

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ РАСПЫЛЕНИИ

В.Н. ХМЕЛЁВ, А.В. ШАЛУНОВ, Р.Н. ГОЛЫХ, Р.С. ДОРОВСКИХ,
В.А. НЕСТЕРОВ

Статья посвящена теоретическому исследованию процесса двухстадийного высокодисперсного распыления жидкостей, включающего в себя процесс первичного формирования крупных капель при ультразвуковом (УЗ) воздействии на тонкую пленку жидкости и вторичного распада полученных капель под действием высокочастотного УЗ поля в воздушно-капельной среде. Выявлен физический механизм и предложена физико-математическая модель распада капель, позволившая выявить пороговые уровни звукового давления при различных размерах капель, свойствах распыляемой жидкости и типах воздействия. Установлено, что наиболее эффективный способ УЗ воздействия, обеспечивающий дробление капель состоит в излучении последовательности разночастотных импульсов при высокой концентрации аэрозоля (более 10 % об.), создающей условия для межмодовой дисперсии. Показано, что при воздействии непрерывных моночастотных колебаний пороговый уровень звукового давления, необходимый для распада капли, может превышать 190 дБ. При импульсном воздействии требуемый уровень звукового давления снижается до 155–160 дБ в сплошной воздушной среде.

Ключевые слова: ультразвук, распыление, капля, производительность, уровень звукового давления, оптимальные режимы

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время всё более широкое распространение получает ультразвуковой (УЗ) способ распыления жидкостей [1-7] благодаря высоким показателям по производительности и равномерности получаемых покрытий, отсутствию необходимости использования распыляющих агентов, возможности распыления высоковязких жидкостей. УЗ распыление является наиболее энергетически эффективным среди известных способов: его КПД составляет до 1 % [3, 4], при этом КПД других способов распыления не превышает 0,05 % [3, 8]. Кроме того, УЗ обеспечивает факел распыла, близкий к монодисперсному и возможность формирования капель размером менее 10 мкм.

Однако в высокотехнологичных отраслях промышленности, где предъявляются повышенные требования к характеристикам формируемого распыла, основной проблемой является недостаточная производительность (не более 0,1 мл/(с·см²)) при формировании высокодисперсных капель (размером 5–10 мкм).

Как показали ранее проведенные исследования [2-7], максимальная производи-

тельность распыления обратно пропорциональна размеру формируемых капель. Это обуславливает необходимость модернизации УЗ способа распыления для решения двух взаимноисключающих задач – формирование высокодисперсных капель и распыление с высокой производительностью.

Для повышения производительности формирования высокодисперсных капель (менее 10 мкм) был предложен способ многократного УЗ воздействия, состоящий из двух стадий: первичное УЗ распыление жидкости в слое и вторичное дробление сформированных капель на более мелкие в высокочастотном УЗ поле (рисунок 1).

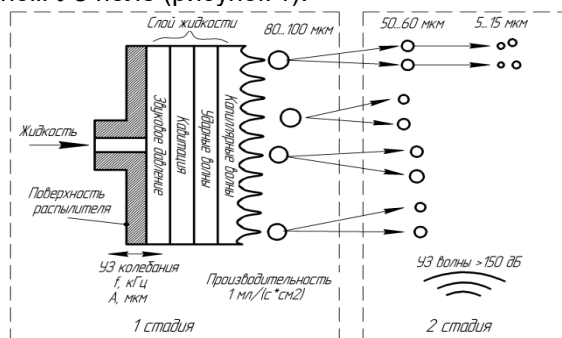


Рисунок 1 – Схема двухстадийного УЗ распыления

Такой способ распыления в несколько раз увеличит производительность формирования высокодисперсного аэрозоля по сравнению с одностадийным распылением в слое за счёт:

- возможности получения требуемого размера мелких капель (менее 10 мкм) при первичном распылении крупных капель (40 – 80 мкм). Согласно ранее проведённым исследованиям [2-7], распыление крупных капель характеризуется до 10 раз большей производительностью по сравнению с мелкими. При этом дробление крупных капель на мелкие займёт не более чем несколько десятков периодов УЗ колебаний (не более 0,2 с).

- сохранения производительности распыления при дроблении крупных капель на мелкие в рамках 2-й стадии ввиду закона сохранения массы.

Для обеспечения максимальной производительности распыления при требуемом диаметре высокодисперсных капель (менее 10 мкм) необходимо комплексное выявление оптимальных режимов УЗ воздействия на первой и второй стадии распыления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Производительность двухстадийного распыления полностью определяется первой стадией. Согласно проведённым исследованиям [2, 4, 7] установлено, что максимальная производительность распыления обеспечивается при частоте 20 – 25 кГц и амплитуде 14 – 18 мкм на 1-ой стадии (рисунок 2). Режимы воздействия 2-ой стадии на производительность распыления не влияют.

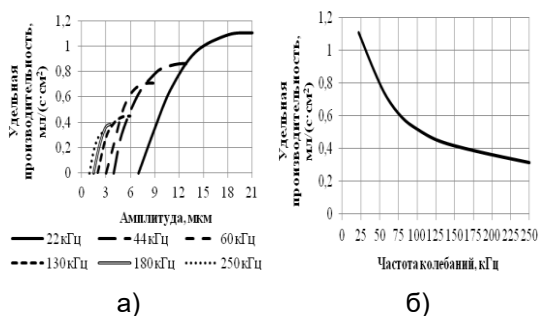


Рисунок 2 – Зависимости удельной производительности распыления от амплитуды (а) и частоты (б) УЗ колебаний

Однако режимы 2-ой стадии определяют диаметр формируемых капель, поскольку от частоты и амплитуды звукового давления за-

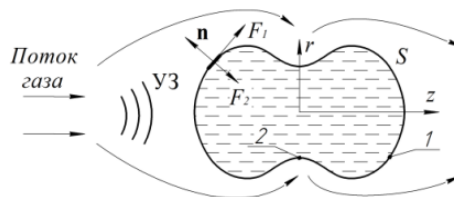
висит минимально возможный диаметр капель, поддающийся разрушению, и время дробления капли, а, следовательно, и число элементарных актов дробления за время пребывания капли в каналах распылителя.

Для определения режимов 2-й стадии, обеспечивающих требуемый диаметр капель, необходимо разработать модель дробления взвешенной капли в акустическом поле.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПАДА КАПЕЛЬ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЗ ПОЛЯ

Модель основана на анализе движения жидкости в объёме капли под действием следующих сил (рисунок 3) [9]:

- перепада давления в колеблющемся газовом потоке;
- разности сил поверхностного натяжения при волнообразных возмущениях стенки капли (F_2);
- сил вязких напряжений при движении стенок с ненулевой скоростью (F_1).



n – вектор нормали к стенке капли; S – поверхность капли; (r, z) – оси цилиндрических координат

Рисунок 3 – Схема колебаний капли в УЗ поле

Для расчёта изменения формы колебаний капли был использован численный метод решёточных уравнений Больцмана [10], основанный на рассмотрении течения жидкости как движение ансамбля псевдочастиц, имеющих некоторую функцию распределения по дискретным скоростям $N_k(\mathbf{x}, t)$. $N_k(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x}$ – число псевдочастиц, имеющих скорость \mathbf{c}_k и находящихся в объёме $d\mathbf{x}$. При этом скорости \mathbf{c}_k выбираются таким образом, чтобы за шаг по времени Δt частицы перелетали в соседние узлы пространственной решетки, вектора которой удовлетворяют условию $\mathbf{c}_k = \mathbf{c}_k \Delta t$.

При этом концентрации частиц жидкости на каждом шаге по времени рассчитываются согласно следующему выражению:

$$N_k((r + c_{kr} \Delta t) \cos \theta, (r + c_{kr} \Delta t) \sin \theta, z + c_{kz} \Delta t, t + \Delta t) = N_k(r \cos \theta, r \sin \theta, z, t) + \Omega(N) + \Delta N_k, \quad (1)$$

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ РАСПЫЛЕНИИ

где Ω_k – оператор столкновений, ΔN_k – изменение концентрации частиц за счёт действия объёмных сил, m^{-3} ; (r, z) – координаты точки поверхности деформированной капли, зависящие от угла θ между радиус-вектором точки и осью z , м.

Анализ численной модели распада капля позволяет определить величину их максимальной деформации:

$$x = \max_{\theta \in [0; \pi]} \sqrt{\left(\frac{d}{2} \sin \theta - r(\theta)\right)^2 + \left(\frac{d}{2} \cos \theta - z(\theta)\right)^2}, \quad (2)$$

где d – начальный диаметр капли, м.

Максимальная деформация определяет возможность распада капли. Критерием распада капли служит $x > d/4$, когда число Вебера превышает критическое значение $We > We_{кр.} = 6$ (сила поверхностного натяжения в центральной области капли 1 превышает силы поверхностного натяжения в периферийной области 2 (см. рисунок 2) из-за локального утоньшения капли)

Очевидно, что максимальная деформация капли пропорциональна уровню звукового давления. Поэтому для распада капли уровень звукового давления должен превышать пороговое значение, при котором $x = d/4$.

Первоначально были получены зависимости пороговых уровней звукового давления, при которых происходит распад капля, при воздействии синусоидальных колебаний одной частоты (рисунок 4, 5).

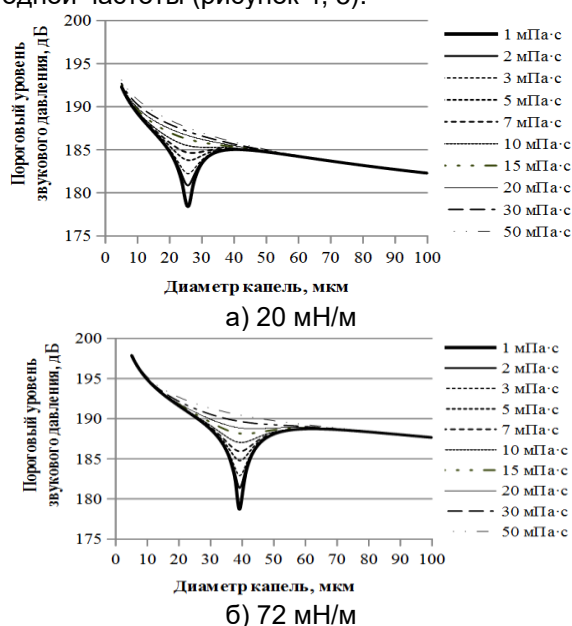


Рисунок 4 – Зависимости пороговых уровней звукового давления от диаметра при различных вязкостях и поверхностных натяжениях жидкости (частота 22 кГц)

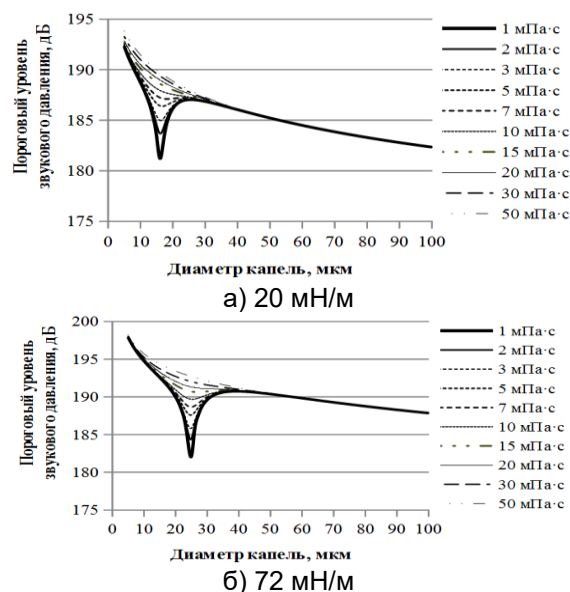


Рисунок 5 – Зависимости пороговых уровней звукового давления от диаметра при различных вязкостях и поверхностных натяжениях жидкости (частота 44 кГц)

Анализ полученных зависимостей показывает, что существуют диаметры, при которых уровень звукового давления достигает локального минимума (менее 180 дБ). Эти диаметры являются резонансными диаметрами при заданных свойствах жидкости. Однако на практике непрерывно воздействовать в резонансной области невозможно из-за эволюции диаметра капля за счёт дробления и испарения. В то время как УЗ излучатель способен создавать максимальный уровень звукового давления лишь при конечном наборе частот, обусловленных резонансными свойствами самого излучателя.

Кроме того, рост вязкости приводит к сглаживанию резонансных минимумов порогового уровня, хотя и слабо влияет на значение резонансного диаметра. Минимумы уровня звукового давления полностью исчезают, начиная с вязкости 30 мПа·с.

Поэтому необходимо рассмотреть характер зависимости порогового уровня звукового давления за пределами резонансов. За пределами резонансов пороговый уровень звукового давления на 8 – 15 дБ выше, чем в области резонансов.

При этом уровень звукового давления возрастает с уменьшением диаметра капля. Это связано с возрастанием капиллярных сил, препятствующих деформации капли.

Например, уровень звукового давления, требуемый для распада капли, составляет свыше 185 дБ для крупных капля

(80 – 100 мкм) и свыше 195 дБ для мелких капель (5 – 15 мкм).

Такие высокие уровни звукового давления создать в воздушно-капельной среде современными излучателями технически невозможно [11].

В связи с этим необходимо обеспечить концентрацию акустической энергии, создаваемой излучателями. Возможное увеличение уровня звукового давления за счет фокусировки синусоидальных колебаний реализуется лишь в локальной точке, а сложение первичной и отражённой волны усиливает колебания не более чем на 30 %. Более того, увеличение уровня звукового давления повышает вероятность возникновения процесса, обратного распылению – коагуляции капель.

Следовательно, возникает необходимость поиска подходов, основанных на концентрировании акустической энергии, не только в пространстве, но и во времени. Один из таких подходов – воздействие в виде последовательности волновых пакетов конечной длительности (ультразвуковых импульсов), имеющих разные частоты [12].

Предлагаемый способ УЗ воздействия для реализации вторичного распыления

Воздействие УЗ импульсами позволит дополнительно усилить колебания независимо от геометрии каналов распылителя и УЗ излучателя. Конечная длительность импульса (не более 10 мс) сведёт к нулю вероятность коагуляции частиц, поскольку среднее время, требуемое для объединения двух частиц, велико по сравнению с длительностью одиночного импульса и составляет более 0,5 с.

Для того чтобы во времени сконцентрировать акустическую энергию, переносимую волновыми пакетами, необходимо создать условия для реализации межмодовой дисперсии в среде по аналогии с механизмом возникновения «волн-убийц» на поверхности океана.

Один из способов реализации межмодовой дисперсии – обеспечение зависимости угла дифракционного расхождения колебаний от частоты. Угол дифракционного расхождения определяет первичное направление распространения колебаний, от которого за счёт дальнейших многократных переотражений будет зависеть суммарная длина пути распространения колебаний и, следовательно, эквивалентная скорость.

Результаты численного расчёта распространения колебаний позволили установить, что, несмотря на зависимость угла дифрак-

ционного расхождения от частоты, длина пути распространения колебаний центральной части акустического пучка, в которой сосредоточена максимальная энергия, будет для всех частот одинаковой.

Таким образом, необходимо создавать условия для возникновения межмодовой дисперсии скорости звука в газокапельной среде.

Для создания условий возникновения дисперсии скорости звука необходимо провести анализ распространения колебаний в газовой среде, учитывая влияние жидких капель. Анализ распространения колебаний проводился на основании волнового уравнения, полученного из общих уравнений динамики газокапельных сред [13]. Данное уравнение включает ненулевую правую часть, представляющую собой двойной интеграл от предыстории изменения звукового давления с экспоненциально убывающими весовыми коэффициентами:

$$-\frac{\alpha_{10}}{c^2} \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} = -\Delta p_1 - \frac{9\mu\alpha_{20}}{2a^2} \frac{1}{\tau_2} \int_0^t \int_0^{t_2} e^{\frac{\alpha_{20}}{\rho_{10}c^2}(t_2-t)} \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} \partial t_2 \partial t_1, \quad (3)$$

где α_{10} – равновесное объёмное содержание воздуха, %; α_{20} – равновесное объёмное содержание жидкости, %; c – скорость звука в воздухе, м/с; ρ_{10} – плотность воздуха, кг/м³; μ – вязкость воздуха, Па·с; a – радиус капли жидкости, м; p_1 – давление воздуха, Па; τ – время релаксации, с.

Проведенные на основании данного уравнения расчёты скорости звука в жидкодисперсной среде позволили установить, что при объёмной концентрации аэрозоля в воздухе не менее 10% скорость звука при повышении частоты с 22 до 66 кГц увеличивается до 1,5 раз (рисунок 6).

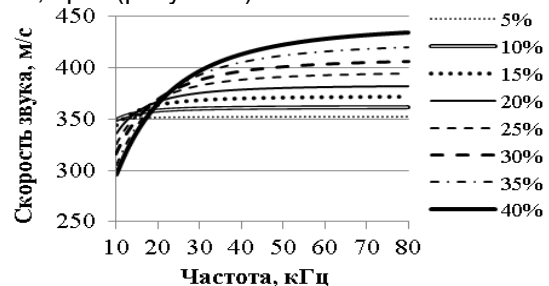


Рисунок 6 – Зависимость скорости звука от частоты УЗ волн при различном объёмном содержании водного аэрозоля (диаметр капель 20 мкм)

При такой разнице скоростей звука произойдёт наложение волновых пакетов друг на друга на расстоянии не более 40 см от поверхности излучателя (рисунок 7).

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ РАСПЫЛЕНИИ

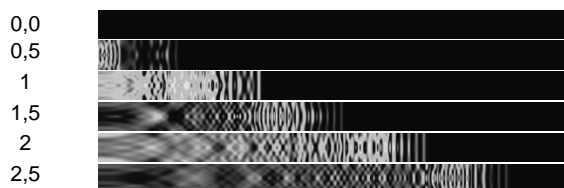


Рисунок 7 – Распределение двух последовательных УЗ импульсов с частотой 22 и 44 кГц от времени (мс) в продольном сечении

Таким образом, установлена принципиальная возможность концентрирования УЗ энергии с помощью предлагаемого способа воздействия (последовательностью разночастотных импульсов при обеспечении высокой концентрации аэрозоля более 10% об.) для реализации вторичного распыления.

Для обеспечения максимальной эффективности вторичного распыления далее были выявлены оптимальные режимы импульсного воздействия на основании ранее описанной модели распада капель.

ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЖИМОВ УЗ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

На рисунке 8 представлены зависимости порогового уровня звукового давления от диаметра капель при воздействии УЗ импульсами с частотами 22 и 44 кГц, создаваемыми одним излучателем.

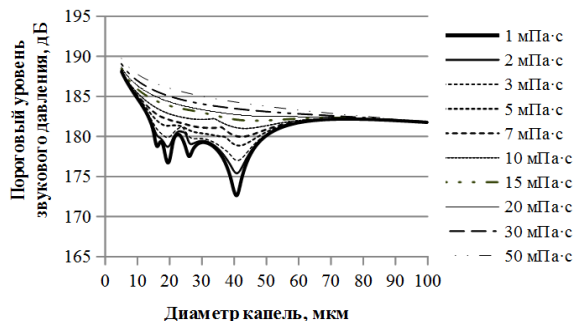
Из представленных зависимостей следует, что наложение пакетов позволяет повысить уровень звукового давления на 4 – 6 дБ при воздействии даже двумя разночастотными импульсами.

При этом, как показывают результаты, 185 дБ достаточно для разрушения капель до размеров менее 5 мкм. При этом производительность распыления может достигать 2 мл/с при площади распылительной поверхности на 1-ой стадии 1 см², если размер исходных капель составляет 80 мкм.

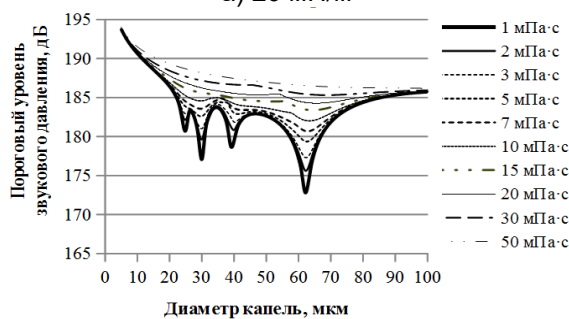
Кроме того, при воздействии разночастотными импульсами квадратичное увеличение количества резонансных диаметров капель с увеличением числа импульсов в последовательности, так как сила, действующая на каплю со стороны газового потока, пропорциональна квадрату скорости газа.

Это означает, что воздействие волновыми пакетами на 2-х частотах приведёт к возникновению 4-х резонансных диаметров. Это позволит перекрыть весь диапазон изменения резонансной частоты капли при дроб-

лении и испарении. Это приведёт к дополнительному снижению требуемого уровня звукового давления, который должен создавать излучатель в сплошной воздушной среде.



а) 20 мВт/м



б) 72 мВт/м

Рисунок 8 – Зависимости порогового уровня звукового давления от диаметра капель при воздействии импульсами 22 + 44 кГц

Таким образом, предлагаемый способ воздействия обеспечит до 20 раз более эффективную трансформацию энергии первичного УЗ воздействия в энергию распада капли по сравнению с непрерывным синусоидальным воздействием.

При данном способе воздействия для вторичного распыления будет достаточно излучателя, способного создать в сплошной воздушной среде уровень звукового давления 155 – 160 дБ.

Изготовление такого излучателя (в отличие от излучателя на 185 – 195 дБ, требуемого для традиционного непрерывного синусоидального воздействия) представляет собой технически реализуемую задачу.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-38-60082 мол_а_дк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berger, H.L. Ultrasonic Liquid Atomization / H.L. Berger // Partridge Hill Publishers – Hyde Park: NY, 1998. – С. 45–48.
2. Shalunov, A.V. Revelation of optimum modes

of ultrasonic influence for atomization of viscous liquids by mathematical modeling / A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, A.V. Shalunova, D.V. Genne, R.N. Golykh // XIII International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices, EDM. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P. 114–123.

3. Хмелев, В.Н. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. – 687 с.

4. Шалунов, А.В. Разработка и исследование новых принципов построения мелкодисперсных ультразвуковых распылителей вязких жидкостей / А.В. Шалунов, В.Н. Хмелев, Д.В. Генне, А.В. Шалунова, Р.Н. Голых // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 158–163.

5. Khmelev, V.N. Study of the process of liquid atomization from the ultrasonic disk radiator / V.N. Khmelev, A.N. Galakhov, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, A.V. Shalunova // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM – Novosibirsk: NSTU, 2013. – P. 119-122.

6. Хмелев, В.Н. Влияние ультразвукового воздействия на сохранность бактерий при распылительной сушке кисломолочных продуктов / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров, Р.С. Доровских, Е.А. Скиба, Н.А. Шавыркина // Техника и технология пищевых производств. – 2015. – Т. 39. – № 4. – С. 116-123.

7. Хмелев, В.Н. Способ кавитационного распыления вязких жидкостей / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.С. Доровских, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 5. – С. 154-156.

8. Пажи, Д.Г. Распыливающие устройства в химической технологии / Д.Г. Пажи, А.А. Корягин, Э.Л. Ламм. – М.: Химия, 1975. – 199 с.

9. Leea, M.W. Comparison and correction of the drop breakup models for stochastic dilute spray flow / M.W. Leea, J.J. Parka, M.M. Faridb, S.S. Yoona // Applied Mathematical Modelling. – 2012. – Vol. 36.

– Iss. 9. – P. 4512–4520.

10. Куперштох, А.Л. Метод решёточных уравнений Больцмана для моделирования двухфазных систем типа жидкость-пар / А.Л. Куперштох // Современная наука: сборник научных статей. – 2010. – №2. – С. 56–63.

11. Хмелев, В.Н. Измерение акустической мощности, вводимой в газовую среду ультразвуковыми аппаратами с излучателями дискового типа // В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.С. Доровских, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров // Датчики и системы. – 2016. – № 5. – С. 3-11.

12. Khmelev, V.N. Multifrequency ultrasonic transducer with stepped-plate disk / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.N. Lebedev, S.N. Tsyganok, A.N. Galahov, K.V. Shalunova // 10th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2009: – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P. 250-253.

13. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1, 2. – Москва: Наука, 1987.

Хмелёв В.Н. – д.т.н., профессор, зам. директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854) 432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru;

Шалунов А.В. – д.т.н., доцент, зав. каф. МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru;

Голых Р.Н. – к.т.н., доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

Доровских Р.С. – м.н.с., Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: dorovskih_roman@mail.ru;

Нестеров В.А. – к.т.н., доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.