

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРОВ ИСТОЧНИКОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ КОЛЕБАНИЙ ПЛОСКОГО ФИЗИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

В.Н. Хмелев

Р.Н. Голых

С.Н. Цыганок

А.Р. Барсуков

vnh@u-sonic.ru

grn@bti.secna.ru

grey@bti.secna.ru

alexbarscreed@yandex.ru

БТИ АлтГТУ, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация

Аннотация

Приведенные результаты исследований направлены на повышение эффективности процессов, реализуемых в тонких слоях различных материалов, которые созданы на пластинах (при поглощении газов жидкостями, диспергировании жидкостей, отводе теплоты, сушке формируемых покрытий, удалении льда и инородных покрытий), за счет формирования колебаний их поверхности на ультразвуковой частоте с заданной амплитудой. Для достижения необходимой амплитуды колебаний пластин и обеспечения равномерности ее распределения вдоль поверхности предложено оптимальное размещение ультразвуковых излучателей определенного размера. В качестве критерия оптимальности использована интегральная мощность колебаний всей пластины, формируемая определенным числом излучателей. Предложенная и разработанная численная модель формирования колебаний в пластине основана на решении бигармонического уравнения для распределения амплитуд колебаний с учетом конечности ее толщины и обеспечивает выбор числа, расположения и размеров ультразвуковых излучателей, необходимых для решения конкретной задачи. Результаты моделирования позволили установить, что оптимальное расположение излучателей зависит от специфических характеристик, которые необходимо учитывать при решении задачи оптимизации размеров и расположения ультразвуковых излучателей для каждой

Ключевые слова

Ультразвук, излучатели, моделирование, оптимизация, колебания плоского тела, равномерность озвучивания

конкретной пластины. Проведенные расчеты показали высокую эффективность созданной модели и возможность ее практического применения для решения задач в различных отраслях промышленности

Поступила 16.06.2023

Принята 20.11.2023

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 22-29-00828 «Кавитационно-акустическое формирование многосвязной межфазной поверхности «газ-жидкость» для решения проблемы высокоэффективного поглощения газов», <https://rscf.ru/en/project/22-29-00828/>)

Введение. Ультразвуковое воздействие [1–4] получает все более широкое распространение для интенсификации технологических процессов. В результате многочисленных научных исследований и успешной коммерческой реализации ультразвукового оборудования [5, 6] неоднократно подтверждена высокая эффективность ультразвука высокой интенсивности при инициировании протекания и интенсификации технологических процессов в веществах, находящихся в различных агрегатных состояниях [7–16].

На практике при реализации технологических процессов наибольшее распространение получили системы, основанные на использовании одной ультразвуковой колебательной системы (т. е. системы с одно- или многопакетным пьезопреобразователем, стержневыми или дисковыми излучателями) и имеющие ограниченные по размерам излучающей поверхности рабочие инструменты. Ультразвуковая колебательная система работает от настроенного на нее электронного генератора [17].

Такой подход к реализации воздействия ультразвуковых колебаний на обрабатываемые среды или объекты имеет ограниченную область воздействия или не обеспечивает равномерности распределения амплитуд колебаний в объемах жидких сред. Этот подход оказывается не применимым при реализации процессов в тонких слоях различных материалов, созданных на плоских поверхностях разного размера. Необходимость реализации указанных процессов возникает, например, при интенсификации поглощения газов жидкостями при решении задачи пленочной абсорбции карбонового следа из атмосферы или нежелательных примесей из технологических и медицинских газов. Кроме того, схожие проблемы необходимо решать при диспергировании жидкостей, отводе теплоты от нагреваемых радиаторов, при сушке формируемых покрытий, удалении льда и инородных покрытий [18, 19]. В частности, при решении задач снятия обледенения или сушки твердых листовых материалов необходи-

мо реализовывать воздействие не только как можно большей мощности, но и как можно большей площади. Таким образом, эти задачи могут быть решены только за счет формирования колебаний на ультразвуковой частоте с заданной амплитудой на поверхности большей площади. Эффективная реализация процессов в пленке жидкости или покрытии может быть обеспечена только при передаче всей площади межфазной поверхности необходимой и достаточной мощности ультразвуковых колебаний.

С учетом изложенного возникает необходимость разработки принципиально новой конструкции, состоящей из массива ультразвуковых излучателей, которые могут обеспечить равномерность колебания поверхности плоского физического объекта (пластины) с заданной амплитудой.

Решить эту многофакторную задачу путем экспериментальных исследований практически невозможно, поэтому возникает необходимость проведения теоретических исследований, направленных на выявление особенностей и закономерностей совместной работы ультразвуковых излучателей при формировании колебаний на определенном объекте. Таким образом, возникает необходимость моделирования колебательного процесса плоского физического объекта конечной толщины, осуществляемого массивом источников ультразвукового воздействия для последующей оптимизации расположения и размеров ультразвуковых излучателей по поверхности, повышения равномерности распределения амплитуд колебаний на ее участках, колеблющихся при реализации технологического процесса. Обеспечение равномерности реализации процесса за счет оптимизации распределения колебаний обеспечит повышение эффективности интенсификации реализуемого технологического процесса с минимизацией первичных финансовых затрат на приобретение ультразвукового оборудования и энергетических затрат на обеспечение его работоспособности.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Для расчета акустического поля принято решение использовать метод конечных элементов Морли. Фундаментом проводимых исследований служит линейная теория упругости. Для поиска оптимумов равномерности распределения необходима программная реализация оптимизационной перебирающей процедуры, генерирующая программные модули для компилятора FreeFEM++.

Результаты. Для решения задачи нахождения распределения ультразвуковых колебаний на плоской поверхности тонкой пластины с граничными условиями на ультразвуковых излучателях необходимо сформулировать математическую постановку. Расчетная область показана на рис. 1.

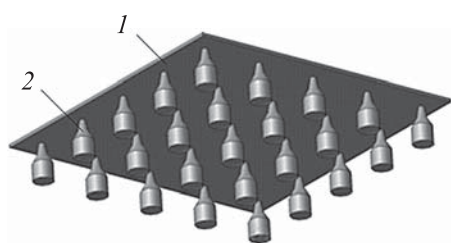


Рис. 1. Тонкая пластина 1 с присоединенными к ней ультразвуковыми излучателями 2

Для расчета распределения амплитуд колебаний по поверхности тела использовано бигармоническое уравнение, которое следует из уравнений линейной теории упругости:

$$\nabla^4 u - k^4 u = 0, \quad (1)$$

где u — комплексная амплитуда вертикальных смещений пластины, м; k — волновое число пластины, м^{-1} .

АксонOMETрическая проекция и вид сбоку изгибно-колеблющейся пластины с размещенным массивом ультразвуковых излучателей (один из вариантов) приведены на рис. 2.

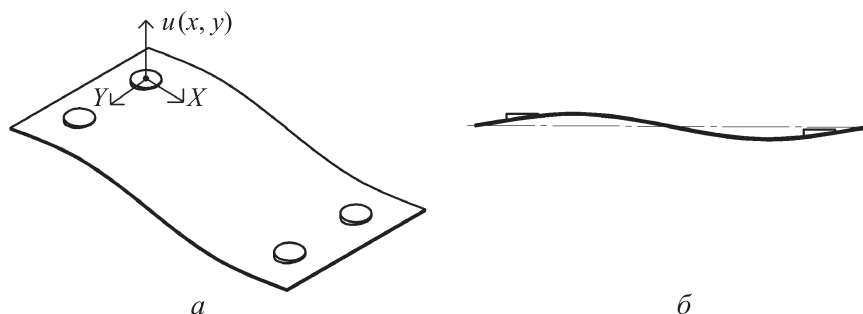


Рис. 2. Аксонометрическая проекция (а) и вид сбоку (б) изгибно-колеблющейся пластины с размещенным массивом ультразвуковых излучателей

Волновое число для тонкой пластины зависит от ее жесткости и определяется как

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)},$$

где E — модуль упругости материала пластины, Па; h — толщина пластины, м; ν — коэффициент Пуассона пластины.

В зависимости от коэффициента жесткости пластины волновое число определяется по выражению

$$k = \sqrt[4]{\frac{\rho h \omega^2}{D}} = \sqrt[4]{\frac{12(1-\nu^2)\rho h \omega^2}{Eh^2}},$$

где ρ — плотность материала пластины, кг/м^3 ; ω — круговая частота ультразвуковых колебаний, с^{-1} .

Для определения скорости звука в тонкой пластине необходимо использовать соответствующее уравнение: $c = \omega/k$.

Уравнение колебаний дополняется граничными условиями. На границе пластины выполняется условие абсолютно жесткого закрепления границ: $u=0$, $\partial u/\partial n=0$. Здесь и далее n — вектор нормали, который лежит в плоскости пластины и направлен перпендикулярно линии, ограничивающей пластину или область крепления ультразвукового излучателя.

На границе области крепления излучателя к пластине выполняется условие $u=A$, $\partial u/\partial n=0$, где A — амплитуда колебаний излучателя. Амплитуда вертикальных смещений пластины на всей области крепления излучателя равна A .

Схематично пластина с размещенными на ее поверхности излучателями показана на рис. 3.

Для расчета распределения амплитуды вертикальных смещений применен метод конечных элементов Морли. Суть метода основана на представлении бигармонического уравнения (1) в виде граничного интегрального уравнения:

$$\int_S \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) dS - \int_S k^4 u v dS = 0,$$

где v — пробная функция.

Метод конечных элементов Морли реализован в виде программного модуля для компилятора FreeFEM++. Программный модуль позволяет рассчитать распределение амплитуды вертикальных смещений пластины при заданных диаметрах областей крепления, размерах, расположении, амплитудах колебаний и числе ультразвуковых излучателей. Созданный модуль обеспечивает на порядок более высокую производительность вычислений по сравнению с классическим трехмерным методом конечных элементов (сокращение времени расчета до 10 раз при аналогичных размерах элементов расчетной сетки на поверхности пластины). Далее программный модуль взят за основу для решения задачи оптимизации распределения амплитуды колебаний.

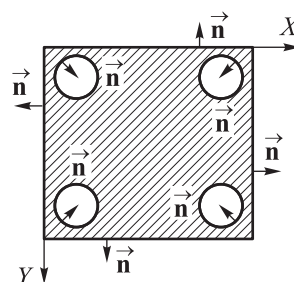


Рис. 3. Схематичное изображение пластины с ультразвуковыми излучателями (вид сверху)

Для постановки задачи оптимизации первоначально проанализированы зависимости эффективности процесса, протекающего на межфазной границе пленки жидкость–газ, на примере абсорбции газов от амплитуды ультразвуковых колебаний. Зависимости удельной поверхности межфазной границы от свойств жидкости (вязкость (рис. 4, *а*) и поверхностное натяжение (рис. 4, *б*)) приведены в [20].

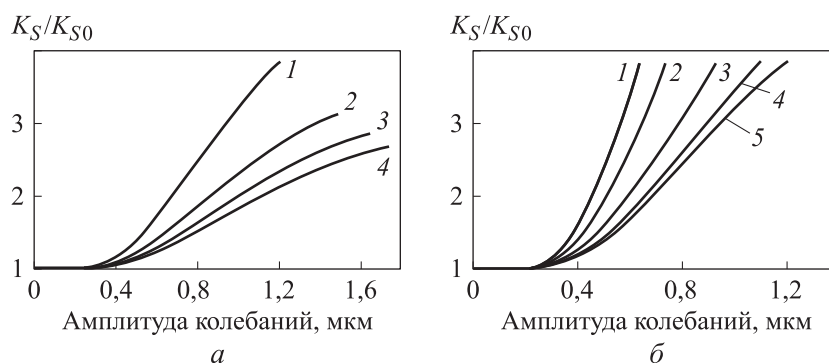


Рис. 4. Зависимости удельной поверхности межфазной границы [20]:

а — от вязкости жидкости 1 (1), 3 (2), 5 (3) и 7 мПа · с (4); *б* — от поверхностного натяжения жидкости 22 (1), 32 (2), 50 (3), 65 (4) и 72 мН/м (5)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что скорость абсорбции напрямую зависит от амплитуды колебаний и пропорциональна ей. Конечная эффективность процессов в таком случае определяется вводимой энергией, которая в свою очередь почти вся передается пленке жидкости, поскольку толщина пластины мала по сравнению с ее длиной и шириной. Наряду с энергопотреблением для реализации простоты, более высокой надежности, снижения стоимости создания и обслуживания конструкции рассматриваемого ультразвукового аппарата необходимо, чтобы один излучатель обеспечивал введение как можно большей мощности (чтобы использовать как можно меньше излучателей на единицу вводимой энергии). Поэтому принято решение оптимизировать такой показатель, как приходящуюся на один излучатель мощность.

Задача оптимизации заключается в нахождении распределения акустического поля на поверхности, которое максимизирует данный показатель. В таком случае критерием оптимальности является мощность, выделяемая на поверхности:

$$P = \rho c \omega^2 \frac{\int u^2 dS + A^2 N_{em} S_{em}}{2N_{em}},$$

где u — амплитуда колебаний на границе поверхности, м; ρc — волновое сопротивление озвучиваемой среды; S_{em} — площадь поверхности торца (области крепления) одного ультразвукового излучателя, м²; N_{em} — число излучателей.

Оптимальное распределение поля достигается решением бигармонического уравнения (1) с граничными условиями на ультразвуковых излучателях и граничными условиями Дирихле на границе области. Критерий оптимальности рассчитывается по найденному распределению поля.

Для достижения равномерного распределения амплитуд колебаний пластины применена оптимизационная процедура, основанная на методе перебора, а именно разработана программа, реализующая оптимизацию и осуществляющая вызов программного модуля для расчета распределения вертикальных смещений излучающей поверхности. В процессе оптимизации исследованы различные варианты расположения излучателей на поверхности пластины и влияние их размера на изменение критерия оптимальности.

На примере пластины с расположенными на ее поверхности на одинаковом расстоянии друг от друга (в виде матрицы) ультразвуковыми излучателями одинакового диаметра проведен численный анализ разработанной модели. На каждой итерации расчета конфигурации задано число излучателей по осям X и Y . Для каждой конфигурации расположения ультразвуковых излучателей, включая конфигурации от 2×2 до 10×10 , вычисляется приходящаяся на них мощность $P/(\rho c \omega^2)$, м². Размер пластины 200×200 мм, диаметр торца отдельного ультразвукового излучателя (диаметр области крепления) — 10 мм. Полученные результаты приведены в таблице.

Значения мощности, приходящейся на отдельный ультразвуковой излучатель

Число излучателей по оси Y	Число излучателей по оси X								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0,008	0,019	0,018	0,014	0,011	0,009	0,007	0,007	0,006
3	0,019	0,017	0,015	0,012	0,010	0,008	0,007	0,006	0,006
4	0,018	0,015	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004
5	0,014	0,012	0,009	0,008	0,006	0,005	0,005	0,004	0,004
6	0,011	0,010	0,008	0,006	0,005	0,004	0,004	0,003	0,003
7	0,009	0,008	0,007	0,005	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003
8	0,007	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002
9	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002
10	0,006	0,006	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002

Результаты анализа данных позволяют сделать вывод, что наибольшее значение мощности, приходящейся на один ультразвуковой излучатель, достигается при использовании конфигурации их расположения 2×3 (3×2) (рис. 5).

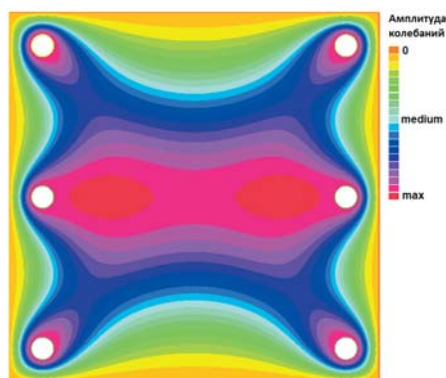


Рис. 5. Визуальное распределение амплитуд колебаний при оптимальной конфигурации расположения ультразвуковых излучателей

Следовательно, результаты моделирования свидетельствуют о том, что при установленной конфигурации расположения ультразвуковых излучателей достигается наиболее эффективное излучение поля через плоскую поверхность. Это подтверждает возможность использования определенного числа ультразвуковых излучателей для эффективной реализации технологических процессов, требующих создания колебаний определенной амплитуды на больших по площади поверхностях.

Данные о характере зависимости мощности от комбинаций числа ультразвуковых излучателей проанализированы с использованием визуальных методов (рис. 6).

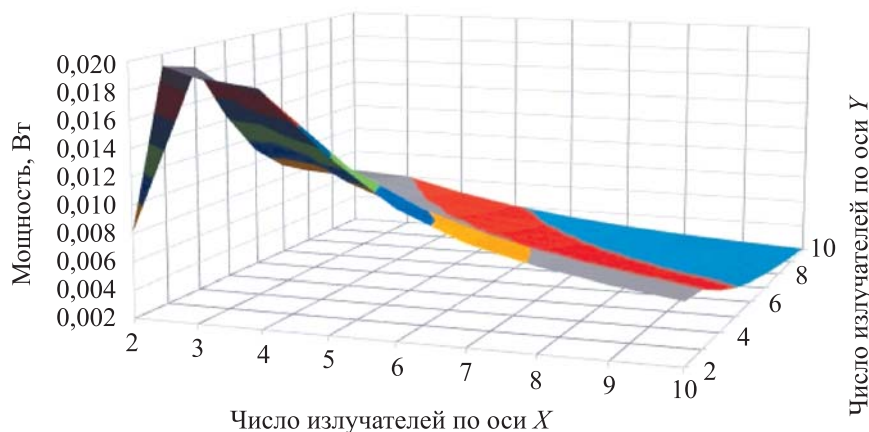


Рис. 6. Зависимость приходящейся на ультразвуковой излучатель мощности от комбинаций их расположения на плоской поверхности:

- — 0,002–0,004; ■ — 0,004–0,006; ■ — 0,006–0,008; ■ — 0,008–0,010;
- — 0,010–0,012; ■ — 0,012–0,014

Согласно зависимости на рис. 6, при увеличении числа ультразвуковых излучателей с 1×1 до 2×2 , 2×3 , 3×2 начинается резкое возрастание мощности, затем при увеличении числа излучателей по осям X и Y наблюдается снижение мощности, указывающее на нецелесообразность дальнейшего увеличения их числа. Таким образом, на основе анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что использование заданного числа ультразвуковых излучателей, расположенных в определенной матричной конфигурации, обеспечивает эффективность и равномерность распределения акустического поля. Только так обеспечивается успешная реализация технологических процессов, требующих создания ультразвуковых колебаний на больших межфазных поверхностях, размеры которых многократно превышают толщину слоя озвучиваемой среды.

Дальнейшие исследования были направлены на выявление влияния диаметра отдельного ультразвукового излучателя на эффективность введения колебаний в пленку жидкости. Расчеты проведены для наиболее распространенных ультразвуковых излучателей с диаметрами крепления 5, 10, 15 и 20 мм.

На основе выполненных расчетов установлено, что увеличение диаметра присоединительной поверхности ультразвукового излучателя приводит к повышению мощности, приходящейся на один ультразвуковой излучатель. Это свидетельствует о важности учета влияния этого размера для обеспечения оптимальной конфигурации их расположения. Большой присоединительный размер позволяет создавать более равномерные колебания пластин, что подтверждается зависимостью мощности от размеров ультразвуковых излучателей (рис. 7).

Визуальное распределение амплитуд колебаний по плоской поверхности для различных размеров ультразвуковых излучателей показано на рис. 8. При этом необходимо выбирать оптимальное число ультразвуковых излучателей, поскольку дальнейшее увеличение присоединительного размера не обеспечит требуемых для реализации процесса амплитуд или потребует использования многопакетных пьезопреобразователей.



Рис. 7. Зависимость приходящейся на ультразвуковой излучатель мощности от диаметра его торца

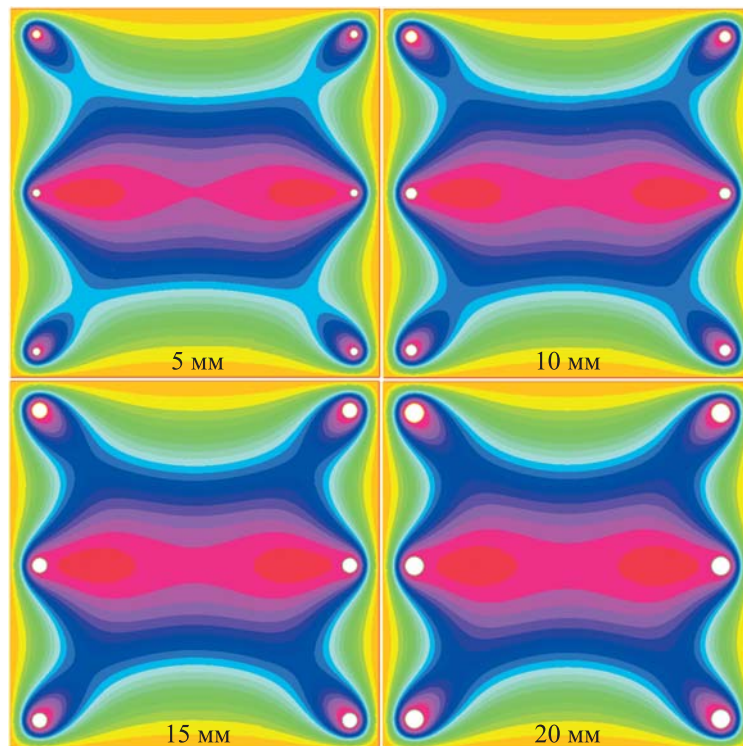


Рис. 8. Визуальное распределение амплитуд колебаний на плоской поверхности для ультразвуковых излучателей разного размера

Обсуждение полученных результатов. Предложена и разработана численная модель, позволяющая оптимизировать число и расположение ультразвуковых излучателей для обеспечения максимальной энергетической эффективности создания ультразвуковых колебаний плоских физических объектов (пластин), контактирующих с рабочей средой технологического процесса, которая представляет собой тонкий слой, покрывающий всю поверхность объекта (например, пленка жидкости, обеспечивающая поглощение углекислого газа; слой льда, который необходимо отделить; слой капиллярно-пористого вещества, содержащего влагу, которую необходимо извлечь и т. п.). Модель основана на критерии оптимальности, в качестве которого принят максимум интегральной мощности излучения, отнесенной к числу ультразвуковых излучателей. На основе анализа литературных данных о влиянии энергетической эффективности воздействия на скорость протекания процессов, требующих формирования ультразвуковых колебаний больших межфазных поверхностей (абсорбция, сушка, снятие обледенения), доказана целесообразность предложенного критерия.

Заключение. Предложенная модель позволила установить влияние числа и размеров ультразвуковых излучателей на эффективность передачи колебаний физическому объекту.

Установлено существование оптимального числа ультразвуковых излучателей, при котором эффективность передачи энергии максимальна.

Выявлен рост эффективности передачи энергии с увеличением диаметра ультразвукового излучателя, который ограничен при условии формирования равномерно распределенных колебаний на торце с использованием однопакетного пьезопреобразователя.

Созданная численная модель может стать основой для проектирования ультразвукового оборудования, осуществляющего эффективное воздействие на плоские физические объекты конечной толщины.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Boev E.V., Afanasenko V.G., Boeva N.I. Development of a design of the mixer for an intensification of chemical and technological processes in the industry. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1515, no. 4, art. 042001.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042001>
- [2] Shtepa V., Balintova M., Shykunets A., et al. Intensification of waste valorization techniques for biogas production on the example of *Clarias gariepinus* droppings. *Fermentation*, 2023, vol. 9, iss. 3, art. 225.
DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation9030225>
- [3] Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., et al. Ultrasonic devices for non-contact intensification of technological processes. *Fibre Chem.*, 2022, vol. 53, no. 9, pp. 391–394. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10692-022-10310-9>
- [4] Ojha S., Mallia J., Spiteri D., et al. Ultrasonic decontamination and process intensification. In: Gavahian M. (eds). *Emerging Food Processing Technologies. Methods and Protocols in Food Science*. Humana, New York, NY, Springer, 2022, pp. 113–131.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2136-3_8
- [5] Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Барсуков А.Р. и др. Ультразвуковой технологический аппарат с пятью рабочими инструментами различного диаметра для проведения научных исследований. *Южно-Сибирский научный вестник*, 2022, т. 4, № 44, с. 106–109. DOI: <https://doi.org/10.25699/SSSB.2022.44.4.003>
- [6] Svilainis L. Special issue on ultrasonic transducers and related apparatus and applications. *Appl. Sci.*, 2022, vol. 12, iss. 16, art. 8284.
DOI: <https://doi.org/10.3390/app12168284>
- [7] Naveena B., Armshaw P., Pembroke J. Ultrasonic intensification as a tool for enhanced microbial biofuel yields. *Biotechnol. Biofuels*, 2015, vol. 8, art. 140.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0321-0>

- [8] Yang L., Li X., Li W., et al. Intensification of interfacial adsorption of dodecylamine onto quartz by ultrasonic method. *Sep. Purif. Technol.*, 2019, vol. 227, art. 115701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115701>
- [9] Мещеряков С., Гонопольский А., Муллакаев М. и др. Реагентно-ультразвуковая интенсификация процесса седиментации поверхностных стоков на нефтеперекачивающих станциях. *Экология и промышленность России*, 2018, т. 22, № 2, с. 8–12. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-2-8-12>
- [10] Thombre N.V., Gadhekar A.P., Patwardhan A.V., et al. Ultrasound induced cleaning of polymeric nanofiltration membranes. *Ultrason. Sonochem.*, 2019, vol. 62, art. 104891. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104891>
- [11] Melnyk V., Kosova V., Ostapenko Z., et al. Investigation of the influence of ultrasound on raw materials. *Vibrations in Engineering and Technology*, 2022, no. 1, pp. 38–43.
- [12] Huang D., Men K., Li D., et al. Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrason. Sonochem.*, 2020, vol. 63, art. 10950. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104950>
- [13] Ishtiaq F., Farooq R., Farooq U., et al. Application of ultrasound in pharmaceuticals. *World Appl. Sci. J.*, 2009, vol. 6, no. 7, pp. 886–893.
- [14] Nascimento E., Mulet A., Ascheri J.L., et al. Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel. *J. Food Eng.*, 2016, vol. 170, pp. 108–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.09.015>
- [15] Mobarakeh H.D., Miner M., Wang L., et al. Application of ultrasound in regeneration of silica gel for industrial gas drying processes. *Dry. Technol.*, 2021, vol. 40, iss. 11, pp. 2251–2259. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1929296>
- [16] Garcia-Perez J.V., Carcel J.A., Riera E., et al. Intensification of low-temperature drying by using ultrasound. *Dry. Technol.*, 2012, vol. 30, iss. 11-12, pp. 1199–1208. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.675533>
- [17] Хмелев В.Н., Кузовников Ю.М., Хмелев М.В. Ультразвуковые аппараты для научных исследований. *Южно-Сибирский научный вестник*, 2017, № 1, с. 5–13. EDN: YJCIZL
- [18] Liang X., He G., Wang J., et al. Experimental study on absorption characteristics of a falling film absorber with micro-scale $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ liquid film. *Appl. Therm. Eng.*, 2021, vol. 200, art. 117719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117719>
- [19] Maio L., Moll J., Memmolo V., et al. Ultrasonic inspection for ice accretion assessment: effects on direct wave propagation in composite media. *Mech. Syst. and Signal Process*, 2022, vol. 173, art. 109025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109025>
- [20] Khmelev V.N., Golykh R.N., Tsyganok S.N., et al. Ultrasonic exposure of the liquid film for highly efficient gas absorption. *WSEAS Trans. Fluid Mech.*, 2021, vol. 16, pp. 168–179. DOI: <https://doi.org/10.37394/232013.2021.16.16>

Хмелев Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации БТИ АлтГТУ (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27).

Голых Роман Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации БТИ АлтГТУ (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27).

Цыганок Сергей Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации БТИ АлтГТУ (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27).

Барсуков Александр Романович — студент магистратуры кафедры методов и средств измерений и автоматизации БТИ АлтГТУ (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хмелев В.Н., Голых Р.Н., Цыганок С.Н. и др. Оптимизация расположения и размеров источников ультразвукового воздействия при возбуждении колебаний плоского физического объекта конечной толщины. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 3 (114), с. 133–148.

EDN: TBQSDK

OPTIMIZING THE ULTRASONIC EXPOSURE SOURCE POSITION AND DIMENSIONS DURING EXCITATION OF OSCILLATIONS OF A FLAT PHYSICAL OBJECT OF FINITE THICKNESS

V.N. Khmelev

R.N. Golykh

S.N. Tsyganok

A.R. Barsukov

vnh@u-sonic.ru

grn@bti.secna.ru

grey@bti.secna.ru

alexbarscreed@yandex.ru

**Biysk Technological Institute (Branch) of the Altay State Technical University,
Biysk, Altay Region, Russian Federation**

Abstract

The paper presents results of a research aimed at increasing efficiency of processes implemented in the thin layers of various materials. They are appearing on plates (in gas absorption by liquids, dispersion of liquids, heat removal, drying the formed coatings, ice and foreign coating removal) following their surface oscillations on the ultrasonic frequency with a given amplitude. To achieve the required plate oscillation amplitude and ensure its uniform distribution along

Keywords

Ultrasound, emitters, simulation, optimization, flat body oscillation, sound uniformity

the surface, the paper proposes an optimal position of the ultrasonic emitters of a certain size. The integral oscillation power of the entire plate, which is generated by a certain number of emitters, is applied as the optimality criterion. The proposed and developed numerical model of the oscillations formation in a plate is based on solving the biharmonic equation for the oscillation amplitude distribution, taking into account its thickness finiteness. It provides selection of number, position and size of the ultrasonic emitters required to solve a specific problem. Simulation results made it possible to identify that the emitters' optimal position was depending on specific characteristics that should be considered when solving the problem of optimizing the ultrasonic emitters' size and location for each specific plate. Computation showed high efficiency of introducing the created model and a possibility of its practical application in solving the problems in various industries

Received 16.06.2023

Accepted 20.11.2023

© Author(s), 2024

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 22-29-00828 "Cavitation-acoustic formation of a multiply connected gas-liquid interface to solve the problem of highly efficient gas absorption", <https://rscf.ru/en/project/22-29-00828/>)

REFERENCES

- [1] Boev E.V., Afanasenko V.G., Boeva N.I. Development of a design of the mixer for an intensification of chemical and technological processes in the industry. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1515, no. 4, art. 042001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042001>
- [2] Shtepa V., Balintova M., Shykunets A., et al. Intensification of waste valorization techniques for biogas production on the example of *Clarias gariepinus* droppings. *Fermentation*, 2023, vol. 9, iss. 3, art. 225. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation9030225>
- [3] Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., et al. Ultrasonic devices for non-contact intensification of technological processes. *Fibre Chem.*, 2022, vol. 53, no. 9, pp. 391–394. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10692-022-10310-9>
- [4] Ojha S., Mallia J., Spiteri D., et al. Ultrasonic decontamination and process intensification. In: Gavahian M. (eds). *Emerging Food Processing Technologies. Methods and Protocols in Food Science*. Humana, New York, NY, Springer, 2022, pp. 113–131. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2136-3_8
- [5] Khmelev V.N., Barsukov R.V., Barsukov A.R., et al. Ultrasonic technological apparatus with five working tools of different diameters for scientific research. *Yuzhno-*

- Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South-Siberian Scientific Bulletin], 2022, vol. 4, no. 44, pp. 106–109 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25699/SSSB.2022.44.4.003>
- [6] Svilainis L. Special issue on ultrasonic transducers and related apparatus and applications. *Appl. Sci.*, 2022, vol. 12, iss. 16, art. 8284. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12168284>
- [7] Naveena B., Armshaw P., Pembroke J. Ultrasonic intensification as a tool for enhanced microbial biofuel yields. *Biotechnol. Biofuels*, 2015, vol. 8, art. 140. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0321-0>
- [8] Yang L., Li X., Li W., et al. Intensification of interfacial adsorption of dodecylamine onto quartz by ultrasonic method. *Sep. Purif. Technol.*, 2019, vol. 227, art. 115701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115701>
- [9] Meshcheryakov S., Gonopolskiy A., Mullakaev M., et al. Reagent and ultrasonic intensification of process of sedimentation of superficial drains at oil pumping stations. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2018, vol. 22, no. 2, pp. 8–12 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-2-8-12>
- [10] Thombre N.V., Gadhekar A.P., Patwardhan A.V., et al. Ultrasound induced cleaning of polymeric nanofiltration membranes. *Ultrason. Sonochem.*, 2019, vol. 62, art. 104891. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104891>
- [11] Melnyk V., Kosova V., Ostapenko Z., et al. Investigation of the influence of ultrasound on raw materials. *Vibrations in Engineering and Technology*, 2022, no. 1, pp. 38–43.
- [12] Huang D., Men K., Li D., et al. Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrason. Sonochem.*, 2020, vol. 63, art. 10950. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104950>
- [13] Ishtiaq F., Farooq R., Farooq U., et al. Application of ultrasound in pharmaceuticals. *World Appl. Sci. J.*, 2009, vol. 6, no. 7, pp. 886–893.
- [14] Nascimento E., Mulet A., Ascheri J.L., et al. Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel. *J. Food Eng.*, 2016, vol. 170, pp. 108–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.09.015>
- [15] Mobarakeh H.D., Miner M., Wang L., et al. Application of ultrasound in regeneration of silica gel for industrial gas drying processes. *Dry. Technol.*, 2021, vol. 40, iss. 11, pp. 2251–2259. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1929296>
- [16] Garcia-Perez J.V., Carcel J.A., Riera E., et al. Intensification of low-temperature drying by using ultrasound. *Dry. Technol.*, 2012, vol. 30, iss. 11-12, pp. 1199–1208. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.675533>
- [17] Khmelev V.N., Kuzovnikov Yu.M., Khmelev M.V. Ultrasound diveses for scientific research. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South-Siberian Scientific Bulletin], 2017, no. 1, pp. 5–13 (in Russ.). EDN: YJCIZL
- [18] Liang X., He G., Wang J., et al. Experimental study on absorption characteristics of a falling film absorber with micro-scale NH₃/LiNO₃ liquid film. *Appl. Therm. Eng.*, 2021, vol. 200, art. 117719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117719>

[19] Maio L., Moll J., Memmolo V., et al. Ultrasonic inspection for ice accretion assessment: effects on direct wave propagation in composite media. *Mech. Syst. and Signal Process*, 2022, vol. 173, art. 109025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109025>

[20] Khmelev V.N., Golykh R.N., Tsyganok S.N., et al. Ultrasonic exposure of the liquid film for highly efficient gas absorption. *WSEAS Trans. Fluid Mech.*, 2021, vol. 16, pp. 168–179. DOI: <https://doi.org/10.37394/232013.2021.16.16>

Khmelev V.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Methods and Instruments of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute (Branch) of the Altay State Technical University (Trofimova ul. 27, Biysk, Altay Region, 659305 Russian Federation).

Golykh R.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Methods and Instruments of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute (Branch) of the Altay State Technical University (Trofimova ul. 27, Biysk, Altay Region, 659305 Russian Federation).

Tsyganok S.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Methods and Instruments of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute (Branch) of the Altay State Technical University (Trofimova ul. 27, Biysk, Altay Region, 659305 Russian Federation).

Barsukov A.R. — Master's Student, Department of Methods and Instruments of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute (Branch) of the Altay State Technical University (Trofimova ul. 27, Biysk, Altay Region, 659305 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Khmelev V.N., Golykh R.N., Tsyganok S.N., et al. Optimizing the ultrasonic exposure source position and dimensions during excitation of oscillations of a flat physical object of finite thickness. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 3 (114), pp. 133–148 (in Russ.). EDN: TBQSDK