

УДК 544.032

ИЗМЕНЕНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

© 2023 г. Б. С. Лунин¹, *, А. Л. Николаев¹¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: luninboris@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.06.2022 г.

После доработки 31.12.2022 г.

Принята к публикации 16.01.2023 г.

В работе приведены результаты определения изменений рельефа поверхности пластин из кварцевого стекла под действием ультразвуковых колебаний методом вариации Аллана. Применение этого метода позволило количественно оценить составляющие шероховатости, соответствующие поверхностным дефектам определенного размера. Показано, что длительная ультразвуковая обработка пластин из кварцевого стекла при плотности мощности излучения 10 Вт/см^2 приводит к существенному изменению поверхности: высота рельефа, связанная с мелкомасштабными поверхностными дефектами размером 0.125 мкм , увеличилась примерно на 40%, а с крупными дефектами (12 мкм) — уменьшилась примерно на 30%. Наблюдаемые изменения поверхности, по-видимому, связаны с кавитационным разрушением крупномасштабных поверхностных дефектов локальными кумулятивными струями.

Ключевые слова: ультразвук, кварцевое стекло, поверхность**DOI:** 10.31857/S0002337X23030090, **EDN:** YSQBVE

ВВЕДЕНИЕ

Высокое качество обработки поверхности является одним из основных требований при производстве оптических деталей, кварцевых резонаторов и микроэлектронных компонентов. Рельеф поверхности твердого тела формируется в ходе ряда этапов обработки (механической, химической), некоторые из них для повышения эффективности включают ультразвуковое воздействие [1–5]. Так, например, оборудование для механической обработки стекла содержит ультразвуковые обрабатывающие головки, для очистки поверхности используют ультразвуковые ванны и т.п. Использование ультразвука действительно увеличивает производительность обработки, однако может оказывать на поверхность разрушительное действие, приводя, например, к уменьшению добротности высококачественных механических резонаторов [6, 7]. Поэтому при оптимизации производственной технологии информация о состоянии поверхности имеет важное значение.

Обычно качество обработки поверхности характеризуют шероховатостью, основные параметры и методы измерения которой хорошо известны (см., например, [8]). Как правило, используют такие параметры, как средняя шероховатость R_a , которая представляет собой среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений про-

филя в пределах базовой длины; шероховатость R_z — сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин; наибольшая высота профиля $R_{\max}$. Кроме того, используют среднеквадратичную шероховатость, среднеквадратичный наклон поверхности, а также функции распределения микронеровностей по высотам и углу и др. [9, 10]. Эти параметры в целом характеризуют рельеф поверхности, однако не позволяют детально отследить его изменение при ультразвуковой обработке, так как кавитационные процессы по-разному воздействуют на поверхностные дефекты различных размеров.

С этой точки зрения весьма полезными могут оказаться статистические методы анализа рельефа поверхности. Известны фрактальные методы описания поверхности, начиная с молекулярного уровня [11, 12], использующие различные процедуры фрактального анализа профилей шероховатости обработанных поверхностей и вычисления фрактального эквивалента среднеквадратичной шероховатости. Данные методики успешно работают на реальных поверхностях полированных, притертых, фрезерованных и точеных образцов [13, 14].

Для количественной оценки изменений поверхности при ультразвуковом воздействии может быть использован метод вариации Аллана,

который успешно применяется для анализа случайных скалярных величин [15–18]. Сущность метода вариации Аллана состоит в вычислении дисперсии не самих отклонений случайного процесса (в данном случае – случайное изменение высоты рельефа поверхности твердого тела вдоль выбранной координаты), а разницы средних значений двух соседних выборок. Пусть имеется массив из n измерений высот поверхности h_i , сделанных вдоль координаты x через равные промежутки Δx . Он может быть разделен на K групп, каждая из которых будет содержать M измерений, сделанных на интервале $x = M\Delta x$ ($M = 1, 2, 3 \dots M < n/2$). Для каждой группы можно определить среднее значение измеряемого параметра $\bar{H}_K$, усредняя все значения h_i , попавшие в эту группу. Величина x тогда представляет собой интервал осреднения измеренных значений h_i в группе с размером M , т.е. характеризует линейный размер участка поверхности. Вычисление дисперсии Аллана σ_A^2 состоит в определении дисперсии разницы средних значений $\bar{H}_K$ двух соседних групп:

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{K=1}^K [\bar{H}_{K+1}(M) - \bar{H}_K(M)]^2. \quad (1)$$

Варьируя размер группы M (и, соответственно, интервал осреднения x), вычисляют зависимость $\sigma_A^2(x)$. Вычисление дисперсии Аллана может быть интерпретировано как прохождение входных данных через перестраиваемый полосовой размерный фильтр; изменяя интервал осреднения x , можно выделить и количественно оценить составляющие шероховатости, соответствующие определенным по размеру поверхностным дефектам.

Цель настоящей работы состояла в определении методом вариации Аллана изменений рельефа поверхности кварцевого стекла, сформированных под действием ультразвуковых колебаний.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В эксперименте исследовался рельеф поверхности тонкошлифованных пластин размером $10 \times 10 \times 1$ мм, изготовленных из кварцевого стекла марки КУ-1, до и после ультразвуковой обработки в дистиллированной воде при комнатной температуре. При обработке пластина закреплялась в специальном держателе и размещалась в рабочей зоне преобразователя ультразвуковой установки типа УЗДН-2Т. Интенсивность ультразвуковых колебаний составляла до 10 Вт/см², частота – 22 кГц, продолжительность воздействия – до 8 ч. Интенсивность кавитации у поверхности пластины контролировали с помощью кавитометра IC-3MS (BSUIR, Minsk, Belarus) по величине амплитуды субгармоники сигнала. Среднее отклонение ин-

тенсивности за период ультразвуковой обработки составило 20%.

Рельеф поверхности измерялся с помощью лазерного профилометра Olympus Lext. На каждом этапе измерения регистрировалось 7–10 профилей поверхности в произвольно выбранных направлениях, величина базовой линии составляла 0.15 мм, шаг измерения – 0.125 мкм. Вычисление вариации Аллана выполняли с помощью программы Alavar 5.2 [19], полученные результаты вычислений усреднялись по всем измеренным профилям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены типичные профили поверхности кварцевой пластины до (а) и после (б) ультразвуковой обработки в течение 8 ч при плотности мощности ультразвуковых колебаний 10 Вт/см². Сравнение рассчитанной средней шероховатости поверхности R_a до и после ультразвуковой обработки показывает, что длительная ультразвуковая обработка уменьшила шероховатость с ~ 1.3 до ~ 0.7 мкм. Однако средняя шероховатость никак не учитывает качественное различие в характере дефектов поверхности, хорошо видимое на профиллограммах, приведенных на рис. 1. Метод вариации Аллана позволяет оценить эти изменения рельефа поверхности количественно. На рис. 2 показаны две кривые отклонения Аллана (отклонение Аллана равно квадратному корню из дисперсии Аллана), рассчитанные для этой же поверхности до и после ультразвуковой обработки. Каждая из них представляет собой усреднение по измеренным, произвольно выбранным профилям поверхности. Из рис. 2 хорошо видно, что высота рельефа, образованная дефектами поверхности размером ~ 1 мкм, при ультразвуковой обработке практически не изменяется. Однако высота рельефа, связанная с мелкомасштабными поверхностными дефектами размером 0.125 мкм, увеличилась примерно на 40%, а связанная с крупными дефектами (12 мкм), наоборот, уменьшилась примерно на 30%. Наблюдаемые изменения рельефа поверхности при ультразвуковой обработке кварцевого стекла, очевидно, связаны с характером взаимодействия ультразвуковой волны с поверхностью.

Акустическая кавитация представляет собой эффективное средство концентрации энергии звуковой волны низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных парогазовых пузырьков [20]. В фазе разрежения акустической волны в жидкости образуется разрыв в виде полости, заполненной насыщенным паром жидкости и растворенным в ней газом. В фазе положительного давления происходит захлопывание такой полости. В момент схлопывания давление и температура газа в поло-

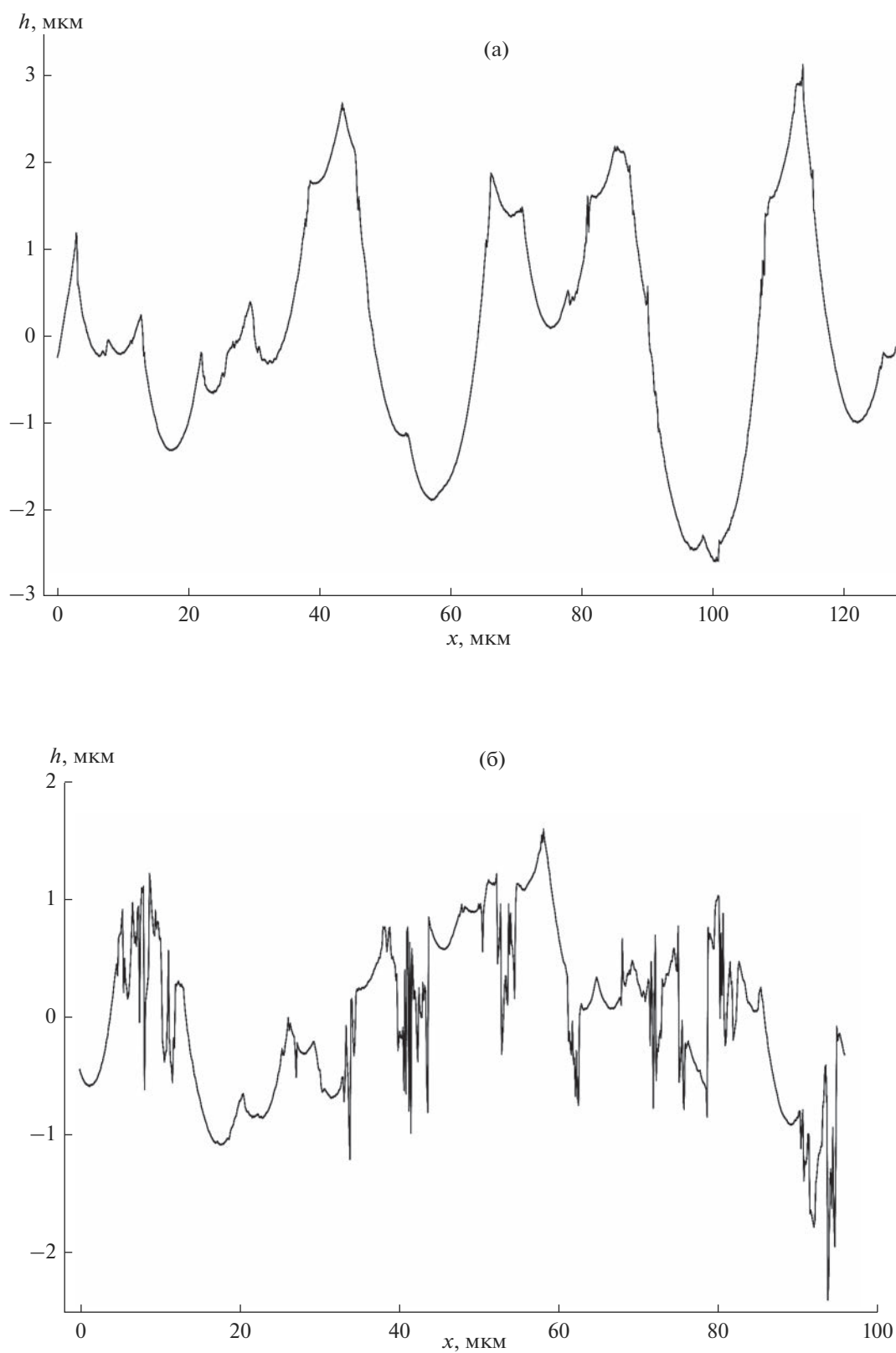


Рис. 1. Типичные профили поверхности кварцевой пластины до (а) и после (б) ультразвуковой обработки.

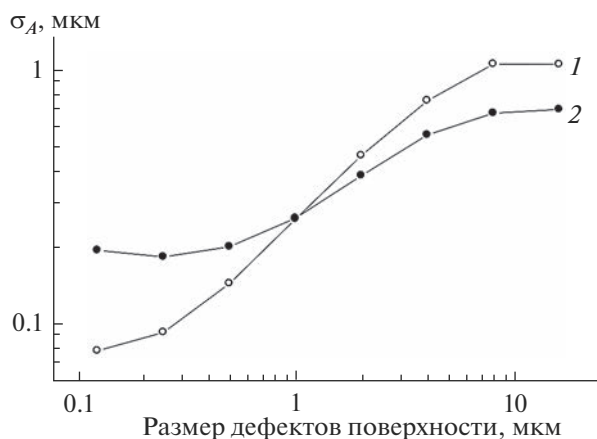


Рис. 2. Кривые отклонения Аллана по высоте рельефа поверхности кварцевой пластины в зависимости от размера поверхностных дефектов до (1) и после (2) ультразвуковой обработки.

сти достигают значительных величин (по некоторым данным — до ~ 100 МПа и $\sim 10000^\circ\text{C}$).

Существует несколько гипотез о природе кавитационного разрушения. Некоторые исследователи придерживаются точки зрения, что причиной кавитационного разрушения является ударная волна, возникающая в жидкости в тот момент, когда кавитационная полость, достигая минимального объема, вновь начинает расширяться под действием давления пара и газа, сжатых в полости. Нумачи [21] измерял напряжения, возникающие в твердом теле при захлопывании кавитационных пузырьков, образуемых ультразвуком. Величина импульса давления, измеренная автором, составила 7 МПа/с. Автор считает, что импульсы давления, достаточные для разрушения твердых тел, излучаются при сжатии кавитационных пузырьков до размера 0.017–0.062 мм.

Другой подход в качестве основного разрушающего твердую поверхность фактора рассматривает т. н. кумулятивные струи. Так, Корнфельд и Суворов [22] предположили, что благодаря неустойчивости сферической формы кавитационных полостей, находящихся вблизи твердой поверхности, между средой и полостью могут возникнуть гидродинамические силы, вызывающие образование струи жидкости ударяющейся с большой скоростью о поверхность твердого тела [23, 24].

По теоретическим оценкам, скорость струи составляет $\sim 10^3$ м/с. Струи имеют утолщенное основание и экспоненциальную образующую, причем диаметр головной части на примерно порядок меньше диаметра пузырька. Поэтому высокоскоростные кумулятивные струи создают локальное давление порядка 10^2 – 10^3 МПа. Высокоскоростная киносъемка захлопывающихся пузырьков, образованных электрической искрой в воде, по-

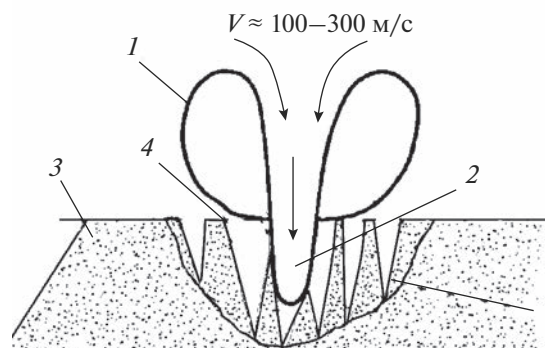


Рис. 3. Схема кавитационного разрушения элементов поверхности стекла: 1 — коллапсирующий пузырек ($R \approx 10$ мкм), 2 — кумулятивная струя ($R \approx 1$ мкм, $P \approx 10^2$ – 10^3 МПа), 3 — поверхность стекла, 4 — «выдавленный» материал (стадия пластической деформации), 5 — зона поверхностных разрушений.

казала, что струя жидкости врывается в захлопывающуюся кавитационную полость и взаимодействует с поверхностью твердого тела, разрушая ее (рис. 3).

Хорошо известно, что даже на тщательно обработанной поверхности стекла всегда имеются микротрещины или зародыши микротрещин. При воздействии кумулятивной струи на устье микротрещины в ней на короткий интервал времени возникает расклинивающее давление, которое, в соответствии с теорией прочности Гриффитса, при превышении критического значения приводит к росту трещины и разрушению материала [25].

Наблюдаемый в эксперименте характер поверхностных нарушений может быть объяснен действием таких струй, которые разрушают крупные дефекты поверхности, соразмерные с диаметром головной части кумулятивной струи (≈ 10 мкм), формируя в результате дефекты меньшего размера [26]. Глубина разрушений ограничивается толщиной нарушенного поверхностного слоя, который образуется при механической шлифовке стекла. Прочность материала в этом слое (как и критическое напряжение разрушения) существенно ниже, чем в монолите стекла, для разрушения которого требуются значительно большие механические напряжения. В результате рост трещины при воздействии ультразвука происходит главным образом в поверхностном слое. В эксперименте, как уже отмечалось выше, наблюдается примерное равенство между уменьшением высоты рельефа, связанного с крупными дефектами, и увеличением высоты рельефа, создаваемого мелкомасштабными поверхностными дефектами, что указывает на то, что они являются продуктами разрушения крупномасштабных дефектов. Это подтверждает-

ся и уменьшением средней шероховатости поверхности R_a .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты определения изменений рельефа поверхности кварцевого стекла под действием ультразвуковых колебаний методом вариации Аллана. Показано, что длительная ультразвуковая обработка пластин из кварцевого стекла при плотности мощности излучения 10 Вт/см^2 приводит к существенному изменению поверхности: высота рельефа, связанная с мелкомасштабными поверхностными дефектами размером 0.125 мкм , увеличилась примерно на 40%, а с крупными дефектами (12 мкм) — уменьшилась примерно на 30%.

Наблюдаемые изменения поверхности, по-видимому, связаны с кавитационным разрушением крупномасштабных поверхностных дефектов локальными кумулятивными струями. При воздействии кумулятивной струи на устье поверхностной микротрещины в ней кратковременно возникает расклинивающее давление, которое при превышении критического значения приводит к росту трещины, а затем и к разрушению материала. Глубина этих разрушений ограничивается толщиной нарушенного поверхностного слоя, в котором прочность материала ниже, чем в монолите стекла.

Применение метода вариации Аллана для анализа состояния поверхности позволяет облегчить выявление конкретного механизма кавитационного разрушения по корреляции режима воздействия (частота, интенсивность, температура и др.) с характеристикой возникающих дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bu X., Alheshibri M. The Effect of Ultrasound on Bulk and Surface Nanobubbles: A Review of the Current Status // *Ultrason. Sonochem.* 2021. V. 76. P. 105629. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2021.105629>
2. Kruszelnicki M., Hassanzadeh A., Legawiec K.J., Polowczyk I., Kowalczyk P.B. Effect of Ultrasound Pre-Treatment on Carbonaceous Copper-Bearing Shale Flotation // *Ultrason. Sonochem.* 2022. V. 84. P. 105962. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2022.105962>
3. Lyubimova T., Rybkin K., Oscar Fattalov O., Kuchinskiy M., Filippov L. Experimental Study of Temporal Dynamics of Cavitation Bubbles Selectively Attached to the Solid Surfaces of Different Hydrophobicity under the Action of Ultrasound // *Ultrasonics.* 2021. V. 117. P. 106516. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106516>
4. Novikova L., Ayrault P., Fontaine C., Chatel G., Jérôme F., Belchinskaya L. Effect of Low Frequency Ultrasound on the Surface Properties of Natural Aluminosilicates // *Ultrason. Sonochem.* 2016. V. 31. P. 598–609. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2016.02.014>
5. Lee J., Yasui K., Ashokkumar M., Kentish S.E. Quantification of Cavitation Activity by Sonoluminescence to Study the Sonocrystallization Process under Different Ultrasound Parameters // *Cryst. Growth. Des.* 2018. V. 18. P. 5108–5115. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.8b00547>
6. Аганин А.А., Гусева Т.С., Косолапова Л.А., Малахов В.Г. Динамика пузырька и импульсное нагружение твердой поверхности при акустическом воздействии // *Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. физ.-мат. науки.* 2021. Т. 163. С. 31–47. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2021.1.31-47>
7. Аганин А.А., Косолапова Л.А., Малахов В.Г. Динамика пузырька газа в жидкости вблизи твердой поверхности // *Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. физ.-мат. науки.* 2018. Т. 160. Вып. 1. С. 154–164.
8. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. ГОСТ 2789-73. Стандартиформ. 2006.
9. Айман О. Динамика формирования поверхностной шероховатости при обработке свободным абразивом // *Дис. ... к.т.н.* 05.11.07. С-П.: Университет ИТМО, 2005. 131 с.
10. Miller P.E., Suratwala T.I., Wong L.L., Feit M.D., Menapace J.A., Davis P.J., Steele R.A. The Distribution of Subsurface Damage in Fused Silica // *Laser-Induced Damage Opt. Mater.* 2005. V. 5991. P. 599101. <https://doi.org/10.1117/12.638821>
11. Patrikar R.M. Modeling and Simulation of Surface Roughness // *Appl. Surf. Sci.* 2004. V. 228. № 1–4. P. 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.01.010>
12. Pfeifer P. Fractal Dimension as Working Tool for Surface-roughness Problems // *Appl. Surf. Sci.* 1984. V. 18. № 1–2. P. 146–164.
13. Jahn R., Truckenbrodt H. A Simple Fractal Analysis Method of the Surface Roughness // *J. Mater. Process. Technol.* 2004. V. 145. № 1. P. 40–45. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00860-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00860-4)
14. Панасюк Г.П., Козерожец И.В., Ворошилов И.Л., Ивакин Ю.Д., Привалов В.И., Данчевская М.Н. Формы воды на поверхности и в объеме диоксида кремния // *Журн. неорган. химии.* 2021. Т. 66. № 5. С. 623–630. <https://doi.org/10.31857/S0044457X21050123>
15. Baner J.A. Characterization of Frequency Stability // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1971. IM-20. № 2. P. 105–120.
16. Zhou D., Xu P., Gu Q. Stochastic Nested Variance Reduction for Nonconvex Optimization // *J. Mach. Learn. Res.* 2020. V. 21. № 1. P. 4130–4192.
17. Ma Y., Hu Y., Qiao S., He Y., Tittel F.K. Trace Gas Sensing Based on Multi-Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy // *Photoacoustics.* 2020. V. 20. P. 100206. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2020.100206>
18. Wang P., Luan C-Y., Qiao M., Um M., Zhang J. Single Ion Qubit with Estimated Coherence Time Exceeding One Hour // *Nature Commun.* 2021. V. 12. 233. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20330-w>
19. ALAMATH. Allan Variance Software. URL: <http://www.alavar.org/>.
20. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // *Физическая акустика* / Под ред. Мэзона У. М.: Мир, 1967. Т. 1. С. 7–138.

21. *Нумачи Ф.* Экспериментальное исследование кавитации, возбуждаемой ультразвуком // Труды американского общества Инженеров механиков. Теоретические основы инженерных расчетов. Сер.Д. 1965. № 4. С. 128–139.
22. *Kornfeld M., Suvorov L.* On the Destructive Action of Cavitation // J. Appl. Phys. 1944. V. 15. № 3. P. 495–497.
23. *Peng C., Tian S., Li G., Wei M.* Enhancement of Cavitation Intensity and Erosion Ability of Submerged Cavitation Jet by Adding Micro-Particles // Ocean Eng. 2020. V. 209. P. 107516.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107516>
24. *Tan K.L., Yeo S.H.* Bubble Dynamics and Cavitation Intensity in Milli-Scale Channels under an Ultrasonic Horn // Ultrason. Sonochem. 2019. V. 58. P. 104666.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104666>
25. *Roylance D.* Introduction to Fracture Mechanics // URL: www.pharmacoengineering.com/wp-content/upload/2018/03/MIT3_11F99_frac.pdf
26. *Ma G., Xia W., Xie G., Peng Y.* Ultrasound-Assisted Detachment Behavior of Glass Beads and Fragments from a Fixed Bubble // Powder Technol. 2019. V. 355. P. 611–616.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.092>