based on the results of calculations, it's revealed that the experiment results and the results obtained using the developed mathematical model, are adequate. On the basis of the theoretical data the authors present a draft of an industrial device of flow acoustic cavitation for the impact on food emulsions, which differs from analogues in the fact that it has a cylindrical wave through solid walls of the pipe to pass the treated liquid.

Keywords: ultrasound, cavitation, model, food emulsion, sonochemistry.

References

1. Taylor G.I. *The Shape and Acceleration of a Drop in a High Speed Air Stream*. In: Batchelor GK, The Scientific Papers of G.I. Taylor, 1963, vol. 3, pp. 457–464.

2. Khmelev V.N., Golykh R.N., Shalunov A.V. *Optimization of these modes and conditions of ultrasonic influence on various technological mediums by mathematical modeling*. International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2012: Conference Proceedings. Novosibirsk, 2012, pp. 124–134. DOI: 10.1109/EDM.2012.6310202

3. Khmelev V.N., Golykh R.N., Shalunov A.V., Khmelev S.S., Karzakova K.A. *Determination of Ultrasonic Effect Mode Providing Formation of Cavitation Area in High-Viscous and Non-Newtonian Liquids*. 15th International Conference of Young Specialist on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014. Novosibirsk, 2014, pp. 203–207. DOI: 10.1109/EDM.2014.6882511

4. Khmelev V.N., Golykh R.N., Khmelev S.S., Karzakova K.A. [Identification of optimal modes and conditions of ultrasonic cavitation treatment of high-viscosity liquids]. *Nauchno-tekhicheskiy vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Volga Region Bulletin]*, 2013, no. 2, pp. 249–251. (in Russ.)

5. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Shalunova K.V. [Simulation of coagulation processes of gas-dispersion systems for determining optimal modes of acoustic influence]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya [News of Higher Educational Institution of the Chernozem Region]*, 2010, no. 2 (20), pp. 48–52. (in Russ.)

6. Khmelev V.N., Leonov D.V., Barsukov R.V., Tsyganok S.N. *Ul'trazvukovye mnogofunktsional'nye i spetsializirovannyye apparaty dlya intensivatsii tekhnologicheskikh protsessov v promyshlennom, sel'skom i domashnem khozyaystve [Ultrasonic multifunctional and special-purpose devices for intensification of technological processes in the industrial, agricultural and household sectors]*. Barnaul, 2007. 407 p.

7. Krasulya O.N., Bogush V.I., Dolgova O.A., Misharina T.A. [The use of sonochemistry in the production of cooked sausages]. *Myasnaya industriya [Meat industry]*, 2013, no. 7, pp. 20–24. (in Russ.)
8. Brotchie A., Grieser F., Ashokkumar M. Effect of power and frequency on bubble-size distributions in acoustic cavitation. *Physical Review Letters*, 2009, 102 (8), art. no. 084302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.084302
9. Chandrapala J., Oliver C., Kentish S., Ashokkumar M. Ultrasonics in food processing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, 19 (5), pp. 975–983. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.01.010
10. Kentish S., Wooster T.J., Ashokkumar M., Balachandran S., Mawson R., Simons L. The use of ultrasonics for nanoemulsion preparation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2008, 9 (2), pp. 170–175. DOI: 10.1016/j.ifset.2007.07.005
11. Patista A., Bates D. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2008, 9 (2), pp. 147–154. DOI: 10.1016/j.ifset.2007.07.004
12. Krasulya O., Shestakov S., Bogush V., Potoroko I., Cherepanov P., Krasulya B. Applications of sonochemistry in Russian food processing industry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21 (6), pp. 2112–2116. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.03.015
13. Shanmugam A., Ashokkumar M. Characterization of Ultrasonically Prepared Flaxseed oil Enriched Beverage/Carrot Juice Emulsions and Process-Induced Changes to the Functional Properties of Carrot Juice. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8 (6), pp. 1258–1266. DOI: 10.1007/s11947-015-1492-1
14. Truhaut R. *Toxicology, social science and the humanitarian*. *Bulletin de l'Academie Nationale de Medecine*, 1991, 175 (9), pp. 1385–1402.
15. Krasulya O.N., Shestakov S.D., Bogush V.I. et al. [Processes and devices of food sonotechnology for meat industry]. *Myasnaya industriya [Meat industry]*, 2009, no. 7, pp. 43–46. (in Russ.)

Olga N. Krasulya, Doctor of Sciences (Engineering), K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Moscow, okrasulya@mail.ru

Vladimir I. Bogush, Candidate of Sciences (Engineering), associate professor, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Moscow, vladimir2001@yandex.ru.

Sergey S. Khmelev, Candidate of Sciences (Engineering), Biysk Technological Institute, branch of the Altai State Technical University, Biysk, ssh694@yandex.

Irina Yu. Potoroko, Doctor of Sciences (Engineering), head of the Department of Food and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, potoroko@susu.ac.ru

Lina A. Tsurulnichenko, Candidate of Sciences (Engineering), associate professor, Department of Food and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, linchikz@mail.ru

Ksenia A. Kanina, engineer of the Department of Techniques for Storage and Processing of Livestock Products, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, kseniya.kanina.91@mail.ru

Elena A. Yushchina, Candidate of Sciences (Engineering), associate professor, Moscow State University of Food Production, Moscow, elena020292@mail.ru

Dr. Sambandam Anandan, Associate Professor Nanomaterials & Solar Energy Conversion Lab, Department of Chemistry, National Institute of Technology, Tiruchirappalli, India, sanand99@yahoo.com

Dr. Palani Sivashanmugam, Associate Professor Nanomaterials & Solar Energy Conversion Lab, Department of Chemistry, National Institute of Technology, Tiruchirappalli, India, sanand99@yahoo.com

Received 12 April 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сонохимическое воздействие на пищевые эмульсии / О.Н. Красуля, В.И. Богуш, С.С. Хмелев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». – 2017. – Т. 5, № 2. – С. 38–48. DOI: 10.14529/food170206

FOR CITATION

Krasulya O.N., Bogush V.I., Khmelev S.S., Potoroko I.Yu., Tsurulnichenko L.A., Kanina K.A., Yushchina E.A., Anandan S., Sivashanmugam P. The Sonochemical Impact on Food Emulsions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 38–48. (in Russ.) DOI: 10.14529/food170206