

УДК 534.2

**В.Н. Тищенко<sup>1)</sup>, А.Г. Пономаренко<sup>1)</sup>, В.Г. Посух<sup>1)</sup>, А.А. Павлов<sup>2)</sup>, В.И. Запрягаев<sup>2)</sup>,  
А.И. Гулидов<sup>2)</sup>, Э.Л.Бояринцев<sup>1)</sup>, И.Н.Кавун<sup>2)</sup>, А.В. Мелехов<sup>1)</sup>, М.П. Голубев<sup>2)</sup>,  
Ал.А.Павлов<sup>2)</sup>, Л.С. Голобокова<sup>1)</sup>, И.Б. Мирошниченко<sup>1)</sup>, А.С. Шмаков<sup>2)</sup>.**

**ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ЗВУКА, СОЗДАВАЕМЫЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНИ  
ШИРОКОАПЕРТУРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

<sup>1)</sup> Институт лазерной физики СО РАН. Россия, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 13/3

<sup>2)</sup> Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/3. [tvn25@ngs.ru](mailto:tvn25@ngs.ru)

*Исследуется формирование звука, создаваемого в воздухе при облучении мишени широкоапертурным лазерным излучением. Метод основан на механизме объединения ударных волн. Диэлектрики (стекло, оргстекло, капролон) и металлы (сталь, титан, серебро) облучались цугом импульсов CO<sub>2</sub>-лазеров с энергией до ~ 200 Дж. Найдены критерии, при выполнении которых цуги импульсов могут создавать одновременно ультразвук и низкочастотный звук. При оптимальном облучении в звук преобразуется ~ 20 % мощности излучения. В опытах не выявлено ограничений применимости критерии и возможности преобразования лазерного излучения в звук. Результаты представляют интерес для дистанционного создания звука с уникальным спектром.*

Поглощение звука в воздухе и большая длина волны ограничивают дальность транспортировки ультразвука и инфразвука с узкой диаграммой направленности. Дистанционное создание локализованного источника звука возможно с использованием оптоакустических методов, наиболее развитых для генерации звука в воде [1-3]. В настоящей работе развивается метод [4-6], в котором достижимы высокая эффективность преобразования лазерного излучения в звук, большая дальность и управление спектром. В методе используется импульсно-периодическое (ИП) лазерное излучение с частотой повторения  $f$  десятки кГц и превышением пиковой мощности над средней в 100 и более раз. Компактность возможна в твердотельных лазерах: масса ~5 кг/кВт, КПД ~0.2, мощность ~150 кВт, излучение непрерывное или с низкой частотой повторения импульсов (см. например, достижения Textron, Northrop Grumman Space Technology, General Atomics).

Источником звука является оптический пульсирующий разряд (ОПР), создаваемый цугами ИП лазерного излучения. ОПР горит в воздухе или на поверхности твердых тел (мишень). Частота повторения цугов  $F \ll f$ . Каждый импульс создает пробой газа и ударную волну (УВ). При определенном соотношении (критерии) между  $f$  и энергией импульсов  $Q$  действует механизм объединения ударных волн (МОВ): фазы сжатия УВ, частично перекрываясь, создают низкочастотную волну (НВ), длина которой линейно зависит от числа импульсов в цуге и затрат энергии. Управление спектром возможно при изменении  $F$ ,  $f$  и  $Q$ . В отличие от метода амплитудной модуляции доля мощности на частоте  $F$  растет при повышении  $f$ . Ранее ОПР и критерии исследовались для ОПР, горящего в газе в фокусе ИП излучения, неподвижном или перемещающемся со скоростью ~300 м/с [5, 6]. КПД достигал  $\eta \sim 0.25$ . Критерии получены для сферического источника УВ, позволяют определить параметры излучения при управлении спектром звука. МОВ действует при различной природе источника УВ, в разных средах, в том числе, в плазме с магнитным полем [7].

Дальность ОПР в воздухе ограничена высоким порогом пробоя  $q \sim 2 \text{ ГВт}/\text{см}^2$ . Дистанционное создание ОПР возможно при облучении мишней, где порог пробоя много меньше  $q \sim 3 \div 5 \text{ Дж}/\text{см}^2$  [8]. Энергия поглощается в тонком слое  $h \sim 1 \text{ см}$  вблизи мишени, размер лучей на мишени при большом расстоянии до нее может быть  $D \gg h$ . В связи с этим необходимо изучение критериев МОВ при облучении мишени широкоапертурными лазерными импульсами. Актуально определение оптимальных режимов облучения для широкого класса материалов мишени.

Цель работы – поиск критериев МОВ и определение КПД преобразования энергии лазерных импульсов в УВ, создаваемые оптическими пробоями на мишени, поглощающей излучение CO<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$ ). Длительность импульсов ~1 мкс, размер зоны облучения (~1–5 см). Опыты проведены с металлами – титан, сталь, серебро, а также диэлектриками – стекло оконное, оргстекло, капролон. Свойства этих веществ сильно отличаются, поэтому результаты опытов отражают взаимодействие излучения с широким классом мишней в атмосферном воздухе.

Покажем, что критерии сферического источника УВ [4-6] применимы для реально достижимых мощностей ИП излучения. Критерии для неподвижного источника УВ включают безразмерную частоту повторения импульсов

$$\omega = fR_0/C_0 \quad (1)$$

и граничные частоты областей, в которых взаимодействие УВ качественно различно:

$$\omega_1 \approx 0.7 \text{ и } \omega_2 \approx 5.8 \quad (2)$$

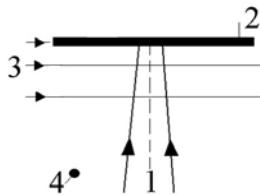
$C_0$  – скорость звука в газе,  $Q$  – энергия лазерных импульсов, динамический радиус равен

$$R_0 [\text{см}] = 100 \cdot (b \cdot \delta Q [\text{Дж}]/p_0 [\text{бар}])^{1/3} \approx 2.15 \cdot (b \cdot \delta Q/p_0 [\text{атм.}])^{1/3} \quad (3)$$

$b \approx 0.3 \div 0.8$  – доля энергии, поглощаемой в лазерной плазме. В неограниченном пространстве  $b=1$ , на мишени  $b=2$ . При  $\omega < \omega_1$  УВ не взаимодействуют, в диапазоне  $\omega_1 < \omega < \omega_2$  действие МОВ усиливается при увеличении  $\omega$ :

формируется постоянная компонента давления НВ, пульсации на частоте  $f$  уменьшаются. При  $\omega > \omega_2$  цуги УВ создают НВ, которая содержит сильную постоянную составляющую давления и пульсации с частотой  $f$ .

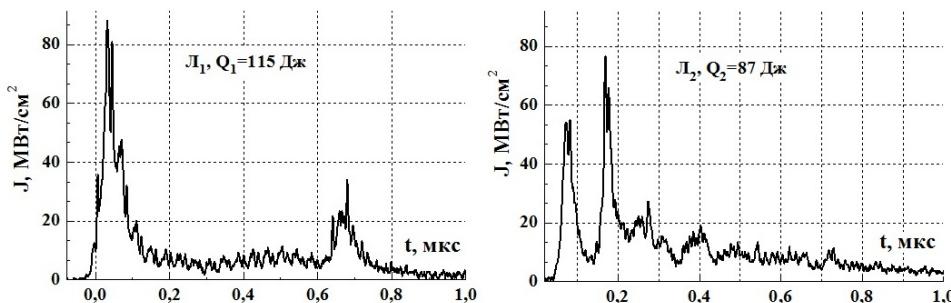
Из расчетов следует, что (1)÷(3) применимы при  $R_3/D < 2$ . Подставляя в  $R_3$  энергию импульсов  $Q = \pi \cdot D^2 \cdot q/4$ , находим максимальные размеры зоны облучения  $D < 2 \cdot \delta \cdot q/p_0$  и среднюю мощность ИП  $W < 27.2 \cdot \omega \cdot \delta \cdot q^2/p_0$  [кВт]. Здесь  $q = Q/S$  – плотность энергии излучения на мишени и  $C_0 = 3.4 \cdot 10^4$  см/с. Полагая для  $q \sim 5$  Дж/см<sup>2</sup> и  $\omega = 5$ ,  $\delta = 1$  получаем  $D < 10$  см,  $W < 3400$  кВт. Применимость (1)÷(3) для разных материалов и режимов облучения показана в опытах. Схема измерений показана на рис. 1.



**Рис. 1.** 1 – лазерные импульсы, 2 – мишень, 3 – излучение лазера теневой диагностики, 4 – датчик давления УВ.

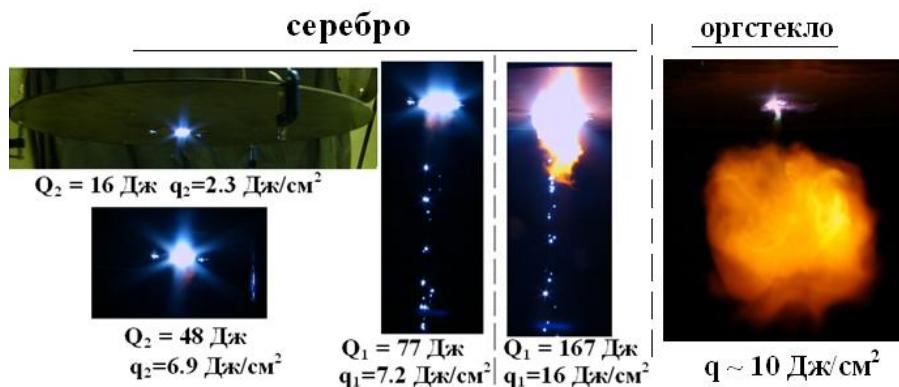
Оптические пробои создавались при облучении мишени двумя импульсами СО<sub>2</sub>-лазеров с регулируемой задержкой  $t_d$ . Форма импульсов представлена на рис. 2.

Лучи фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 120 см. Облучалась центральная часть мишени, которые имели форму диска диаметром 50 см, толщиной более 3 мм, серебряная мишень закреплялась на стальном диске. Мишень располагалась между линзой и фокусом на расстоянии 20÷60 см от фокуса. Варьировались энергия импульсов  $Q = 20 \div 250$  Дж,  $q \sim 1 \div 100$  Дж/см<sup>2</sup>, площадь лучей на мишени  $S = 2.5 \div 38$  см<sup>2</sup>. Рассмотрено облучение, оптимальные для МОВ и заведомо неоптимальные. Например, на УВ и их объединение мог влиять факел лазерной плазмы и пробои на аэрозолях. Значение  $\omega$  изменялось за счет  $Q$  и  $t_d$ . При  $p_0 = 1$  атм. и  $C_0 = 3.4 \cdot 10^4$  см/с выражение (1) имеет вид  $\omega = 79 \cdot Q_2^{1/3} / t_d$  [мкс]. Давление УВ и волны в мишени измерялись датчиками. Для визуализации градиентов плотности, в том числе УВ, использовался теневой метод. Диаметр оптического поля равен 15 см.



**Рис. 2.** Форма импульсов излучения первого ( $L_1$ ) и второго лазеров.  $q_1 = 10.8$  Дж/см<sup>2</sup> и  $q_2 = 12.3$  Дж/см<sup>2</sup>.

материалов. Серебро сильно отражает и фокусирует излучение между мишенью, а также в фокусе отраженного излучения и на частицах аэрозолей воздуха. Облучение оргстекла, в отличие от металлов или стекла, сопровождается наработкой большого количества паров, их перемешивание с воздухом сопровождается горением. Задержка вспышки равна нескольким мс, длительность свечения  $\sim 10 \div 20$  мс.



**Рис. 3.** Свечение лазерной плазмы, создаваемой при облучении мишени из серебра и оргстекла. Излучение направлено на мишень снизу вверх под углом, близким к 90 градусов

#### Эксперименты по проверке критериев МОВ

На рис. 4 показано объединение УВ, создаваемых при облучении оргстекла. Площадь лучей  $S_1 = 38$  см<sup>2</sup>,  $S_2 = 22$  см<sup>2</sup>.  $Q_1, Q_2$  – энергия первого и второго импульсов,  $t_d$  – задержка второго импульса. При больших  $\omega$  УВ, частично объединяясь, создают НВ, длина, которой почти в два раза больше, чем УВ от одиночных импульсов. Рис. 5 иллюстрирует применимость критериев МОВ при облучении стекла для существенно меньших  $Q$  и  $S$  ( $S_1 = 9.5$  см<sup>2</sup>,  $S_2 = 5.5$  см<sup>2</sup>). Как видно, МОВ проявляется при тех же значениях  $\omega$ , что для оргстекла.

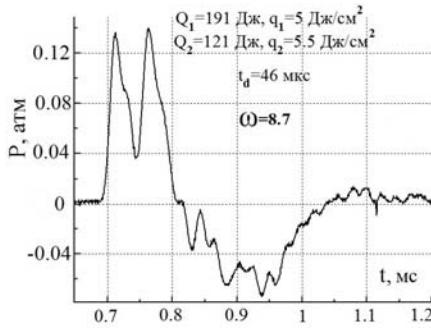


Рис. 4

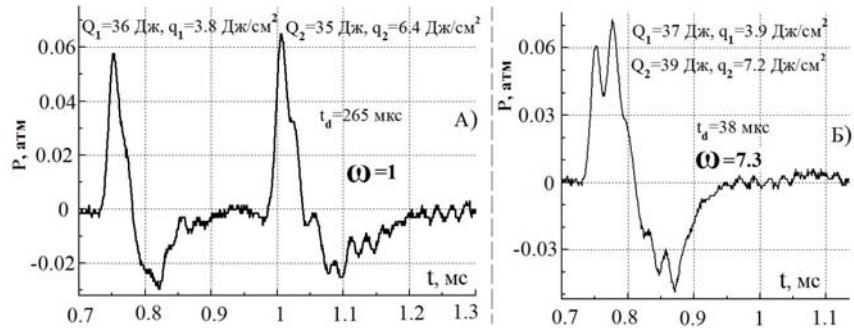


Рис. 5.

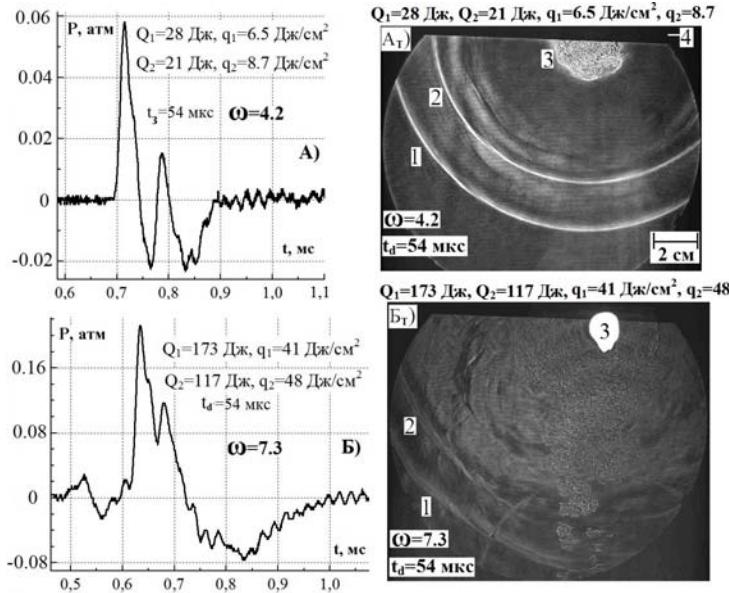


Рис. 6.

На рис. 6 показано давление УВ и теневые снимки (для  $t = 200$  мкс) при облучении стали. 1 и 2 – первая и вторая УВ, 3 – каверна, 4 – мишень.

$\omega$  изменялась за счет  $Q$ .  $S_1 = 4.2 \text{ см}^2$ ,  $S_2 = 2.44 \text{ см}^2$ .  $S$  меньше, а  $q$  на порядок больше, чем на стекле. При больших  $q$  формируется плазменный факел и оптический пробой на аэрозолях. Но и в этом случае МОВ действует примерно при тех же значениях  $\omega$ , что и на стекле.

При расчете  $\omega$  в (1) вместо энергии, поглощаемой в плазме, используется энергия лазерных импульсов  $Q$ , что приводит к завышению  $\omega$  и сдвигу граничных частот  $\omega_1 \sim 1$  и  $\omega_2 \sim 7$ . Эффект наблюдался для всех материалов, что важно для оценки параметров ИП излучения при

создании звука на мишенях с неизвестными свойствами. Пример использования критериев. Допустим, задана мощность  $W$ . Значения  $Q$  и  $f$  находим с использованием (1)  $Q = 0.023 \cdot (W[\text{кВт}]/\omega)^{3/2}$  и  $f[\text{кГц}] = 44.5 \cdot \omega^{3/2}/W^{1/2}$ . Полагая  $W = 100 \text{ кВт}$  и  $\omega = 4$  получим  $Q = 2.8 \text{ Дж}$ ,  $f = 36 \text{ кГц}$ ,  $S = Q/q \approx 2.8/5 = 0.56 \text{ см}^2$ .

Таким образом, критерии объединения УВ применимы для оценки параметров ИП излучения, создающего звук при облучении мишеней из различных материалов.

#### Эффективность формирования ударных волн при облучении мишеней из различных материалов.

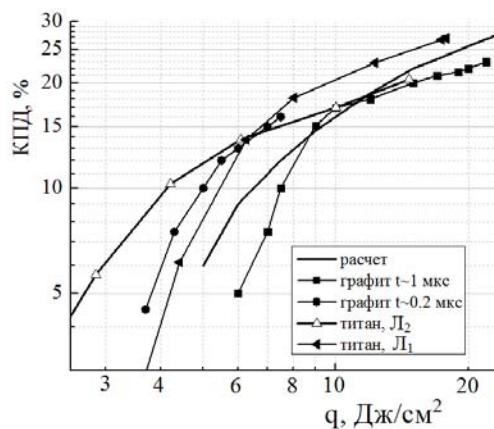
Исследовалось влияние плотности энергии  $q$  подводимого лазерного излучения на эффективность формирования УВ – отношение энергии ударной волны к энергии лазерных импульсов  $\eta = Q/Q$ . Значение  $q = Q/S$  варьировалась за счет  $S$  и  $Q$ . Энергия УВ определялась с использованием датчика давления, измерявшего избыточное давление УВ  $P = (p - p_0)$ . Метод применим, если УВ имеет форму полусферы. Как следует из теневых снимков, условие выполняется, если  $R_d < R_p < R_M$ , где  $R_M$  – радиус мишени,  $R_p$  – расстояние от центра облучения до датчика. Значение  $\eta$  определить из выражения

$$\eta = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_p^2}{\rho_0 \cdot C_0 \cdot Q} \int_{t_1}^{t_2} P^2 dt$$

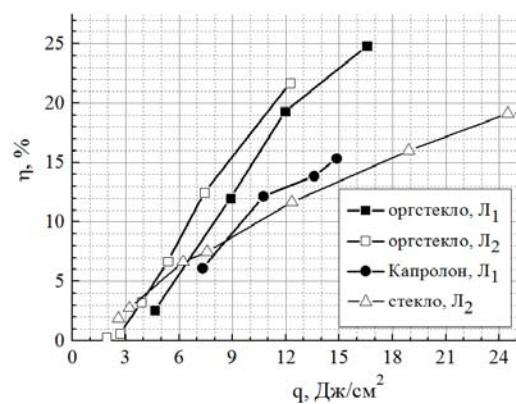
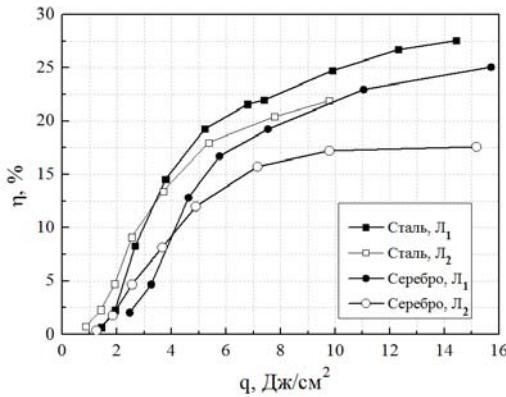
Здесь  $\rho_0$  воздуха плотность. Значение  $R_p$  варьировалось, в статье приведены данные для  $R_p = 27 \text{ см}$  и расстояния от датчика до мишени по нормали  $\sim 23 \text{ см}$ . Значение  $R_d$  не превышало 15 см.

УВ уносят значительную часть энергии импульсов  $\eta \approx 1 - (p_0/p)^{(\gamma-1)/\gamma} \approx 0.3$  при  $p/p_0 > 10$  [8], что соответствует плотности энергии облучения  $q[\text{Дж/см}^2] = \delta^{-1} \cdot (p_0/p) \cdot (\gamma_0 - 1) \cdot q_0 \cdot h / (\gamma - 1) \approx 5 \div 10 \text{ Дж/см}^2$ . Для оценки принято – доля поглощаемой в плазме энергии  $\delta = 0.5$ ,  $h = 0.5 \div 1 \text{ см}$  – толщина пробоя,  $q_0 [\text{Дж/см}^3]$  – плотность энергии воздуха,  $\gamma_0 = 1.4$  и  $\gamma \sim 1.2$  показатель адиабаты для воздуха и для плазмы. Значения  $\delta$ ,  $h$  и  $\gamma$  зависят от  $q$ , формы лазерных импульсов и материала мишени. Для слабо отражающих мишеней  $\delta = 0.3$ , на металлах  $\delta = 0.8$  [9]. Выражая давление через  $q$ , получаем оценку для КПД  $\eta \approx 1 - \{h/[\delta \cdot q \cdot (\gamma - 1)]\}^{1-1/\gamma}$ . Полагая для определенности  $h = 0.5 \text{ см}$ ,  $\gamma \sim 1.2$ ,  $\delta = 0.7$  получим  $\eta \approx 1 - 1.24/q^{0.17}$ . На рис. 7 представлена расчетная зависимость  $\eta(q)$  и полученная в эксперименте [9] для графитовой мишени. УВ имела плоскую геометрию, КПД определен с использованием по  $R-t$  диаграммы УВ. Для сравнения показан КПД, измеренный для титана в настоящей

работе. Зависимости  $\eta$  от  $q$  для мишеней из разных материалов и при разной форме лазерных импульсов представлены на рис. 7 – рис. 9. В опытах значение  $q$  варьировалось в диапазоне  $\sim 2 \div 100 \text{ Дж}/\text{см}^2$ . Как видно, КПД растет при увеличении плотности энергии облучения и при уменьшении длительности лазерного импульса. Пониженное значение  $\eta$  на стекле и на графите связано с большими затратами энергии на испарение материала. Серебро сильно отражает лазерное излучение. При создании звука оптимальна плотность облучения  $q \sim 10 \text{ Дж}/\text{см}^2$ , где достигается высокий КПД. Минимальное значение  $q$  ограничено порогом оптического пробоя на мишени, а максимальное –  $q > 15 \div 20 \text{ Дж}/\text{см}^2$  пробоем на аэрозолях.



**Рис. 7.** Зависимость эффективности преобразования энергии лазерных импульсов от плотности облучения при разной форме импульса. Расчет, графит [9] и титан.



**Рис. 8.**

Рис. 8. Зависимость эффективности преобразования энергии лазерных импульсов от плотности облучения диэлектриков при разной форме импульсов.

Рис. 9. Зависимость эффективности преобразования энергии лазерных импульсов от плотности облучения металлов при разной форме импульсов.

Таким образом, при облучении мишеней из различных (непрозрачных) материалов механизм объединения ударных волн действует и эффективная генерация звука возможна. Критерии объединения волн позволяют определять параметры лазерного излучения при управлении спектром звука. Для достижения высокого КПД оптимальны короткие лазерные импульсы  $< 0.5 \text{ мкс}$ .

Исследования проведены при поддержке РФФИ, проект № 09-08-00830-а

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Островская Г. В., Зайдель А. Н.. Лазерная искра в газах. УФН. – 1973. - том. 11. - С. 579.
2. Бункин Ф.В., Трибольский М.И.. Нерезонансное взаимодействие мощного оптического излучения с жидкостью. УФН. – 1980. - том 130. - вып. 2. - С. 193 – 240.
3. Ляминов Л.М. Оптико-акустические источники звука. УФН. – 1981. - том 135. - вып. 4. - С.637.
4. Тищенко В.Н. Генерация низкочастотной волны оптическим разрядом, движущимся в газе с дозвуковой скоростью. Кvantovaya elektronika. – 2003. – том 33.- вып.9. – С.823.
5. Тищенко В.Н., Аполлонов В.В., Грачев Г.Н., Гулидов А.И., Запрягаев В.И., Меньшиков Я.Г., Смирнов А.Л., Соболев А.В. Взаимодействие оптического пульсирующего разряда с газом: условия стабильной генерации и объединения ударных волн Кvantovaya elektronika. – 2004. – том 34.- вып.10. – С.941.
6. Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н., Смирнов А.Л., Трашкиев С.И., Стаценко П.А., Зимин М.И., и др. Объединение ударных волн, создаваемых движущимся оптическим пульсирующим разрядом Кvantovaya elektronika. – 2006. – том 36.- вып.5. – С.470.
7. Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф.. Механизм объединение ударных волн в плазме с магнитным полем: критерии и эффективность формирования низкочастотных магнитозвуковых волн. Кvantovaya elektronika. . – 2010. – том 40.- вып.5. – С.464 - 468.
8. Прохоров А.И., Конов В.И., Урсу И., Михэлеску И.Н. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. М.: “Наука”. - 1988. - С.537 .
9. Орищич А.М., Пономаренко А.Г., Посух В.Г. Влияние длительности импульса на эффективность взаимодействия излучения с мишенью в воздухе. ПМТФ. – 1987. – вып. 2. - С. 27 – 30.

УДК 534.21

**Г.А.Мельников, В.Н.Вервейко, Ю.Ф.Мелихов, М.В.Вервейко**  
**ПОГЛОЩЕНИЕ УЗ-ВОЛН И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В**  
**ГАЛОГЕНОЗАМЕЩЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДАХ**

ГОУ ВПО «Курский государственный университет»  
Россия, 305000 Курск, ул. Радищева, д.33  
Тел./факс: (4712) 568-460; E-mail: [VerveykoVN@mail.ru](mailto:VerveykoVN@mail.ru)

*Влияние ультразвуковых (УЗ) волн на кластерную систему приводит к возникновению релаксационных процессов и поглощению УЗ волн в жидкости. В рамках кластерной модели жидкости, предложенной авторами, получены выражения, позволяющие рассчитать поглощение УЗ волн в жидкости в зависимости от параметров состояния с погрешностью не более  $\pm 15\%$ , определить вклады димерной и кластерной компонент в полное поглощение, оценить релаксационную силу и времена кластерной релаксации. Проведены расчеты поглощения УЗ-волн в галогенозамещенных циклических углеводородах в зависимости от параметров состояния. Прогнозируемые в рамках кластерной модели величины поглощения согласуются в пределах суммарной погрешности с исходными экспериментальными данными.*

В жидких конденсированных средах образуются молекулярные комплексы – кластеры. В рамках предлагаемой модели первопричиной образования кластера в жидкости является образование димера. Димер может образоваться в результате тройных столкновений частиц среды и при искусственно созданных условиях. Появившийся димер становится ядром формирующегося кластера, имеющего структуру последовательных оболочек. В системах со слабым взаимодействием кластеры имеют одну устойчивую оболочку возле ядра, что характерно для простых и органических жидкостей.

В равновесной среде устанавливается некоторое распределение кластеров по числу содержащихся в них частиц. Авторы, исследуя свойства различных статистических распределений, выбрали из их множества наиболее общее гамма-распределение, плотность вероятностей которого в применении к количеству содержащихся в кластере частиц определяется формулой [1,2]

$$f(Z) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} Z^{\alpha-1} e^{-\lambda Z}, \quad (1)$$

где  $\lambda > 0$  – параметр масштаба,  $\alpha > 0$  – порядок распределения,  $Z$  – количество частиц,  $\Gamma(\alpha)$  – гамма-функция (эйлеров интеграл второго рода).

В случае, когда параметр  $\alpha$  принимает целые значения  $\alpha = m = 1, 2, 3, \dots$ , гамма-распределение называется распределением Эрланга

$$f(Z) = \frac{\lambda^m}{(m-1)!} Z^{m-1} e^{-\lambda Z}. \quad (2)$$

Распределение (2) позволяет произвести выбор порядка распределения: при  $m=1$  величина  $Z$  обладает «сильной случайностью» (абсолютно хаотичное движение частиц); при  $m \rightarrow \infty$  наблюдается полное отсутствие случайности (абсолютно упорядоченное движение частиц). Нами было принято  $m=4$  [2,3]. Параметр масштаба  $\lambda$  должен нести информацию о физических свойствах жидкости, ее структурных особенностях и является функцией параметров состояния вещества. Выбор параметра  $\lambda$  определяется характерными свойствами ближнего порядка и особенностями формирования кластеров в жидкостях. В результате исследования кластерных систем авторы пришли к выводу, что параметр масштаба распределения (1), (2) можно представить как функцию приведенной плотности жидкости

$$\frac{1}{\lambda} = \theta = \frac{1}{2} \rho_* (\rho_* + 1), \quad (3)$$

где  $\rho_* = \rho/\rho_c$  – приведенная плотность,  $\rho$  и  $\rho_c$  – плотность и критическая плотность вещества соответственно.

Соотношение (3) при целочисленных значениях величины  $\rho_*$  представляется бесконечным рядом натуральных чисел

$$1 + 2 + 3 + \dots + n = \frac{1}{2} n(n+1). \quad (4)$$

Последовательная сумма натуральных чисел отражает закон формирования кластеров из мономеров, димеров, тримеров и т.д. в конденсированных средах. В жидкостях вблизи точки плавления  $\rho_* \approx 3$ , поэтому параметр  $\theta = 6$ , в критической точке:  $\rho_* = 1$ ,  $\theta = 1$ .

Границы изменения параметра  $\alpha$  определяются свойствами гамма-распределения (1) и авторами принято

$$(\alpha - 1) = \frac{T_c}{T}, \quad (5)$$

где  $T$  – температура,  $T_c$  – критическая температура.

Соотношение (5) воспроизводит предельные случаи гамма-распределения:

- при температурах, много больших критической  $T >> T_c$ , ( $T \rightarrow \infty$ ), параметр  $\alpha \rightarrow 0$  и соответствует абсолютно хаотичному движению частиц в среде;
- при температурах, много меньших критической  $T << T_c$ , ( $T \rightarrow 0$ ), параметр  $\alpha \rightarrow \infty$ , что соответствует абсолютно упорядоченному расположению частиц.

Наиболее вероятное число частиц в кластере соответствует максимуму функции  $f(Z)$  и может быть определено по формуле

$$\hat{Z} = \frac{m-1}{\lambda} = (m-1)\theta = 3\theta. \quad (6)$$

Среднее число частиц в кластере может быть найдено по общим правилам математической статистики (среднее по ансамблю)

$$\bar{Z} = \int_0^{\infty} Z f(Z) dZ = \frac{m!}{(m-1)!} \frac{1}{\lambda} = \frac{m}{\lambda} = m\theta = 4\theta. \quad (7)$$

Среднеквадратичное число частиц в кластере

$$\bar{\bar{Z}} = \sqrt{\bar{Z}^2} = \frac{\sqrt{m(m+1)}}{\lambda} = \sqrt{m(m+1)}\theta = \sqrt{20}\theta. \quad (8)$$

Влияние УЗ волн на кластерную систему вещества приводит к возникновению релаксационных процессов в среде, которые обусловливают поглощение УЗ волн в жидкости.

В рамках кластерной модели жидкости, предложенной авторами, получены выражения, позволяющие рассчитать избыточное поглощение, связанное с процессами образования и распада кластеров, релаксационной силы и времени кластерной релаксации.

Кластерная составляющая полного поглощения УЗ волн определяется выражением

$$\left( \frac{\alpha}{f^2} \right)_{clust} = \frac{2\pi^2}{u_0} (b_{clust} \tau_{clust}), \quad (9)$$

где  $u_0$  – скорость УЗ волн при условии  $\omega\tau \ll 1$ ,  $\tau_{clust}$  – время кластерной релаксации,  $b_{clust}$  – кластерная составляющая релаксационной силы, определяемая по формуле

$$b_{clust} = \frac{(\gamma - 1)}{C_p} C_{clust}, \quad (10)$$

где  $\gamma = C_p/C_V$  – отношение изобарной и изохорной теплоемкостей вещества,  $C_{clust}$  – кластерная составляющая полной теплоемкости жидкости.

Конфигурационную часть кластерной энтропии можно рассчитать по законам статистической физики, зная функцию распределения  $f(Z)$

$$S = - \int f(Z) \ln f(Z) dZ. \quad (11)$$

Функция распределения (2) и статистическое определение энтропии (11) позволяют получить соотношение для расчета кластерной составляющей теплоемкости жидкости [4]

$$C_{clust} = T \frac{dS_{clust}}{dT} = \frac{1}{2} R \bar{Z} \alpha_p T, \quad (12)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\alpha_p$  – изобарный коэффициент теплового расширения.

Для времени кластерной релаксации можно получить формулу [4]

$$\tau_{clust} = A(J) \beta_T \frac{\sqrt{m_0 k T}}{\pi \sigma_0^2} \left( \frac{1}{\alpha_p T} \right), \quad (13)$$

где  $A(J)$  – константа, зависящая от момента инерции молекул,  $m_0$  – масса молекулы,  $\beta_T$  – изотермическая сжимаемость,  $\sigma_0$  – эффективный диаметр молекулы,  $k$  – постоянная Больцмана.

Используя соотношения (2), (7), (9) – (13), в рамках кластерной модели жидкости для кластерной составляющей поглощения УЗ волн можно получить выражение

$$\left( \frac{\alpha}{f^2} \right)_{clust} = \frac{2\pi^2}{u_0} \left[ A(J) \frac{1}{2} R \frac{(\gamma-1)}{C_p} \beta_T \frac{\sqrt{m_0 k T}}{\pi \sigma_0^2} \bar{Z} \right]. \quad (14)$$

В силу большой инертности кластерной оболочки кластерное поглощение составляет по величине от 10 до

30 % от классического поглощения и сильно зависит от параметров состояния, стремясь к бесконечности в критической точке.

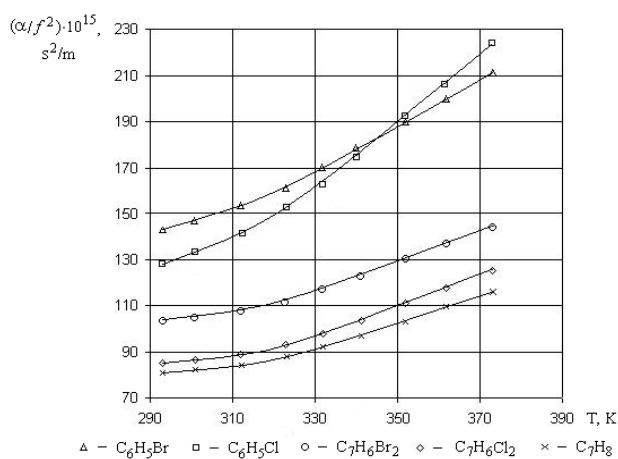
Релаксационные процессы, происходящие в ядре кластера, обусловлены либрационными колебаниями димера и определяются энергией связи молекул димера  $\Delta H_{\text{dim}}$  и его моментом инерции  $J_{\text{dim}}$ . Поглощение УЗ волн, связанное с релаксационными процессами в ядре кластера, определяется формулой

$$\left(\frac{\alpha}{f^2}\right)_{\text{dim}} = \left(\frac{\alpha}{f^2}\right)_{\text{clust}} e^{\frac{\Delta H_{\text{dim}}}{kT}}. \quad (15)$$

Поглощение УЗ волн, обусловленное структурными изменениями в кластерных системах, складывается из кластерного (14) и димерного (15) поглощений

$$\left(\frac{\alpha}{f^2}\right)_{\text{str}} = \frac{2\pi^2}{u_0} \left\{ A(J) \frac{1}{2} R \frac{(\gamma-1)}{C_p} \beta_T \frac{\sqrt{m_0 k T}}{\pi \sigma_0^2} \bar{Z} \left[ 1 + e^{\frac{\Delta H_{\text{dim}}}{kT}} \right] \right\}. \quad (16)$$

Соотношение (16) допускает прямую экспериментальную проверку, если считать, что избыточное поглощение УЗ волн обусловлено структурной релаксацией, и полное поглощение складывается из классического и структурного



**Рис. 1.** Полное поглощение УЗ-волн в некоторых галогенозамещенных углеводородах

кластерной модели величины поглощения согласуются в пределах суммарной погрешности с исходными экспериментальными данными.

На рис. 1 представлены графики зависимости полного поглощения УЗ волн в некоторых галогенозамещенных циклических углеводородах от температуры при атмосферном давлении. Сплошные линии – расчет по формуле (17), значки – экспериментальные данные.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. – С-Пб.: Наука, 2001. – 296 с.
2. Г.А. Мельников, Ю.Ф. Мелихов, В.Н. Вервейко, М.В. Вервейко. Кластеры в простых и органических жидкостях // Вестник МГТУ / Естественные науки. – М.: МГТУ, 2008. – № 2. – С. 16–23.
3. Мельников Г.А., Мелихов Ю.Ф., Ларионов А.Н., Вервейко В.Н., Вервейко М.В. Прогнозирование ИК-спектров кластерных систем // Вестник ВГУ / Физика. Математика. – Воронеж: ВГУ, 2008. – № 1. – С. 52–58.
4. G.A. Melnikov, Yu.F Melikhov, V.N. Verveyko, M.V. Verveyko. Infra-red spectra of organic liquids and cluster model of substance // 39th Winter School on Wave and Quantum Acoustics / Workshop on Molecular Acoustics, Relaxation and Calorimetric Methods. 2009. <http://ogpta.polsl.pl>.

УДК 534.8.081.7

Воронова А.Е., Прохоров В.М.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ И МИКРОСТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ МЕДИ С НАНОУГЛЕРОДОМ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-УЛЬЗАВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

ФГУ ТИСНУМ

Россия, Московская область, г. Троицк, ул. Центральная 7а  
voronovaanastasia77@mail.ru

Проблема неразрушающего контроля конструкционных материалов по фактическому состоянию является весьма актуальной, поскольку дефекты и изменения структуры материала, возникающие при изготовлении и в процессе

эксплуатации изделий, могут существенно уменьшить их прочность. Одним из наиболее распространенных методов исследования механических и упругих характеристик, неразрушающей диагностики структуры и состояния конструкционных материалов является ультразвуковой метод. В настоящей работе нами проведены исследования зависимостей от условий синтеза образцов (температуры и давления компактирования) упругих и микроструктурных характеристик композитов меди с наноуглеродом в виде фуллерита  $C_{60}$ . С помощью ультразвуковых и акусто-микроскопических методов были проведены исследования упругих характеристик и дефектности образцов композитов меди с наноуглеродом. Определены значения упругих модулей и обнаружены дефекты в объеме образцов.

Существующие заделы по повышению механических свойств медных сплавов с использованием принципов наноструктурирования позволяют говорить о перспективности этого направления.

Открытые за последние годы углеродные нанообъекты – фуллерены, астралены, углерод луковичной структуры, нанотрубки, ультрадисперсные алмазы – позволяют заложить основы новой технологии производства материалов, которую можно было бы назвать структурной инженерией наноматериалов. Можно ожидать, что по сравнению с обычными материалами, новые наноструктурированные материалы на основе металлов и наноуглерода будут отличаться в 3-5 раз более высокой твердостью и прочностью. Возможно также появление ряда интересных аномалий в электрических, тепловых и других свойствах, привлекательных для практического применения. Все эти эффекты носят размерный характер и сильно зависят от состояния поверхности структурных элементов материала (нанозерен) и их состава.

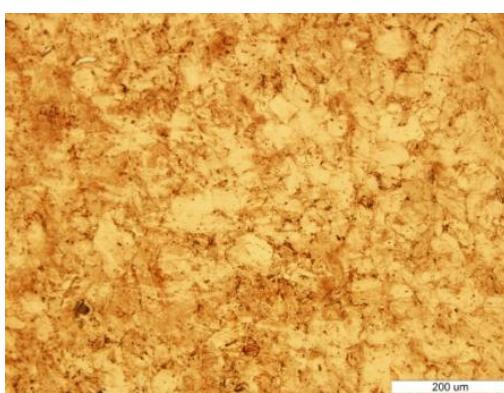
Проблема неразрушающего контроля конструкционных материалов по фактическому состоянию является весьма актуальной, поскольку дефекты и изменения структуры материала, возникающие при изготовлении и в процессе эксплуатации изделий, могут существенно уменьшить их прочность. Механические свойства (например, упругие модули) материала несут ценную информацию для определения остаточного ресурса детали. Поэтому особое значение имеет разработка оперативных неразрушающих методов диагностики, позволяющих контролировать локальные изменения структуры материала не только в процессе изготовления, но и при эксплуатации изделий[1].

Одним из наиболее распространенных методов исследования механических и упругих характеристик, неразрушающей диагностики структуры и состояния конструкционных материалов является ультразвуковой метод. Он основан на анализе характеристик ультразвуковых волн, распространяющихся в объекте контроля. Для исследования неоднородностей и дефектов структуры материалов применяются методы ультразвуковой интроскопии и дефектоскопии. По измерениям фазовых скоростей акустических волн в широком частотном диапазоне проводится расчет упругих модулей твердых тел[2].

В настоящей работе нами проведены исследования зависимостей от условий синтеза образцов (температуры и давления компактирования) упругих и микроструктурных характеристик композитов меди с наноуглеродом в виде фуллерита  $C_{60}$ . Для исследования были выбраны образцы с 2 % содержанием фуллерена.

#### Приготовление образцов:

1. Измельчение и смешение порошка меди и фуллерена выполнялось в планетарной шаровой мельнице, которая обеспечивает эффективный размол образцов и перемешивание порошка с помощью стальных шариков, соударяющихся с ускорением до 20g.



**Рис.1** Изображение образца, полученное с помощью оптического микроскопа.



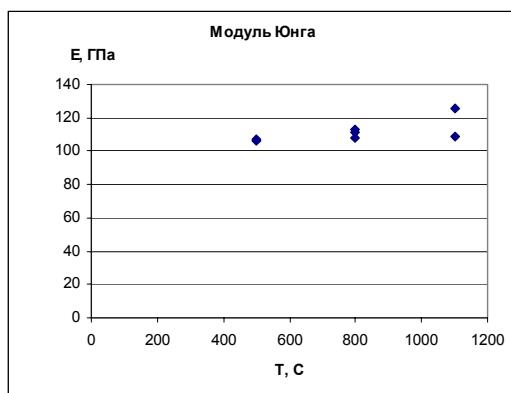
**Рис.2** Изображение образца, полученное с помощью оптического микроскопа. Трешины.

2. Спекание полученной смеси порошка фуллерена с медью выполнялось в камере высокого давления при температуре до 1100 °C при давлении до 7 ГПа .

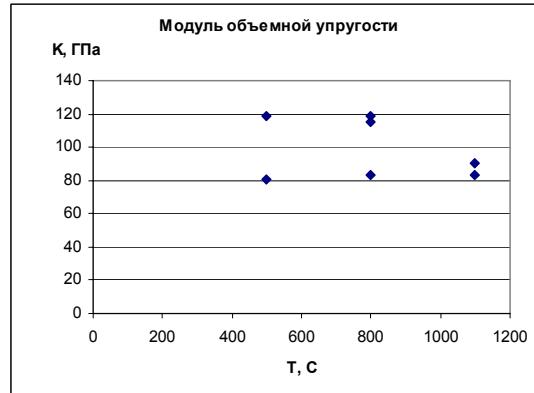
Благодаря тому, что медь не взаимодействует с углеродом, последний выполняет роль стабилизатораnanoструктуры скомпактированных образцов. Наноstructuredированность изготовленных образцов подтверждена оптическими изображениями, полученными на микроскопе BX51 фирмы «Olympus» с увеличением от 200 до 3000 (Рис. 1,2).

Измерения скоростей звука и модулей упругости проводили с использованием лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М. Предварительно, на сертифицированной установке KERN-770-60, с приставкой для измерения плотности «Sartorius YDK 01 LP», были измерены плотности полученных образцов.

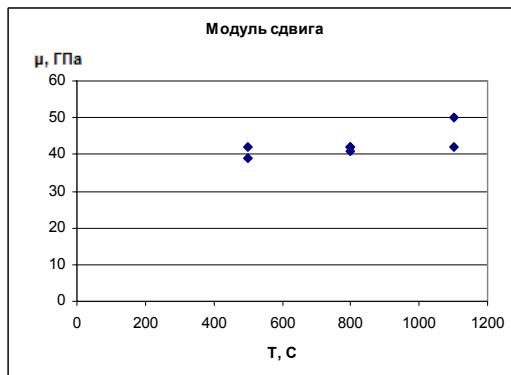
По данным плотностей и акустических скоростей вычислены значения упругих модулей образцов. Были получены зависимости упругих модулей и микротвердости от температуры спекания образцов. (Рис. 3-6)



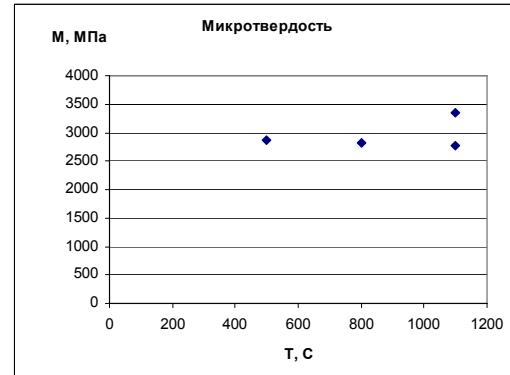
**Рис.3.** Зависимость модуля Юнга от температуры спекания образцов.



**Рис.4.** Зависимость модуля объемной упругости от температуры спекания образцов.



**Рис.5.** Зависимость модуля сдвига от температуры спекания образцов.



**Рис.6** Зависимость микротвердости от температуры спекания образцов.

Средние значения упругих модулей:

Модуль Юнга:  $111 \pm 8$  ГПа

Модуль объемной упругости:  $98 \pm 7$  ГПа

Коэффициент Пуассона:  $0,3 \pm 0,05$

Модуль сдвига:  $42 \pm 5$  ГПа

Микротвердость:  $2960 \pm 150$  МПа

Продольная скорость звука:  $4265 \pm 265$  м/с

Поперечная скорость звука:  $2270 \pm 210$  м/с

При подготовке образцов к измерениям (шлифование, полирование, травление), было обнаружено, что для некоторых образцов продольные скорости звука уменьшаются при уменьшении толщины образца (Табл.1):

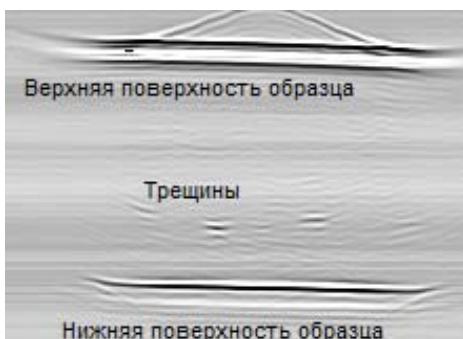
**Таблица 1.** Зависимость продольной скорости звука от толщины образца.

h, мм	C <sub>ll</sub> , м/с
3,76	4600
2,58	4300
2,33	4130

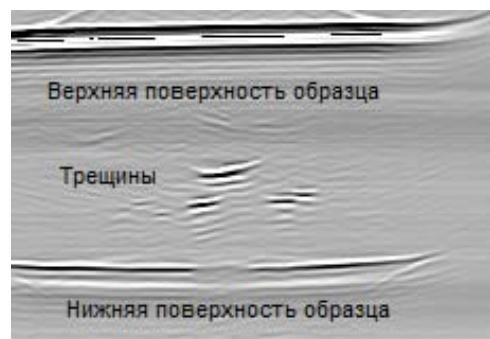
Возможно, это связано с характером термобарической обработки образцов, при которой поверхностные слои «закаляются» в большей степени, а внутренние области хуже уплотняются. В пользу этого предположения указывает и наличие трещин именно в центральной области образцов.

Были проведены измерения скоростей звука и исследования внутренней структуры на дефектность образцов, в которых наблюдалось изменение скоростей звука при уменьшении толщины образца, на акустическом микроскопе (Рис. 7-8).

Широкополосный импульс при сканировании акустическим микроскопом был применен в отраженной моде на частоте  $f = 25$  МГц, чтобы измерить локальные значения сверхзвуковых скоростей (микроакустическая техника) и визуализировать объемную микроструктуру образца (просматривающий акустическую микроскопию). Ультракороткий сверхзвуковой 30-40 нс импульс использовался для измерений. Экспериментальная процедура была детально описана ранее [3]. Упругие модули были вычислены на основе измеренных звуковых скоростей и плотностей образцов. Данные по звуковым скоростям продольного  $V_L$  и поперечных волн  $V_T$  были получены с точностью до ~1 %; упругие модули ~2-3 %.



*Рис.7. В-скан изображение образца №46.*



*Рис.8. В-скан изображение образца №42.*

Из эхограмм видно, что образцы №42 и № 46 имеют дефекты в объеме.

С помощью ультразвуковых и акусто-микроскопических методов были проведены исследования упругих характеристик и дефектности образцов композитов меди сnanoуглеродом. Определены значения упругих модулей и обнаружены дефекты в объеме образцов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.. Ультразвуковые методы в физике твердого тела // изд-во «Мир» - 1972.
2. Дж. Такер, В. Рэмптон. Гиперзвук в физике твердого тела // изд-во «Мир» - 1975.
3. V.M. Prokhorov, V.D. Blank and G.A.Dubitsky. New diamond-fullerite composites: preparing and acoustic microscopy study// Synthetic Metals – 2001. - vol.121. – pp. 1335-1336.

УДК 620.179

**Я.А. Сериков**

#### ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Харьковская национальная академия городского хозяйства,  
Украина, 61002, Харьков, улица Революции, д. 12, ХНАГХ  
Тел. служ: (057) 707 - 32 - 73; тел. дом: (057) 705 - 45 - 17  
E-mail: [serikov@ksame.kharkov.ua](mailto:serikov@ksame.kharkov.ua); [yserikov@yandex.ru](mailto:yserikov@yandex.ru)

Проведены исследования влияния физико-механических свойств материалов на характеристики информационного сигнала при контроле качества ультразвуковым импульсным методом. Исследования проводились с использованием метода сравнения в широком динамическом диапазоне амплитуд информационного сигнала.

Выявлены мультипликативная и аддитивная составляющие общей погрешности измерения. Предложен вариант решения задачи повышения точности измерения временного отрезка между излучением зондирующего и приходом на приемный преобразователь информационного сигнала.

Одной из важных задач, которую должен решать контроль физико-механических свойств материалов в эксплуатируемых изделиях, конструкциях и сооружениях, является неразрушающий контроль качества строительных материалов, которые используются в строительных объектах повышенной надежности. К ряду конструкционных элементов, строительных материалов в таких объектах предъявляются повышенные требования к прочностным и структурным характеристикам. К классу таких задач относится и исследование физико-механических свойств новых строительных материалов на этапе

проектирования, при исследовании и установлении эффективных технологических режимов процесса производства, проведение научных исследований.

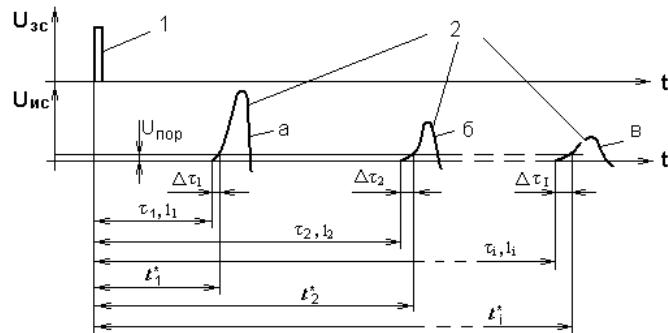
Поставленная задача вызывает необходимость измерения косвенного параметра физико-механических свойств строительных материалов, который определяется в процессе неразрушающего контроля качества, с повышенной точностью. Применение методов статистической обработки результатов, например, усреднения данных, не позволяет полностью решить поставленную задачу.

Для правильной постановки решения задачи проведем анализ физической сущности измерительного процесса при использовании ультразвукового импульсного метода, в частности, при измерении времени (скорости) распространения упругой волны в материале.

Известным фактом является то, что определение времени (скорости) распространения ультразвукового сигнала, производящееся при контроле физико-механических характеристик строительных материалов, содержит в себе типовую задачу по измерению отрезков времени в микро- и милисекундной части диапазона. Значительное различие физико-механических свойств исследуемых строительных материалов в образцах и изделиях, неоднородность их структуры, оказывают свое влияние на амплитудно-частотные характеристики ультразвукового сигнала, прошедшего через материал. В связи с этим, задачей процесса измерения является выполнение временной фиксации т. н. «первого вступления» информационных импульсных сигналов, которые характеризуются большим динамическим диапазоном амплитуд (рис. 1).

Усиление принятых сигналов и формирование из них управляющих импульсов сопровождается искажением их формы, что, в ряде случаев, приводит к ошибкам определения временного положения первого вступления, возрастающего с увеличением диапазона изменения амплитуд. Эти ошибки относятся к классу мультиплексивных погрешностей (зависящих от измеряемой величины) измерительного устройства.

Причем, на закон изменения этой составляющей погрешности накладывается и погрешность от смещения результирующего спектра принятого сигнала в область низких частот. Этот параметр зависит от частоты излученных колебаний, функции отклика приемного преобразователя и таких характеристик



**Рис. 1** – Временные диаграммы зондирующего и информационного ультразвукового сигнала: 1 – зондирующий сигнал; 2 а, б, в – «певое вступление» информационного сигнала на разных расстояниях  $l_1 < l_2 < l_i$  между излучающим и приемным преобразователями;  $\tau_1, \tau_2, \tau_i$  – измеряемая величина времени распространения ультразвукового сигнала;  $t_1^*, t_2^*, t_i^*$  – измеренная величина времени распространения ультразвукового сигнала;  $U_{\text{пор}}$  – напряжение срабатывания электронных блоков измерения;  $\Delta \tau_1, \Delta \tau_2, \Delta \tau_i$  – ошибка измерения временного положения «первого вступления» информационного сигнала

материалов, как частотно-зависимые фильтрующие свойства, величина и количество композиционных включений, дефектов структуры и т. д.

Влияние совокупности этих факторов на параметры информационных сигналов не поддается четкому описанию и систематизации [1]. В результате этого, при построении корреляционных зависимостей «скорость распространения ультразвуковых колебаний – физико-механическая характеристика материала» вносится дополнительная погрешность.

В отдельных случаях, при условии фиксирования некоторых параметров, входящих в указанную зависимость, возможно установление частных функциональных закономерностей. Так, в частности, произведено изучение амплитудного изменения импульсов при изменениях времени распространения ультразвука в некотором динамическом диапазоне, в зависимости от нормативного коэффициента ( $\alpha \cdot \ell$ ), где  $\alpha$  – коэффициент поглощения для частоты  $f_0$ ;  $f_0$  – резонансная частота преобразователя;  $\ell$  – база измерения времени распространения ультразвуковых колебаний. При этом, в одном случае в качестве исходного принимался зондирующий импульс колоколообразной или прямоугольной формы, а

исследования информационного сигнала заключались в определении (расчете) величины фазового сдвига [2].

Содержанием второго направления являлось экспериментальное исследование искажения спектра принятого информационного сигнала при прохождении через материал типа бетон експоненциально-затухающего синусоидального сигнала. При этом было зафиксировано сужение спектра принятого сигнала и смещение его несущей части в сторону более низких частот. Это явление вызывает уменьшение крутизны переднего фронта принятого сигнала, который и несет информацию о времени распространения акустического сигнала в исследуемом материале.

С другой стороны, формирователи входных сигналов, пороговые устройства, вносят аддитивную (независящую от измеряемой величины) погрешность в результат измерения временного интервала. Указанная составляющая погрешности возникает в силу конечной величины напряжения срабатывания схем пороговых устройств ( $U_{\text{пор.}}$ ), времени переключения схем аналого-цифрового преобразования и дополнительной задержки, формирующейся в канале акустического преобразования «упругие колебания – электрический информационный сигнал». Величина этой погрешности сводится до определенного минимума предварительной настройкой средства измерения. К классу этой погрешности относится и погрешность, возникающая за счет прохождения ультразвукового сигнала через слой контактной смазки, который имеет условно постоянную величину.

Частичное уменьшение погрешности определения временного положения информационного сигнала можно достичь путем введения логарифмических усилителей входных сигналов, применения цепей автоматической регулировки усиления и т. п. [3]. Использование свойств амплитудной характеристики этих устройств позволяет до некоторой степени стабилизировать указанную погрешность от измерения к измерению, в направлении приведения ее к классу систематических. Таким образом, появляется возможность ее компенсации или учета различными методами. Однако, конечная величина динамического диапазона усилителей и в этом случае не позволяет обеспечить работоспособность специализированных измерителей с постоянной погрешностью в широких пределах изменения амплитуды входного (информационного) сигнала. Помимо этого, в случае использования формы принятого сигнала в качестве дополнительной информации о физико-механических свойствах исследуемого материала, применение логарифмических усилителей не позволяет сжать динамический диапазон информационного сигнала без внесения существенного искажения его спектра. Очевидно, что обе рассматриваемые составляющие погрешности – как аддитивная, так и мультипликативная, вносят в результат измерения ошибку, имеющую всегда положительное значение.

Таким образом, результат измерения величины ( $t^*$ ) будет определяться по следующему выражению:

$$t_1^* = \tau_i + \beta_a + \gamma_{im} \pm \sigma_{\Sigma t}, \quad (1)$$

где  $\tau_i$  – истинное значение величины времени распространения ультразвукового сигнала;  $\beta_a$  – аддитивная составляющая погрешности измерительного устройства времени распространения ультразвука ( $SI_t$ );  $\gamma_{im}$  – мультипликативная составляющая погрешности измерительного устройства  $SI_t$ ;  $\sigma_{\Sigma t}$  – суммарное значение случайной погрешности измерения.

Если привести величину мультипликативной погрешности к постоянному значению, то ее можно отнести к классу систематических погрешностей, которые представляется возможным учесть (скомпенсировать) при выполнении измерений.

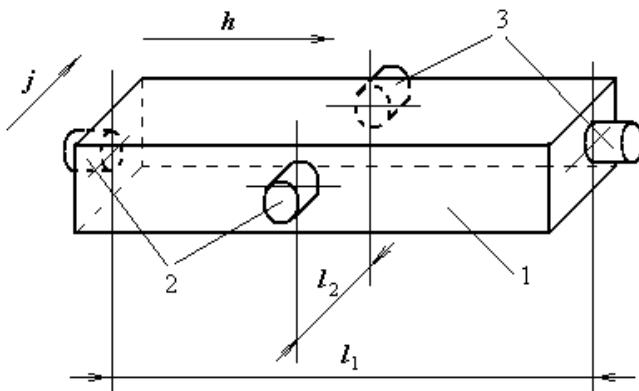
Положительное решение задачи по повышению точности измерения скорости распространения ультразвукового сигнала и, как следствие – повышению точности определения величины физико-механических характеристик материалов в результате более точного построения корреляционных зависимостей, достигается в результате применения разностного метода измерения рассматриваемой характеристики. Сущность этого метода заключается в том, что вычисление скорости распространения ультразвукового сигнала производится по комплексу данных, полученных на образцах специальной формы – параллелепипедах с соотношением размеров  $\ell_1 > \ell_2$  (рис. 2). При изготовлении контрольных образцов изменение их геометрических размеров долино производиться в плоскости, перпендикулярной одному из обусловленных направлений прозвучивания.

Величина скорости распространения ультразвука определяется следующим образом. Прозвучивание образцов производится в двух взаимоперпендикулярных направлениях  $h$  и  $j$  с фиксацией соответствующих величин  $t_{\ell_1}^*$ ,  $t_{\ell_2}^*$  (рис. 2). В местах установки акустических преобразователей с помощью метрических инструментов определяются размеры контрольного образца  $\ell_1^*$  и  $\ell_2^*$ .

Уравнение измерения, представляющее разностный метод при измерении скорости распространения ультразвуковых колебаний, имеет следующий вид:

$$v_i^*(\psi_i) = (t_{\ell_1}^* - t_{\ell_2}^*) (\ell_1^* - \ell_2)^{-1}, \quad (2)$$

где  $t_{fn}^* = \tau_{fn} + \beta_{a1} + \gamma_{im} \pm \delta_1$ ;  $\ell_n^* = \ell_n + \beta_{a2} \pm \delta_2$ ;  $t_{fn}^*$  – величина измеренного времени распространения ультразвукового сигнала;  $\tau_{fn}$  – измеряемое (истинное) время распространения;  $\beta_{a1}$ ,  $\beta_{a2}$  – аддитивная погрешность электронного измерителя (СИ<sub>т</sub>) и метрического инструмента соответственно;  $\gamma_{im}$  – мультипликативная погрешность;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – случайная погрешность соответствующих измерительных средств;  $\ell_n^*$  – измеренная величина расстояния  $\ell_n$  (размера контрольного образца  $\ell_1$  или  $\ell_2$ );  $\ell_n$  – истинное значение расстояния (размера контрольного образца  $\ell_1$  или  $\ell_2$ ).



*Rис. 2 – Форма контрольного образца и расположение преобразователей для проведения измерений разностным методом: 1 – контрольный образец; 2 – излучающие преобразователи; 3 – приемные преобразователи;  $l_1$ ,  $l_2$  – размеры контрольного образца в направлении  $h$  и  $j$  соответственно*

результатов, использования устройств, выполняющих предварительную обработку измеренных данных (например, усреднение) селектирование измеренных величин.

Точность определения разностной величины ( $\ell_1 - \ell_2$ ) зависит, в определенной степени, от применяемого типа усилителя. Так, например, в случае использования входных устройств со специальными амплитудными характеристиками (логарифмическими, с автоматической регулировкой усиления), дополнительно снижается уровень мультипликативной составляющей погрешности измерения. Эта функция выполняется в результате приведения амплитуды выходных сигналов усилителя к одному уровню.

Реализация разностного метода измерения времени распространения упругой волны возможна с использованием существующих измерительных устройств. Однако, применение известных измерителей времени распространения ультразвука в материалах сопряжено с рядом технических неудобств – необходимостью проведения измерения на образце в два этапа, вычисление и обработка полученных данных. В связи с этим, следующим этапом исследований чvrяется разработка специализированного контрольно-измерительного устройства, предназначенного для реализации предложенной методики измерения.

Разработанная методика измерения параметров распространения ультразвукового сигнала может быть использована и для повышения точности измерений в других областях метрологии, при решении измерительных задач, которые характеризуются наличием мультипликативной и аддитивной погрешностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Шутенко Л.Н., Сериков Я.А., Золотов М.С. Исследование строительных материалов и конструкционных элементов зданий и сооружений ультразвуковыми методами. – К.: Техника, 2005 – 210 с.
- Шутенко Л.Н., Сериков Я.А. и др. Диагностика строительных материалов, конструкционных элементов зданий, сооружений и механических систем неразрушающими методами на основе упругих волн. Монографія. – К.: Техника, 2010 – 318 с.
- Сериков Я.А. Анализ структуры современных строительных материалов и конструкций для решения задачи выбора метода ультразвукового контроля качества / «Проблемы и перспективы развития жилищно-коммунального комплекса города» // Сб. тр. Шестой Международной научно-практич. конф. М.: МИКХиС, 2008, т.2. С. 174 - 179.
- Шутенко Л.Н. Сериков Я.А., Золотов М.С., Сериков С.Я. Устройство для определения физико-механических свойств строительных материалов и горных пород А.С.СССР 1820317, Б. И. № 21, 1993.

УДК 620.192.63

**Д.С.Сучков, В.А.Николаевцев, А.В.Селифонов, С.Г.Сучков**  
**УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОЖДЕНИЯ И УНИЧТОЖЕНИЯ  
НАНОТРЕЩИН В ПЛАСТИНАХ ПОД НАГРУЗКОЙ**

ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского»

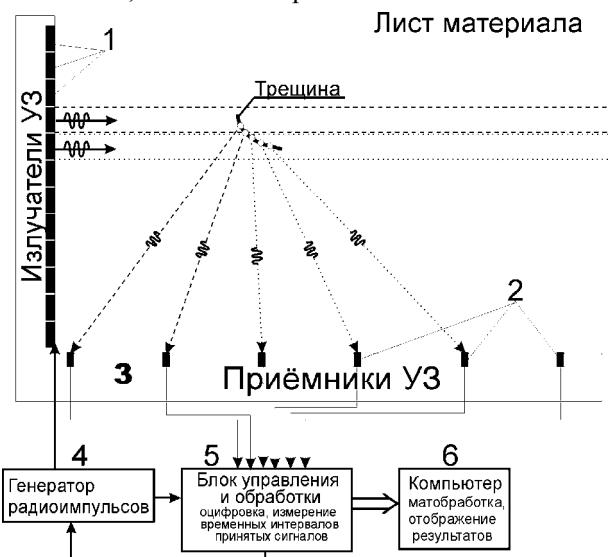
Россия, 140012 Саратов, ул. Астраханская, д.83

Тел.: (8452) 52-14-30; Факс: (8452) 52-14-30; E-mail: nikolaevcev@ya.ru

*Описан ультразвуковой способ и устройство для обнаружения нанотрещин в пластинах. С помощью этого устройства проведено исследование рождения и уничтожения нанотрещин при механическом воздействии на пластину. Обнаружен пиннинг нанотрещин на объемных дефектах материала.*

При производстве листовых материалов из стекла или металлов, предназначенных для особо ответственного применения, важнейшее значение имеет обнаружение в них скрытых дефектов, не определяемых известными средствами неразрушающего контроля. Такими дефектами являются, например, нанотрещины, имеющие ширину от единиц до десятков нанометров. В прозрачных материалах нанотрещины не обнаруживаются оптическими методами. Известные ультразвуковые методы, использующие эхо-локацию (совмещенный источник и приемник ультразвуковых импульсов), позволяют обнаруживать лишь малую часть таких дефектов, так как отраженный от трещины сигнал может быть принят излучающим преобразователем только при почти перпендикулярном расположении ультразвукового луча и трещины, а такое происходит редко и для большинства трещин отраженный сигнал не принимается.

Обнаружение нанотрещин является совершенно необходимым, так как локальные объемные дефекты могут осуществить пиннинг нанотрещин, и при воздействии механических напряжений такие нанотрещины не исчезают и могут с течением времени увеличиваться до опасных размеров. Следствием таких процессов являются многочисленные случаи спонтанного разрушения без видимых причин автомобильных и авиационных стекол, иллюминаторов и т.п.



*Рис. 1. Принцип обнаружения нанотрещин в пластине*

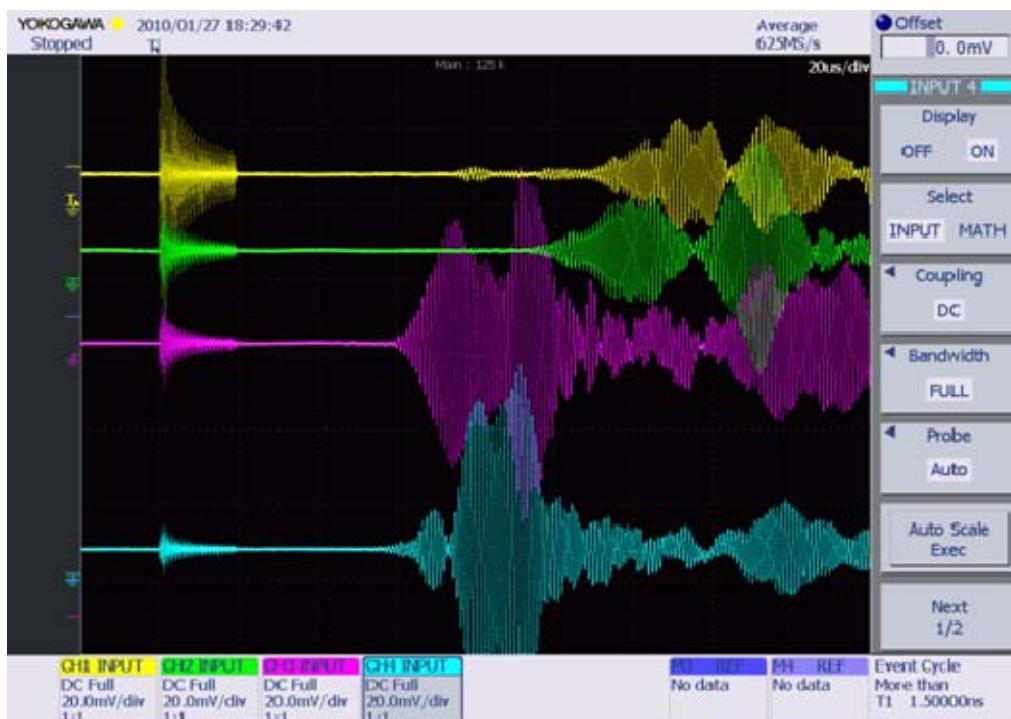
Для исследования процессов рождения, уничтожения и пиннинга нанотрещин разработано ультразвуковое устройство с пространственно разнесеными источниками и приемниками ультразвуковых импульсов. Принцип обнаружения микро- и нанотрещин и других дефектов в этом устройстве показан на рисунке 1. Он основан на возбуждении волн Лэмба в исследуемой пластине, анализе рассеянного акустического поля несколькими приемниками и фазовой обработке импульсных сигналов для определения координат рассеивающих центров.

В этом устройстве источники возбуждают в пластине ультразвуковой пучок волн Лэмба, которые рассеиваются на нанотрещинах и принимаются несколькими пространственно разнесенными приемниками. Такой подход позволяет не только обнаруживать практически все нанотрещины, а также и микротрещины и другие дефекты, находящиеся в области ультразвуковых пучков, создаваемых источниками, но и определять их форму и длину.

На рисунке 2 представлены осциллограммы сигналов с каждого из 4 приемников лабораторного макета устройства, имеющего один входной источник. На них изображены входной импульс, принятый по электромагнитному каналу (крайний слева), и импульсы на приемниках от рассеянных на микро- и нанотрещинах и других дефектах импульсов волн Лэмба. Они получены на образце листового закаленного стекла толщиной 4 мм.

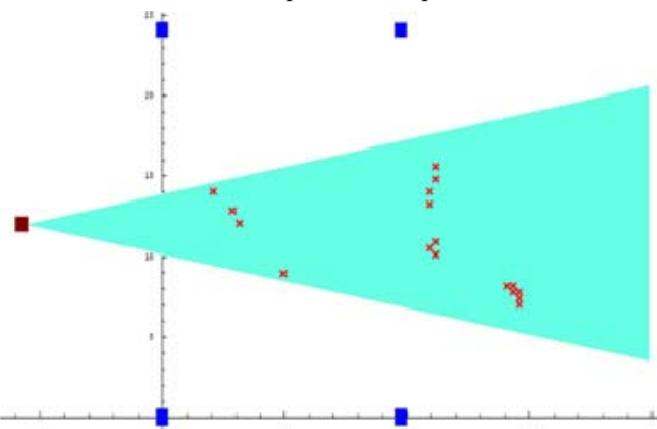
Наличие нескольких приемников позволяет определять координаты рассеивающих центров путем вычисления точек пересечения эллипсов, с фокусами на источниках и приемниках, построенных для разных времен задержки принятых импульсов (рис. 3).

На рисунке 3 зеленым цветом показана область ультразвукового пучка от источника (красный квадрат). Синие квадраты обозначают приемники ультразвуковых импульсов волн Лэмба. Красными крестами показаны точки расположения рассеивающих центров, то есть микро- и нанотрещин, а также других дефектов.



*Рис. 2. Осциллограммы рассеянных на микро- и нанотрещинах и других дефектах ультразвуковых импульсов*

При перемещении устройства по стеклу картина принятых сигналов и, следовательно, рассеивающих центров сильно изменяется. Это свидетельствует о преимущественно несимметричном рассеянии ультразвуковых волн, то есть о наличии достаточно протяженных хаотически ориентированных рассеивающих объектов, каковыми являются микро- и нанотрещины.



*Рис. 3. Изображение расположения рассеивающих центров (×).*

При приложении к стеклу механической силы, приводящей к изгибу стекла, картина принятых сигналов также изменяется. При этом часть импульсов от рассеянных волн Лэмба пропадает, могут

возникнуть импульсы с другим временем задержки, а часть импульсов может не измениться. Это свидетельствует о том, что часть нанотрещин может исчезать приложении механического напряжения в одном месте и появляться в другом месте, часть нанотрещин, а также микротрещины и другие дефекты, сохраняются.

При исключении сигналов от постоянных дефектов было обнаружено, что большинство нанотрещин, родившихся при появлении механических напряжений, исчезают при снятии механического воздействия, но иногда сигнал от некоторых нанотрещин не исчезает. Это может означать, что нанотрещина встретилась с объемным дефектом и закрепилась на нем. Аналогичное явление с закреплением вихрей Абрикосова в сверхпроводниках принято называть пиннингом [1]

Проведенные исследования показали, что в аморфных материалах нанотрещины могут рождаться и уничтожаться приложении и снятии механических напряжений. Количество образующихся нанотрещин зависит от свойств материала. Нанотрещины могут закрепляться в материале при встрече с объемным дефектом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tinkham M. Introduction to Superconductivity // McGraw-Hill. 1975., New York.

УДК 532.135

**И.И.Конопацкая, П.А.Пятаков**

#### ФАЗОВЫЙ МЕТОД В ИССЛЕДОВАНИЯХ БЫСТРОМЕНЯЮЩИХСЯ СОСТОЯНИЙ МЯГКИХ СРЕД

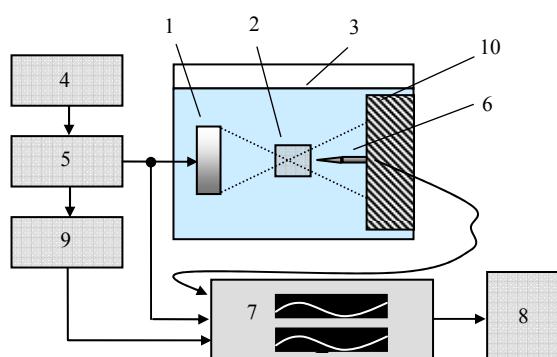
ГНЦ РФ ФГУП «Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева»

Россия, 117036 Москва, ул. Шверника, д.4

Тел.: (495) 126-9063; Факс: (495) 126-8411; E-mail: ikopopatskaya@gmail.com.

*Фазовый метод, в предложенной модификации, основан на анализе динамики разности фаз между гармоническим сигналом ультразвукового зондирующего пучка, прошедшего через исследуемый образец, и опорным сигналом. Зондирующий пучок создавался с помощью фокусирующего излучателя ультразвука (частота 0.99 МГц, диаметр пластины 62 мм, фокусное расстояние 70 мм). Представлены результаты экспериментального исследования нелинейных процессов, возникающих в образцах различных материалов (1.5% агарозного гиогогеля сnano- микродобавками и бурового раствора) под действием фокусированного ультразвука. Показано, что метод обладает высокой чувствительностью и позволяет регистрировать события с характерным временем  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  с, происходящие в среде в локальной области ультразвукового воздействия (протяженность ~1 см), сопровождающиеся относительным изменением значения скорости звука в среде  $\Delta c/c \sim 10^{-4}$ .*

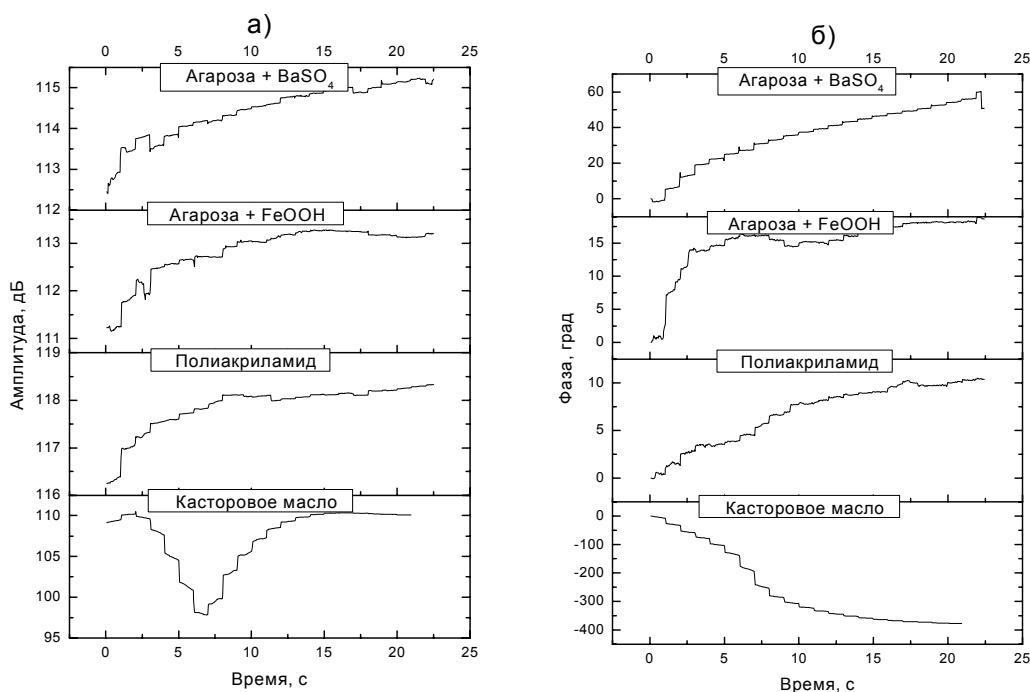
Воздействие ультразвуковых (УЗ) волн высокой амплитуды на мягкие гелеобразные среды может приводить к разнообразным физическим эффектам, таким как возникновение газовых и паровых пузырьков в среде, явление кавитации, разрушение структуры среды, ее разжижение, появление акустических течений, дрейф твердотельных включений в среде и т.д. В той или иной степени все они важны во многих практических приложениях и, прежде всего, в области медицинской акустики. Важнейшей задачей при этом является мониторинг, слежение за состоянием среды в области воздействия. Имеются различные подходы к решению этой проблемы. Прежде всего, следует упомянуть об ультразвуковых и магниторезонансных методах визуализации [1]. Однако, установки и методики, созданные на основе этих методов, как правило, весьма дорогостоящи. Наиболее простым и дешевым представляется метод, основанный на наблюдении за изменениями, которое претерпевает само ультразвуковое воздействующее поле при взаимодействии со средой. Примером использования такого подхода является широко используемая методика наблюдения за субгармоникой основной частоты, по наличию и интенсивности которой судят об активности процесса кавитации в среде. Кроме того, поскольку все упомянутые изменения механических свойств среды неизбежно приводят к изменению фазовой скорости звука и коэффициента потерь по ходу распространения волны, то наблюдения за амплитудой, частотой и фазой проходящей волны,



**Рис. 1.** Структурная схема экспериментальной установки: 1 - фокусирующий излучатель, 2 - образец, 3 – резервуар с отстоявшейся водой, 4 - задающий прецизионный генератор, 5 - усилитель мощности, 6 - гидрофон, 7 - аналого-цифровой преобразователь, 8 - персональный компьютер, 9 - генератор синхроимпульсов, 10 - поглотитель ультразвука

взаимодействующей со средой, могут дать полезную информацию о состоянии исследуемого материала в области воздействия. Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в настоящей работе, показали продуктивность такого подхода. В отличие от работы [2], в которой подробно описана методика измерения фазы в локальной области ультразвукового воздействия с использованием фокусирующих систем, нами основное внимание уделяется возможностям фазового метода в исследовании процессов, развивающихся во времени с различными временными масштабами: при медленных изменениях в диапазоне 1-20 с и при быстрых изменениях в диапазоне 1-100 мс.

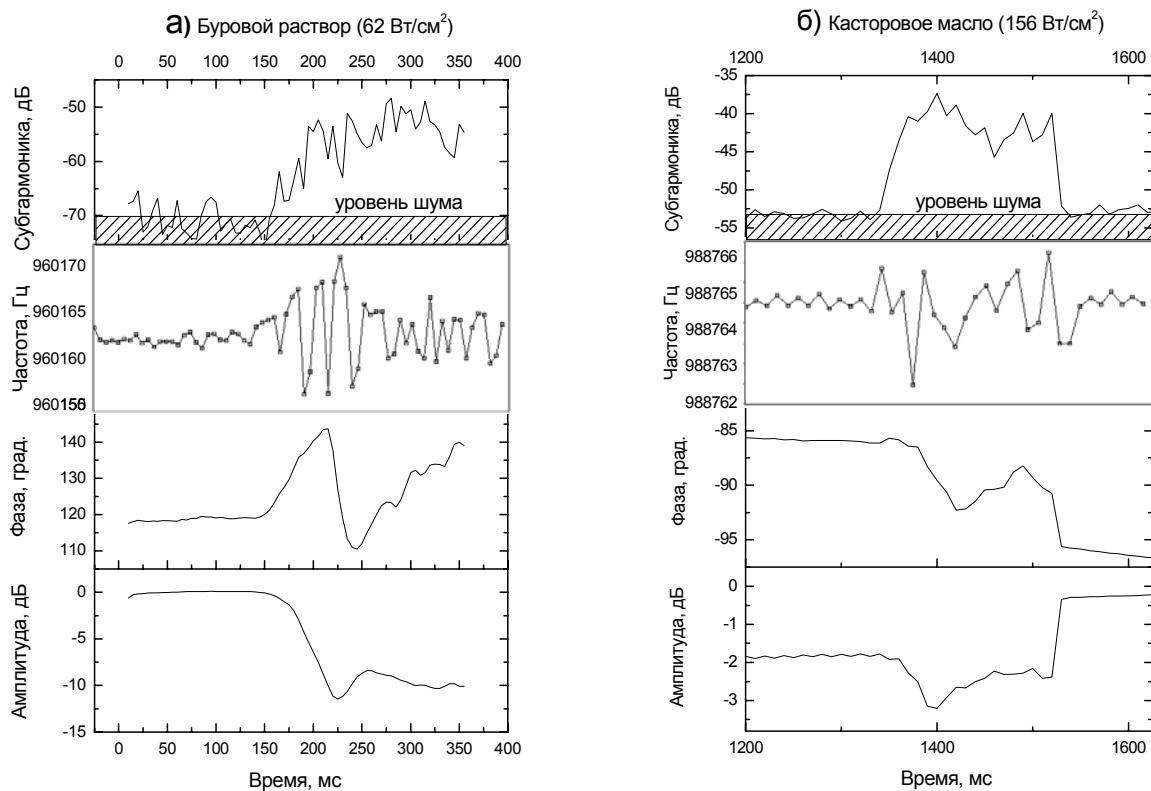
Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Ультразвуковой пучок формировался пьезокерамическим сферическим фокусирующим излучателем (1) (диаметр пластины  $d = 62$  мм, фокусное расстояние  $F = 70$  мм). Исследуемый образец (2) располагался в фокальной области излучателя в центре резервуара (3) с отстоявшейся водой таким образом, что весь волновой пучок проходил через него. Возбуждение излучателя осуществлялось на частоте 0.99 МГц с помощью кварцевого генератора Г3-110 (4) и усилителя мощности УЗГМ (5). Гидрофон (6) цилиндрической формы, вклеенный в иглу с внешним диаметром 2 мм, имеющий равномерную амплитудно-частотную характеристику в исследуемом диапазоне частот, устанавливался непосредственно за образцом, и принимал сигнал в волне, прошедшей через образец. Оба сигнала: принятый гидрофоном (6), и опорный, с выхода усилителя (5), - поступали на входы двухканального 8-и разрядного аналого-цифрового преобразователя ЛА-н4USB (7), (чувствительность по входу  $\pm 0.125$  В, частота дискретизации 3.91 МГц), соединенного с персональным компьютером (8) через шину USB. Последовательность выборок сигнала, продолжительностью 267 мс, привязка которых по времени к моменту запуска УЗГМ осуществлялась с помощью генератора синхроимпульсов (9), сохранялась на жестком диске в виде wav-файла.



*Рис. 2. Амплитуда (а) и фаза (б) прошедшего сигнала. Интенсивность действующего УЗ 48 Вт/см<sup>2</sup>, что соответствует давлению 1.18 МПа*

Обработка записанных сигналов проводилась средствами системы графического программирования LabView. Оба сигнала одновременно, в режиме скользящего окна, подвергались Фурье-преобразованию. Затем определялось отношение амплитуд основной гармоники двух сигналов: прошедшего и опорного, и разность фаз между ними. Окно, выделяющее фрагмент сигнала длиной  $T$ , перемещалось в автоматическом режиме и позволяло получить зависимость этих величин от времени с временным разрешением, равным длительности окна. Значение  $T$  могло варьироваться в широких пределах, но, обычно, устанавливалось  $T = 5$  или 10 мс. Для измерения частоты прошедшего сигнала была использована стандартная подпрограмма поиска пиков из пакета LabView 2010. В отсутствии шумов она давала случайную ошибку определения положения пика в спектральном распределении, меньшую 1 Гц.

На рис. 2 приведены зависимости значений нормированной амплитуды и фазы прошёдшей волны от времени, при интенсивности УЗ, усреднённой по площади фокального пятна в воде,  $I=48 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , в образцах мягких сред (гидрогели: полиакриламид и две разновидности агарозы с присадками нано- и микрочастиц  $\text{BaSO}_4$  и  $\text{FeOOH}$  [3]) и для сравнения - в вязкой, сильно поглощающей УЗ, жидкости - касторовом масле. Поведение амплитуды указывает, главным образом, на изменения вязкости в среде под действием УЗ, но может зависеть и от самоиндуцированного рассеяния и преломления. Изменения фазы, определяемые поведением скорости волн в области воздействия, зависят, в основном, от вызванных УЗ изменений модуля упругости. Видно, как по-разному реагируют на УЗ воздействие исследуемых материалы. Под действием ультразвука происходит разжижение гелевой среды и превращение её в водный раствор. Одновременно идет постепенное нагревание среды в области фокусировки. В соответствие с этими процессами мы видим увеличение фазы во всех гидрогелях, указывающее на уменьшение скорости звука в образце, вызванное уменьшением модуля упругости разжижающейся среды. Амплитуда прошёдшей волны нарастает вследствие уменьшения вязкости и, следовательно, затухания УЗ в образце. Плавность изменения амплитуды и фазы в образцах касторового масла, полиакриламида и агарозного геля с присадками  $\text{BaSO}_4$  говорит об отсутствии при данном значении интенсивности УЗ пороговых эффектов, связанных, в частности, с возникновением кавитации. И, наоборот, неравномерность нарастания фазы и амплитуды в образце агарозы с присадками  $\text{FeOOH}$  может быть связано с эффектами, обусловленными поведением газовых пузырьков в УЗ поле.

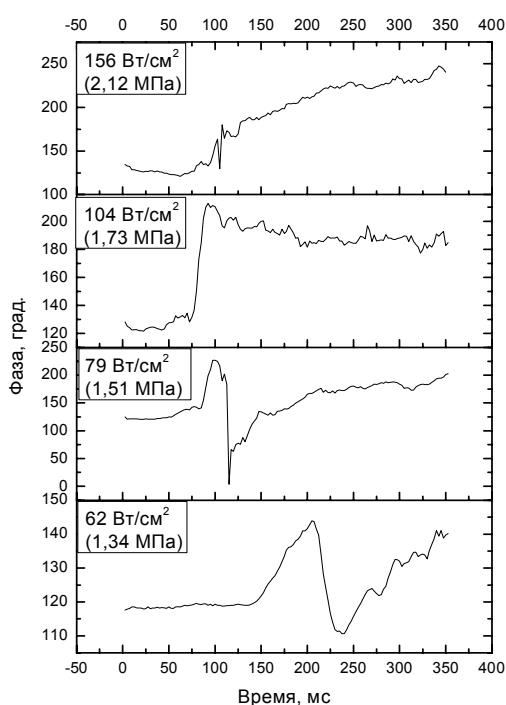


**Рис.3.** Амплитуда основного сигнала и субгармоники, частота и сдвиг фазы в образцах бурового раствора (а) и касторового масла (б) при возникновении кавитации в среде (значения интенсивности, соответственно, 62 и 156  $\text{Вт}/\text{см}^2$ , давления - 1.34 и 2.12 МПа)

При увеличении интенсивности действующего УЗ, начиная с некоторого порогового значения, в исследуемых образцах в процессе озвучивания наблюдались нерегулярные изменения фазы и амплитуды прошёдшего сигнала, что коррелировало с появлением в сигнале субгармонической составляющей. Известно, что последнее принято считать критерием возникновения кавитации в среде. Эффекты носили пороговый характер и возникали уже при достаточно малых временах озвучивания. На рисунке 3 представлены примеры таких событий в образцах бурового раствора (глинистая суспензия со специальными добавками поверхностно активных веществ,  $I=62 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ) и касторового масла ( $I=156 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ). На приведенных графиках видно, что событие резкого роста амплитуды субгармоники над уровнем шума сопровождается определенными изменениями всех параметров волны. Амплитуда

прошедшей волны заметным образом падает. Частота при этом характеризуется увеличенными флуктуациями - степенью разброса измеренных величин. Нерегулярным образом ведёт себя фаза.

На рис. 4 в образце бурового раствора можно видеть эволюцию во времени фазы прошедшего сигнала при различных значениях интенсивности действующего УЗ. Все кривые соответствуют экспериментальным реализациям, когда, по критерию возникновения субгармоники, можно предположить наличие кавитации в образце. При интенсивности  $I=62 \text{ Вт/см}^2$  резкое нарастание фазы совпадает по времени с возникновением субгармоники (см. также рис. 3). Объяснение немонотонности изменения фазы возможно в рамках следующей модели. Предположим, что изменения фазы, а, следовательно, и скорости волны, на этом временном участке обусловлены взаимодействием волн с газовыми пузырьками, причем средний размер пузырьков, оказывающихся на пути УЗ пучка в фокальной области излучателя, растет со временем под действием УЗ, проходя через резонансное значение. Согласно работе [4], фазовая скорость УЗ волны в среде с пузырями уменьшается, если средний размер пузырьков в среде меньше резонансного, оказывается неизменной, если он равен резонансному, и увеличивается, если – размер пузырьков превышает резонансное значение. При этом, соответственно, должна изменяться фаза, проходя последовательно через максимум и минимум. Что мы и видим на отдельных участках кривых рис.4.



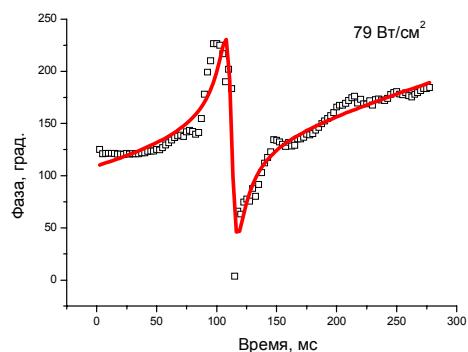
**Рис. 4.** Зависимость фазы от времени в буровом растворе

$$\Phi(t) = A(1+t/\tau_2) + B(1-(t/\tau_1)^2)/((1-(t/\tau_1)^2)^2 + d^2(t/\tau_1)^2)$$

Коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $d$  находились путем оптимального подбора по методу наименьших квадратов средствами программы OriginLab. В таблице даны полученные значения коэффициентов и погрешности аппроксимации.

	Величина	Погрешность	Размерность
A	92	3	град.
B	17,6	1,1	град.
$\tau_1$	112	0,3	мс
$\tau_2$	252	19	мс
d	0,091	0,007	-

частоты УЗ волны, проходящей через исследуемый образец, дает дополнительную информацию о состоянии среды, изменяющейся под действием ультразвука и характеризующейся изменением размера и концентрации микропузырьков газа, изменением температуры и степени разжижения тиксотропной среды. В некоторых случаях по форме зависимости фазы от времени можно получить информацию о



**Рис.5** Аппроксимация функцией, учитывающей линейный рост размера пузырька в УЗ поле на фоне процесса линейного разжижения среды

На рис.5 дано сравнение экспериментальных данных с теоретической кривой, построенной в предположении линейной зависимости роста среднего размера пузырьков в УЗ поле за счет выпрямленной диффузии. Этот процесс происходит на фоне разжижения среды, дающего фоновый рост фазы ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$  - характерные времена роста пузырька и процесса разжижения среды). Аппроксимирующая функция получена на основе теории работы [4] с дополнительным учетом линейной зависимости роста фазы от времени:

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что фазовый метод, в предложенной нами модификации, оказывается продуктивным при исследовании сложных процессов, происходящих в гелевых средах под действием УЗ.

Измерение временных зависимостей фазы и частоты УЗ волны, проходящей через исследуемый образец, дает дополнительную информацию о состоянии среды, изменяющейся под действием ультразвука и характеризующейся изменением размера и концентрации микропузырьков газа, изменением температуры и степени разжижения тиксотропной среды. В некоторых случаях по форме зависимости фазы от времени можно получить информацию о

динамика газо-паровых пузырьков в УЗ поле, характерные резкие изменения фазовых и частотных кривых указывают на наличие процессов кавитации по трассе УЗ пучка.

Метод эффективен как для исследований процессов с характерным временем 10-100 мс, так и на более длительных временных интервалах. Предельные возможности метода: быстродействие –  $(10-100)/f_0$ , ( $10^{-5}$ - $10^{-4}$  с при  $f_0=1$  МГц); чувствительность метода по параметру  $\Delta c/c$  при базовой длине в 1 см составляет  $2 \cdot 10^{-4}$ .

Авторы благодарят РФФИ за поддержку работы, гранты № 11-02-01060-а и № 11-03-00958-а.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Под ред. К. Хилла, Дж. Бэмбера, Г. тер Хаар, М. Физматлит, 2008.
2. L.R. Gavrilov, V. N. Dmitriev, and L. V. Solontsova. Use of focused ultrasonic receivers for remote measurements in biological tissues // JASA. 1988.- 83 (3).- 1167-1179.
3. И.И. Конопацкая, М.А. Миронов, П.А. Пятаков, В.Е. Божевольнов, А.В. Гопин, А.Л. Николаев Воздействие интенсивного ультразвука на гелевые материалы // Сборник трудов. XX сессия Российского акустического общества. - М.: ГЕОС - 2008. - том 1.- С.86-90.
4. Е. Скучик . Основы акустики.- Том 2 - ИЛ, 1959 .

УДК 534.23

**А.С.Артемьев\*, А.Н.Неверов\*\*, А.А.Рухман\*\***

## ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ В ГЛИЦЕРИНЕ

\*Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)

\*\*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Россия, 125164, Ленинградский пр., 64

Тел.: (499)1550868; E-mail: [neverov\\_an@mail.ru](mailto:neverov_an@mail.ru)

Приводятся результаты экспериментальных исследований ультразвуковой кавитации в глицерине. Характер изменения сопротивления излучения глицерина такой же, как и воды, сопротивление излучения приблизительно обратно пропорционально амплитуде колебательной скорости излучателя. Показано, что скорость протекания кавитационных явлений в глицерине существенно ниже, чем в воде, что обусловлено, по-видимому, его большей вязкостью.

Проблема качества дорожных покрытий стоит сейчас весьма остро. Один из способов ее решения – ультразвуковая обработка битумов. Однако акустические характеристики разогретых битумов на сегодня не изучены. В то же время есть обоснованное мнение, что аналогичными свойствами обладает глицерин при комнатных температурах [1,2]. К тому же глицерин при комнатных температурах прозрачен.

Важнейшие акустические характеристики жидкости – зависимость эффективного звукового давления и сопротивление излучения от амплитуды колебательной скорости

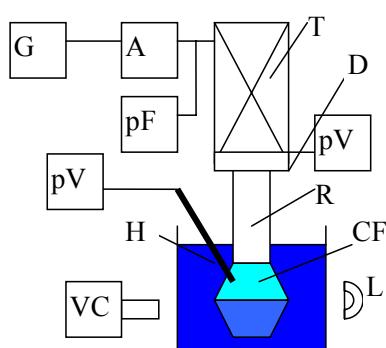
Эксперименты проводились на установке, блок-схема которой приведена на рис. 1.

Сигнал электродинамического датчика пропорционален амплитуде колебательной скорости излучателя  $v_m$ , а сигнал гидрофона эффективному звуковому давлению в жидкости  $p_{\text{эфф}}$ .

Экспериментальные зависимости эффективного звукового давления от амплитуды колебательной скорости приведены на рис. 2.

Характер зависимостей для воды и глицерина одинаков, причем значения эффективного звукового давления в глицерине ниже, хотя значение волнового сопротивления глицерина в отсутствие кавитации в 1,7 раза больше ( $2,42 \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>с у глицерина и  $1,48 \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>с у воды). Вначале зависимость  $p_{\text{эфф}} = p_{\text{эфф}}(v_m)$

**Рис. 1.** Блок – схема экспериментальной установки. G – генератор, A – усилитель, pF – частотомер, T – преобразователь, R – излучатель, D – электродинамический датчик, pV – вольтметр, H – широкополосный гидрофон, CF – кавитационная область, L – источник света, VC – видеокамера.



однозначна и линейна. При увеличении  $v_m$  звуковое давление имеет статистический характер, на графике показаны наблюдаемые пределы изменения мгновенных значений  $p_{\text{эфф}}$ . Размах изменений  $p_{\text{эфф}}$  у глицерина существенно меньше.

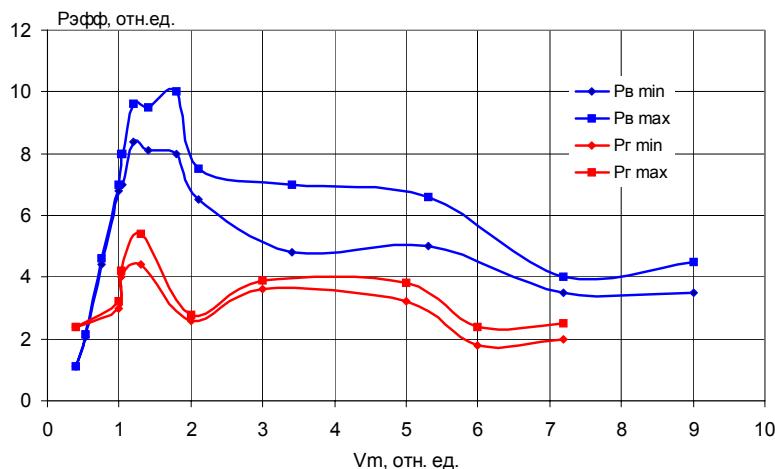


Рис. 2. Экспериментальные зависимости эффективного звукового давления в воде и глицерине от амплитуды колебательной скорости излучателя

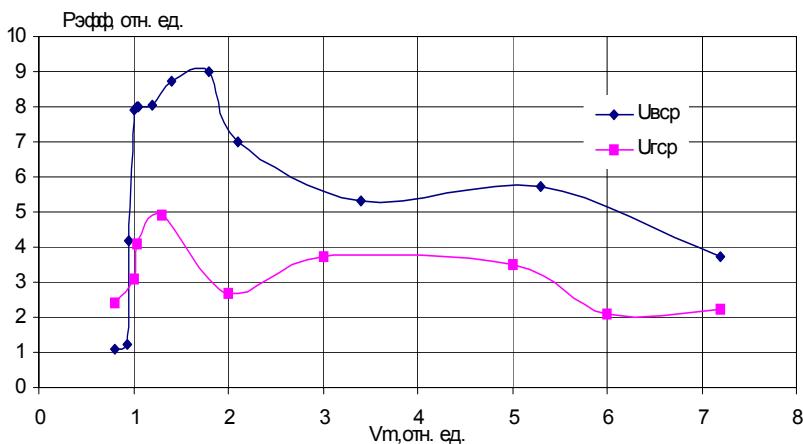


Рис. 3. Усредненные зависимости эффективного звукового давления в воде и глицерине от амплитуды колебательной скорости излучателя  
 $p_{\text{эфф}} = p_{\text{эфф}}(v_m)$

падает, что связано в первую очередь со снижением скорости звука в жидкости. Когда в жидкости имеет место развитая кавитация, интегральное сопротивление падает незначительно. Характер изменения интегрального сопротивления в воде и глицерине практически одинаков, но для воды это сопротивление несколько больше.

Дифференциальное сопротивление  $R_{\text{дифф}} = \frac{\partial p_{\text{эфф}}}{\partial v_m}$  характеризует поведение системы при относительно

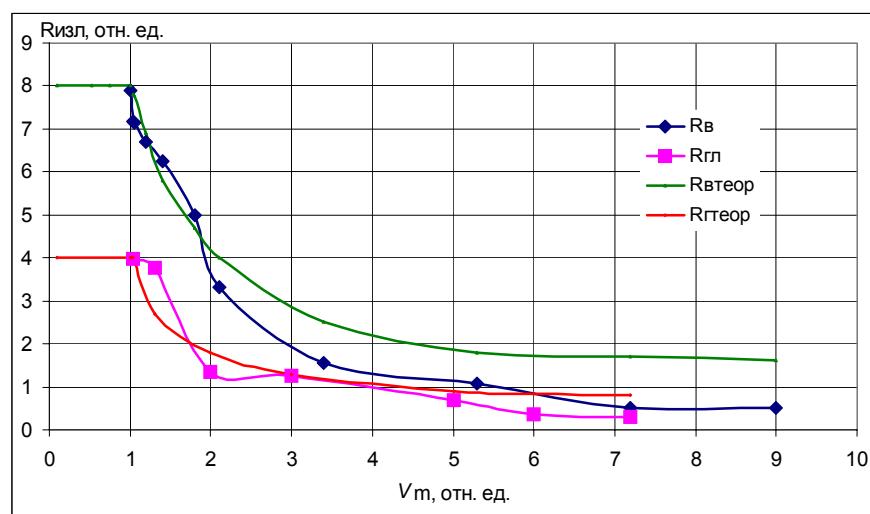


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические зависимости сопротивления излучения от амплитуды колебательной скорости

Усредненные зависимости  $p_{\text{эфф}} = p_{\text{эфф}}(v_m)$  приведены на рис. 3.

При небольших значениях амплитуды колебательной скорости эти зависимости близки к линейным, на этом участке кавитация не наблюдается. Далее при увеличении амплитуды колебательной скорости эффективное звуковое давление  $p_{\text{эфф}}$  резко падает, на этом участке происходит развитие кавитации. При дальнейшем повышении амплитуды колебательной скорости  $v_m$  эффективное звуковое давление  $p_{\text{эфф}}$  растет, но значительно медленнее, чем в отсутствие кавитации. Таким образом, обе жидкости представляют собой нелинейную нагрузку.

В нелинейном случае понятие сопротивления не однозначно. Интегральное

сопротивление  $R_{\text{инт}} = \frac{p_{\text{эфф}}}{v_m}$  можно

трактовать как меру воздействия нелинейной нагрузки на линейно колеблющийся излучатель. При малых амплитудах колебательной скорости  $v_m$ , в докавитационном режиме, интегральное сопротивление постоянно. При возникновении и развитии кавитации это сопротивление резко

небольших изменениях амплитуды колебательной скорости  $v_m$ . Если в докавитационном режиме дифференциальное сопротивление постоянно и совпадает с интегральным, то при возникновении кавитации оно, во-первых, зависит от величины амплитуды колебательной скорости  $v_m$ , во-вторых, существенно отличается от интегрального и, в-третьих, становится отрицательным. Последнее обстоятельство вполне может привести к переходу системы излучатель – жидкость в автоколебательный либо триггерный режим. Абсолютная величина среднего дифференциального сопротивления глицерина несколько ниже, чем воды, потому, как нам представляется, переход к таким режимам при излучении в глицерин маловероятен. Однако, исходя из статистического характера эффективного звукового давления  $p_{\text{эфф}}$  (см. рис. 2), такой переход вполне возможен.

Из энергетических соображений сопротивление излучения определяется как  $R_{usl} = \frac{2W}{v_m^2}$ , где  $W$  -

излучаемая в жидкость акустическая мощность.

При калориметрировании считаем, что вся акустическая энергия превращается в тепло, поэтому сопротивление излучения определяется по формуле

сопротивление излучения определяется по формуле

$$R_{\text{изл}} = \frac{2Cm\Delta T}{v^2 \tau}, \text{ где } C - \text{ теплоемкость жидкости, } m - \text{ ее масса, } \Delta T -$$

приращение температуры за время  $\tau$ .

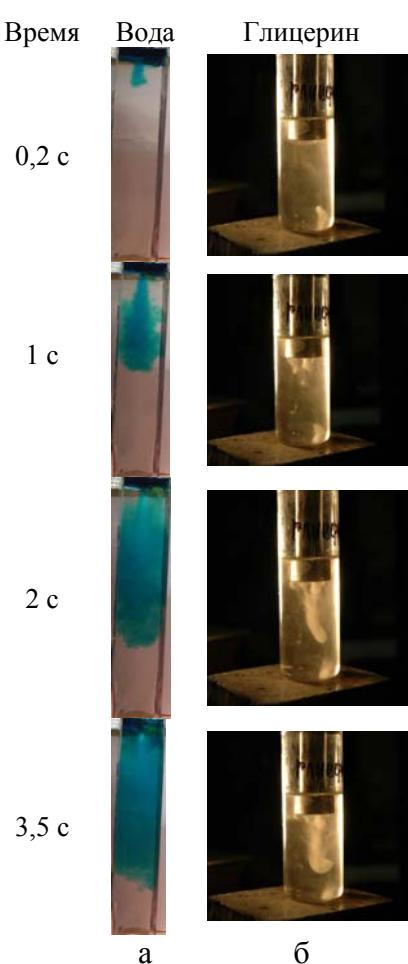
Экспериментальные зависимости сопротивления излучения  $R_{изл}$  амплитуды колебательной скорости  $v_m$  приведены на рис. 4. На этом же графике показаны теоретические зависимости [3].

При малых значениях амплитуды колебательной скорости, пока кавитация отсутствует, сопротивление излучения  $R_{изл}$  постоянно, т.е. обе жидкости – вода и глицерин – представляют собой линейную нагрузку. Ход зависимостей соответствует как литературным данным [4,5], так и нашим расчетам [3] при соответствующем подборе параметров зависимости интенсивности звуковой волны от координаты [6], хотя необходимо отметить, что измеренное сопротивление излучения воды больше, чем у глицерина.

Качественно исследовались скорости формирования потоков и кавитационной области.

В первом эксперименте сравнивались картины формирования крупномасштабных кавитационных потоков в водопроводной воде и глицерине при одинаковых амплитудах колебательной скорости излучателя. Эти процессы фиксировались при помощи ускоренной киносъемки. На рис. 5 зафиксированы моментальные снимки жидкостей в одно и те же моменты при амплитуде колебаний примерно 10 мкм. Частота составляла приблизительно 21 кГц. С целью визуализации потоков в воду вблизи излучающей поверхности добавлялся раствор бриллиантовой зелени. Заметим, что высота столба жидкости при съемке потоков в воде составляла примерно 50 см, а в глицерине – 3 см.

Видно, что потоки в глицерине формируются значительно медленнее, чем в воде.



**Рис 5.** Этапы формирования крупномасштабных потоков в кавитационной области в воде и глицерине



**Рис. 6.** Покадровая распечатка видеосъемки кавитации в воде при плавном изменения частоты излучателя от 19,8 до 21,8 кГц

см, причем они сконцентрированы вблизи оси излучателя.

Через 3,5 сек (третья пара фотографий) поток в воде пробивает столб примерно 40 см и имеет вполне установленную структуру. В глицерине же поток до сих пор не пробил сосуд высотой 3 см и в нем появился намек на горизонтальную компоненту.



**Рис. 7.** Покадровая распечатка видеосъемки кавитации в глицерине при плавном изменения частоты излучателя от 19,8 до 21,8 кГц

Частота колебаний излучателя плавно изменялась в течение 10 – 15 сек от 19,8 до 21,8 кГц. Собственная частота излучателя составляла приблизительно 20,9 кГц. В процессе изменения частоты проводилась видеосъемка жидкости, в которую происходило излучение, в реальном времени.

Через 0,2 сек после включения генератора (первая пара фотографий) поток в воде уже формируется, в глицерине же не видно даже следов формирующихся потоков.

Через 1 сек (вторая пара фотографий) в воде сформировался не только поток, направленный от излучателя, но и обратный поток, направленный по периферии сосуда снизу вверх. Этот поток должен возникнуть обязательно в силу закона сохранения импульса. В глицерине же поток только начал формироваться вблизи излучающего торца.

Через 2 сек (третья пара фотографий) потоки пробивают столб воды примерно на 35 см, в воде практически сформировался замкнутый поток. Поток в глицерине пробивает жидкость примерно на 2

Резюмируя выше сказанное, можно сделать заключение о том, что формирование потоков в глицерине протекает значительно медленнее, чем в воде. Очевидное объяснение этого положения заключается в том, что вязкость глицерина много больше вязкости воды, поэтому и постоянная времени формирования потоков в глицерине должна быть много больше, чем для воды. Рис. 5 убеждает также в том, что характер формирования потоков в воде и глицерине разный.

Во втором эксперименте этой серии сравнивались картины формирования кавитационной области в воде и глицерине при плавном изменении частоты колебаний излучателя.

Покадровые распечатки для резонансной амплитуды колебаний приблизительно 20 мкм при излучении в воду и глицерин приведены на рис. 6 и 7 соответственно.

Видно, что кавитация в воде развивается и затухает значительно быстрее, чем в глицерине. Кавитация в воде возникает в течение примерно 2 сек (с 5-й по 7-ю, кадры с 9-го по 11-й), затухает в течение примерно 3 сек (с 7-й по 9-ю, кадры с 11-го по 16-й). Кавитация в глицерине возникает в течение более 10 сек (с 0-й по 9-ю, кадры с 1-го по 10-й, начало формирования кавитационной области началось до начала съемки), затухает в течение более 4 сек (с 10-й по 14-ю, кадры с 11-го по 16-й, по окончании съемки кавитация в глицерине еще не затухла).

Это, очевидно, связано с существенно большей вязкостью глицерина и его значительно меньшей добротностью. Действительно, амплитудно – частотные характеристики излучателя при излучении в воду были острее, чем при излучении в глицерин.

Кроме того, совершенно очевидно, что кавитация в воде и глицерине имеет абсолютно разный характер.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Печёный Б.Г. Битумы и битумные композиции. – М., 1990. – 256 с.
2. Зинченко В.Н. Исследование влияния ультразвуковой обработки битума на структурообразование и свойства асфальтобетона: Дисс. ...канд. техн. наук. – Харьков, 1979. -243 с.
3. Артемьев А.С., Неверов А.Н. О сопротивлении излучения вязких жидкостей. Труды// XXII сессия Российского акустического общества. М., Геос, 2010, т. 1, с. 287-291
4. Kikuchi Y., H. Shimizu. On the variation of acoustic radiation resistance in water under ultrasonic cavitation. JASA, 1959, 31, 10, p. 1385-1389
5. Розенберг Л.Д., Сиротюк М.Г. Об излучении звука при наличии кавитации. Акустический журнал, 1960, т. 6, № 4, с. 478-486
6. Розенберг Л.Д. Кавитационная область. // Мощные ультразвуковые поля. Физика и техника мощного ультразвука. М.: Наука, 1968, с. 221-266

УДК 544.57

**С.Д.Шестаков<sup>1</sup>, Т.В.Шленская<sup>1</sup>, О.Н.Красуля<sup>1</sup>, Р.Ринк<sup>2</sup>, Э.Ю.Смешек<sup>2</sup>, В.И.Богуш<sup>1</sup>, Я.А.Артемова<sup>1</sup>**

#### **УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СОНОХИМИЯ ДЛЯ ГИДРАТАЦИИ ПОЛЯРНЫХ КОМПОНЕНТОВ СРЕД ОБРАТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРИГОТОВЛЕНИЯ**

<sup>1</sup>ГОУ ВПО Московский государственный университет технологий и управления, Россия, 109004

Москва, Земляной вал, 73, Тел. 8(495) 670-10-86, E-mail: [tppexpert@mgutm.ru](mailto:tppexpert@mgutm.ru)

<sup>2</sup>Oil Tech Production OY, Estonia, 11913, Tallinn, Kressi Tee, 34 A

Phone +372 56 224 146, E-mail: [info@oiltech-nordic.eu](mailto:info@oiltech-nordic.eu)

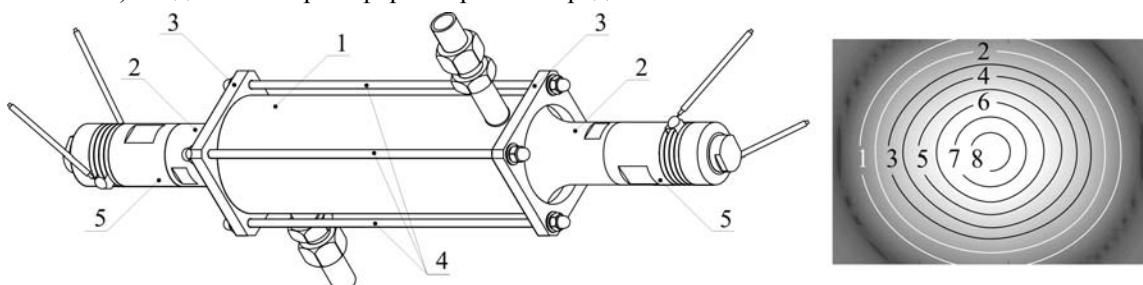
*В производстве эмульсий пищевых жиров ультразвуковым методом известен эффект образования в процессе эмульгирования веществ с двойственной растворимостью: ди- и моноглицеридов жирных кислот. Они играют роль поверхностно-активных веществ и действуют аналогично полярным компонентам жиров – фосфолипидам. Эти дифильные вещества образуются при гидролизе под действием кавитации триглицеридов и, вступая своими гидроксильными группами в реакцию гидратации с водой, располагаются на поверхности дисперсной фазы – воды. Подобный эффект может быть применен и в производстве топливных эмульсий из мазутов, которые имеют в своем составе полярные макромолекулы наftenовых кислот, смол и асфальтенов с гетероатомами кислорода, серы и азота, образующими у них полярные центры. Они тоже могут вступать во взаимодействие с диполями молекул воды. Но для этого сама вода, также имеющая даже при достаточно высоких температурах и находясь под давлением, собственную структуру, должна быть дезинтегрирована. Лучше всего для структурной дезинтеграции воды и подготовке ее к реакции гидратации путем временного выведением из термодинамического равновесия подходит ееsonoхимическая обработка. В работе изложены результаты проведенных исследований этой технологии МГУТУ им. К.Г. Разумовского и результаты работ эстонской фирмы Oil Tech Production OY по созданию оборудования для ее реализации, в том числе в области производства пищевых и топливных эмульсий.*

Среды таких разных по использованию эмульсий как пищевые и топливные – это, соответственно, растительные жиры и мазуты, содержат вещества с полярными молекулами типа фосфолипидов первые и смолисто-асфальтеновых соединений и наftenовых кислот вторые. Вязкость и тех и других эмульсий определяется наличием в них как частичек водной фазы, так и способных образовывать надмолекулярную структуру полярных компонентов среды. За счет смачиваемости молекул последних, они располагаются на поверхности раздела мазута и воды, обращаясь полярной группой в воду и создавая, таким образом, структурно-механический слой, который способствует повышению дисперсности и стабилизирует эмульсию. Уменьшение размера частиц дисперсной фазы эмульсий, при одинаковом ее содержании приводит и к увеличению вязкости. Но это свойство отрицательное для топливных эмульсий проигрывает их повышенной стабильности [1,2]. Поэтому методы получения разных по составу и назначению эмульсий направлены на повышение всеми средствами дисперсности и гомогенности водной фазы.

В естественных условиях молекулы веществ с полярными группами, находясь в диполь-дипольных взаимодействиях друг с другом имеющими противоположные электрические заряды полярными группами, образуют сложные надмолекулярные структуры. В широко используемых для приготовления эмульсий роторных аппаратах большие градиенты давления вполне могут разрушать эти структуры, подготавливая среды будущих эмульсий к вступлению в реакцию гидратации. Освобождающиеся от структурных связей полярные центры могут вступать во взаимодействие с диполями, которые представляют собой отдельные молекулы фазы эмульсии – воды [3]. Но для этого сама вода, также имеющая даже при достаточно высоких температурах и тем более находясь под избыточным давлением, собственную структуру [4], должна быть предварительно дезинтегрирована. Известно, что лучше всего для структурной дезинтеграции воды и временного выведения ее из состояния термодинамического равновесия, то есть подготовки ее к реакции гидратации, подходитsonoхимическая обработка в кавитационном реакторе [5]. Реактор это аппарат для возбужденияsonoхимических процессов (процессов химии высоких энергий) в находящейся в нем воде за счет действия акустической кавитации. Акустическая кавитация возникает под действием гармонического изменения звукового давления в упругой волне, распространяющейся в воде акустическими излучателями. При этом в процессах, предназначенных для приготовления топливных эмульсий, где кавитацию можно без действующих в пищевойsonoхимии [6] ограничений сделать сильнее кроме повышения растворяющей способности воды осуществляется синтез пероксида водорода. Он в дальнейшем под воздействием температуры при горении эмульсии разложится с выделением атомарного кислорода, являющегося мощным окислителем топлива.

Sonoхимически полученное неравновесное состояние воды, сопровождающееся ее высокой химической активностью, сохраняется в течение определенного отрезка времени, а релаксация его происходит асимптотически [3]. То есть, приобретенная в результате sonoхимической обработки аномально высокая растворяющая способность воды, позволяющая ей интенсивнее, чем обычно вступать в реакцию гидратации должна быть использована тот час же после обработки. Для этого обработанная вода должна с определенной требуемой ее содержанием в эмульсии скоростью непрерывно подаваться в смеситель вместе со средой. В условиях непрерывного приготовления эмульсии в технологической системе, которая включает sonoхимический реактор, необходимо согласование скоростей sonoхимической обработки воды, смешивания ее со средой и роторного диспергирования смеси. Поэтому sonoхимический реактор должен обладать определенной производительностью, зависящей от величины энергии, рассеиваемой на кавитационной дезинтеграции воды. Она определяется оптимизацией процесса по разработанной методике [7].

Разработан такой sonoхимический реактор для перечисленных выше процессов приготовления эмульсий по 5-15 *m/час* (Рис. 1) с двумя возбуждающими в протекающей через его рабочее пространство воде стоячую упругую волну электроакустическими преобразователями, подключенными к одному источнику питания (ультразвуковому генератору) и совершающими при работе когерентные колебания. Он состоит из корпуса 1, акустических трансформаторов 2, герметично с помощью эластичных прокладок закрепленных в нем посредством фланцев 3 в узлах колебательных смещений. Фланцы стянуты между собой стяжками 4, образуя с корпусом и трансформаторами герметичный рабочий объем для пропускания через реактор обрабатываемой воды. Источники колебаний – электроакустические преобразователи 5 (MPI5050F-20L) соединены с трансформаторами посредством шпилек.



*Рис. 1. Конструкция sonoхимического реактора и картина распределения эрозионной мощности кавитации в его рабочем объеме. Изолиниями соединены точки одинаковых значений.*

Этот реактор является реактором плоской волны и рассчитан по формулам для неустановившегося режима кавитации, так как время воздействия ее на объем обрабатываемой воды весьма мало для учета акустических течений и при гидростатическом давлении в ней приблизительно равном атмосферному. Таким образом, средняя объемная плотность его условной эрозионной мощности кавитации (ЭМК) описана пропорцией и вычислена, как интеграл [8]:

$$\text{ЭМК} = MV \sim 2f \int_0^{H/2} \int_0^{D/2} x \Delta p^2 dx dy, \quad (1)$$

где:  $\Delta p$  – относительное мгновенное значение возмущения давления от кавитации в любой точке объема воды;  $f$  – частота акустической волны;  $D$  – внутренний диаметр корпуса реактора;  $H$  – расстояние между излучающими поверхностями акустических трансформаторов;  $V$  – объем реактора;  $x$  – координата по  $D$  в плоскости диаметрального сечения объема;  $y$  – координата по  $H$ . Полученные в итоге математического моделирования и расчета значения приведены на рис. 1 справа в виде тонового рисунка распределения в диаметральной плоскости реактора ЭМК по отношению к средней ЭМК эталона (реактора РКУ-2,0 по ТУ 5130-002-26784341-2008, разработанного в МГУТУ).

Технологический аппарат, в составе которого используется реактор, кроме него включает в состав роторный дезинтегратор, названный так по следующим соображениям. Изначально термин «дезинтеграция» использовали только применительно к твердотельным процессам, происходящим в дезинтеграторах ударного типа, созданных специально взамен использующих в виде основного фактора силу сжатия мельниц для механического измельчения твердых сыпучих материалов за счет воздействия на измельчаемые частицы ударами. В последствии один из их создателей – доктор Й. Хинт, заметив, что при таком измельчении меняется не только дисперсность, но и некоторые важные физико-химические свойства обрабатываемых материалов, ввел понятие «механическая активация» и начал использовать словосочетание «дезинтеграторная активация», однако опять же применимые только к твердым сыпучим субстанциям [9]. Но позже он же стал писать об активации в механических дезинтеграторах и жидких сред [10]. Явления активации в роторно-импульсных или, как их еще называют, роторно-пульсационных устройствах, вскоре стали однозначно связывать с действием кавитации [11]. И лишь в этом столетии появился обозначивший дезинтеграцию жидких сред, как результат эрозионных эффектов гидромеханической [12] или акустической кавитации и стал самостоятельным термин «кавитационная дезинтеграция» [13]. Традиционной всегда была оценка эффективности дезинтеграции, которая базируется на гипотезе Й. Хинта, связывающей основные принципы построения конструкции дезинтегратора с возникающей в нем активностью. Она может быть выражена следующей цитатой из его работы [9]: «...чем больше число ударов, придаваемых частицам вещества, чем большая скорость удара и чем меньше интервал между следующими друг за другом ударами, тем большая возникает активность». Однако, анализу процесса разрушения частиц микронного размера, к тому же являющихся фазой раствора, понятия механического удара и какого-либо действия кинетической энергией потока этого раствора, явно не соответствуют. С такой оценкой сходны представления о дезинтеграции, изложенные в описаниях разработок роторно-пульсационных устройств, где эффективность гидродинамической кавитации повышают за счет увеличения скорости течения жидкости и частоты прерываний ее потока, а главным фактором полагают кинетическую энергию потока жидкости пропорциональную квадрату скорости ее движения [11,12]. Но легко подсчитать, что в подобном описанным там роторно-импульсном устройстве, перерабатывающем 10 т/час жидкости, при скорости вращения 300 об/с ротора диаметром 150 мм со сквозными каналами размерами 10×20 мм, поток ее проходит за время, пока эти каналы открыты на какую-либо их часть, расстояние чуть больше десятой части миллиметра. Перемещение на такую дистанцию парогазового пузырька не перенесет его «из зоны повышенного в зону пониженного давления» [14], что в соответствии с теорией кавитации должно вызвать цикл его пульсации, завершающийся испусканием импульса давления в гидродинамическом кавитационном процессе. Да и сам перепад давления, распространяясь в жидкости со скоростью звука в ней, пройдет за это время чуть больше сантиметра. Поэтому влияние скорости потока жидкости на кавитацию в роторных дезинтеграторах не есть ее исчерпывающее объяснение.

Поэтому следует использовать несколько другой подход к оценке эффективности дезинтеграторов, чем обычно применяемые. Здесь, главным фактором могут быть только пульсации кавитационных пузырьков и исходящие от них и вызывающие кавитационную эрозию упругие ударные волны [8,15], которые в теории колебаний и волн оценивают, находя величину деформаций разрежения-сжатия, то есть, через потенциальную составляющую рассеиваемой в жидкости энергии [16]. А кавитационная мощность в них также зависит от периодического изменения давления в жидкости, квадрату которого она, как и положено в периодических процессах, пропорциональна [17]. Причем в этом решающее значение имеет не столько изменение давления, вызванное прерывистостью течения жидкости по каналам в радиальном направлении, сколько порождаемое движением относительно нее профиля диаметрального сечения врачающегося ротора, имеющего заданную наличием в нем отверстий периодически повторяющуюся форму. Последнее подтверждается и тем, что существуют гомогенизаторы компании Aquametro AG, в которых жидкость протекает не в радиальном направлении, а в осевом направлении в зазоре между

снабженными глухими пазами в обращенных друг к другу стенках ротора и статора, площадь сечения которого по диаметру при этом остается постоянной (Рис. 2, слева вверху).

Среди роторных дезинтеграторов жидкых сред более широкое распространение получили такие, где в качестве ротора и статора используются одна или несколько цилиндрических оболочек конечной длины с дном, в которых выполнены сквозные отверстия прямоугольной формы. Ротор и статор создают рабочий объем между дном одного и дном другого, через который от оси к периферии конструкции в радиальных направлениях по открывающимся и закрывающимся при вращении каналам течет жидкость (Рис. 2, слева внизу). Математическая модель кавитации в таком дезинтеграторе может быть основана на дифференциальных уравнениях типа Хиклинга-Плессе или Рэлея-Плессе [8,18] движения стенки парогазовой полости под действием деформаций и механических напряжений, описываемых как

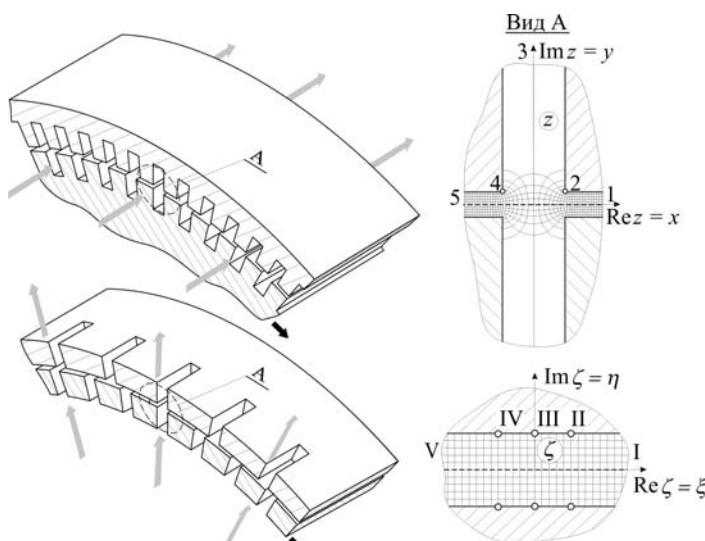


Рис. 2. Фрагмент конструкции статора и ротора гомогенизатора швейцарской фирмы Aquametro AG и устройства с ротором и статором в виде цилиндрических оболочек, где выполнены сквозные отверстия прямоугольной формы.

Серыми стрелками показано направление движения жидкости, черной – вращения ротора. Справа приведен вид А в сечении которого эквилиниями показаны напряжения-деформации жидкости, имеющей реологическое уравнение состояния предельного характера, как у абсолютно эластичного тела и текущей без трения, полученное путем конформного отображения изображенного внизу инвариант на это сечение. Арабскими и римскими цифрами указано соответствие углов.

действий над одной и той же жидкостью они вполне допустимы, к тому же если на стенке кавитационного пузырька в уравнении Хиклинга-Плессе она ведет себя как ньютонаевская жидкость. Механическое напряжение в любой ее точке можно выразить через давление в рабочем объеме  $p_0$  и производную от отображающей функции в отображении этой точки на инвариант  $\zeta$ :

$$\sigma = \frac{p_0}{\dot{z}^2}, \quad \dot{z} = \frac{dz}{d\zeta} \quad (2)$$

Ясно, что показатель степени при производной будет равен двум только при плоскопараллельности всех профилей потока жидкости.

Исследовать характер упругих деформаций и напряжений, а также поведение при их периодическом действии микроскопических парогазовых включений в жидкости можно путем численного моделирования, то есть постановки компьютерных экспериментов. Они позволяют делать численный сравнительный анализ, обосновывать вновь появившиеся признаки и показывать их существенность. Описание поведения кавитационного пузырька было выполнено путем численного интегрированием уравнения Хиклинга-Плессе методом Рунге-Кутта. Наподобие того, как это сделано в работе [15], периодическое изменение давления в жидкости положено в нем соответствующим (2) с производной от функции отображения полосы на диаметральное сечение в области одного отверстия в роторе, одного отверстия в статоре и зазора между ними [20]:

некоторых задачах механики твердого тела теорией функций комплексного переменного [15,19]. Описание возникающего при этом механического напряжения в жидкости или действия силы на площадь поверхности, то есть, иными словами – давления – в какой-либо точке объема жидкости, может быть выполнено на основе конформных отображений. Чтобы их применить нужно на содержащую эту точку плоскую область  $z$  профиля обрабатываемой жидкости в роторном дезинтеграторе с формирующими профилем элементами, отобразить ее конформный инвариант, имеющий равномерное распределение напряжений-деформаций, например, бесконечную полосу  $\zeta$  постоянной ширины (см. Рис. 2, справа) с помощью интегралов Кристоффеля-Шварца [20]. В такой модели потребуется считать, что трение жидкости на элементах конструкции дезинтегратора отсутствует, а при этом реологическое уравнение ее состояния имеет предельный характер, то есть она абсолютно эластична. При вычислениях абсолютных значений характеристик такие условия не совсем корректны, но в случае сравнения сходных

$$z(\zeta, a, \delta) = \frac{\delta}{\pi} \operatorname{Arth} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi}{2} \zeta}{\sqrt{\operatorname{ch}^2 \frac{\pi}{2} \zeta + \frac{a^2}{\delta^2}}} + \frac{a}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{a \operatorname{sh} \frac{\pi}{2} \zeta}{\sqrt{\delta^2 \operatorname{ch}^2 \frac{\pi}{2} \zeta + a^2}}, \quad (3)$$

где в данном случае:  $a$  – ширина отверстия (размер по диаметру);  $\delta$  – величина зазора между статором и ротором;  $\zeta$  – координата на инварианте, выраженная комплексным числом  $\xi + j\eta$ . Ее производная по  $\zeta$  равна:

$$\dot{z}(\zeta, a, \delta) = \sqrt{1 + \frac{a^2}{\delta^2(2 + e^{\pi\xi} + e^{-\pi\xi})}} \quad (4)$$

Величина обратная квадрату  $\dot{z}$  пропорциональна растягивающей деформации жидкости в любой точке сечения, вызывающей изменение давления в ней:

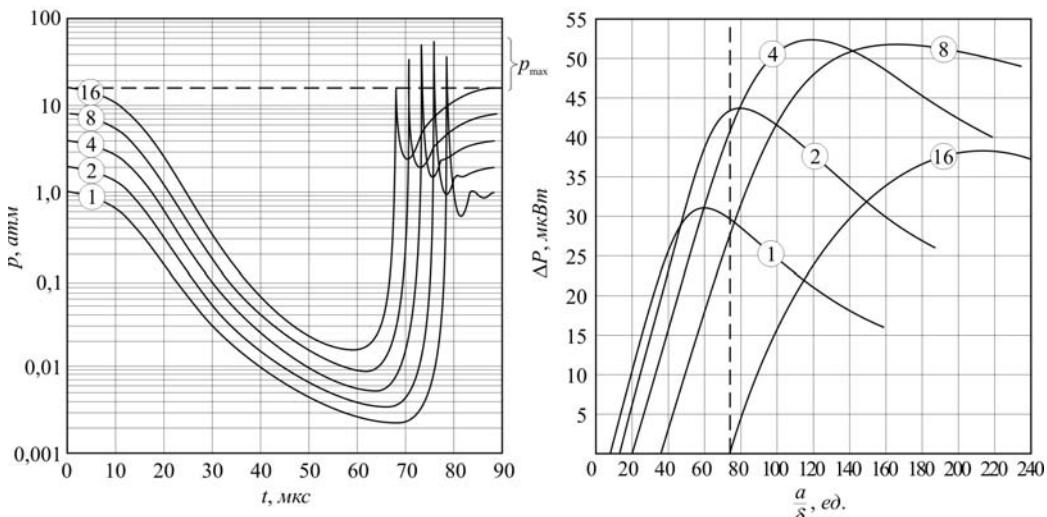
$$p \sim \frac{\delta^2(2 + e^{\pi\xi} + e^{-\pi\xi})}{\delta^2(2 + e^{\pi\xi} + e^{-\pi\xi}) + a^2} \quad (5)$$

Для вычисления изменения давления в точках вещественной оси в течение полного периода координата инварианта должна изменяться в диапазоне  $\pm \xi$ . Время, за которое происходит соответствующее изменение давления, составит  $T = \frac{\xi}{\omega R}$ , где  $R$  – наружный радиус ротора, и составляет минимально допустимый период изменения давления на упругих деформациях жидкости.  $\xi$  находится как корень трансцендентного уравнения  $\dot{z}(\xi, a, \delta) = (1 - \varepsilon)^{-\frac{1}{2}}$ , где  $\varepsilon = 0,05$  – допустимая погрешность в относительных единицах.

Количественно эффективность кавитации можно оценить по приращению эрозионной мощности, характеризующей ее действие [15]. При сравнительной оценке ее можно представить условной величиной  $\Delta P$  – единичной эрозионной мощностью, то есть, дополнительной мощностью, выделяемой при значениях давления на стенке во время коллапса  $p_{\max} > p_0$ , в максимальном за пульсацию его объеме  $V_{\max}$  условно находящимся в каждом отверстии статора и ротора посередине зазора одним кавитационным пузырьком:

$$\Delta P = \frac{\beta}{2} \omega V_{\max} N n (p_{\max} - p_0)^2, \quad (6)$$

где:  $\beta$  – адиабатическая сжимаемость жидкости;  $\omega$  – скорость вращения ротора;  $N$  – число отверстий в роторе;  $n$  – в статоре. Модель была реализована в виде компьютерной программы. В качестве жидкости была выбрана вода со значениями параметров уравнения ее состояния. На основании сведений, изложенных в [6,12] было рассмотрено поведение пузырьков с диаметром покоя 10 мкм. Результаты экспериментов при  $\omega = 50 \text{ c}^{-1}$ ,  $\delta = 0,0001 \text{ м}$ ,  $R = 0,1 \text{ м}$  показаны на рис. 3.



**Рис. 3.** Графики зависимостей давления на поверхности находящегося в зазоре между статором и ротором при одинаковом размере этих отверстий  $a/\delta = 54$  в них кавитационного пузырька от времени и давления  $p_0$  (слева) и единичной эрозионной мощности кавитации в устройстве от размера отверстий на диаметрах статора и ротора, отнесенного к размеру зазора и давления в рабочем объеме 1, 2, 4, 8 и 16 атмосфер (справа)

Опытный образец роторного дезинтегратора показан на рис 4.

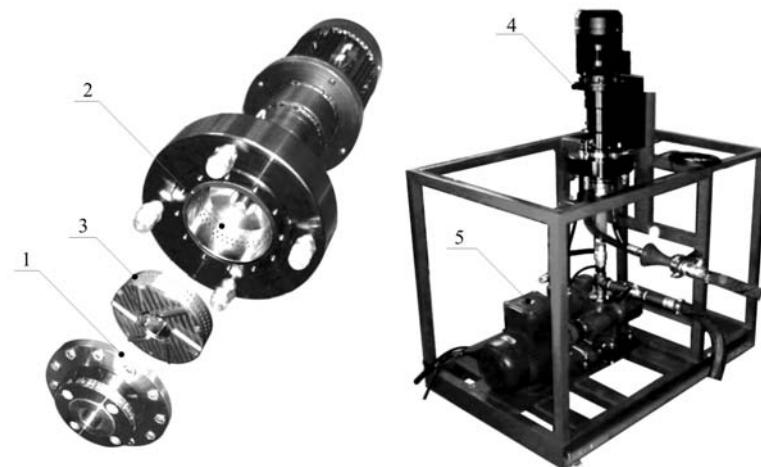
Оба рассмотренных функциональных элемента (кавитационный реактор и роторный дезинтегратор)

в совокупности обеспечивают гидратацию полярных компонентов среды эмульсии выведенной из состояния термодинамического равновесия и лишенной собственной молекулярной структуры водой, повышение за счет этого поверхностной активности структурно-механического слоя эмульсии, увеличение распределенной в виде дисперсной фазы остатальной воды. Разработанная технологическая система может быть весьма эффективно использована в пищевой промышленности, например, в составе линий приготовления такого популярного продукта как майонез или аппаратов для производства восстановленных молочных

напитков, а в энергетике, например, для приготовления мазутно-водных эмульсий, которые могут быть использованы в качестве топлива для паровых и водогрейных котлов. В первом случае увеличится устойчивость эмульсий, может быть снижено содержание жира в майонезах, увеличена бактерицидная устойчивость продуктов, улучшены их органолептические показатели, а также созданы терморезистентные свойства полезных веществ [6]. Во втором создаются предпосылки эксплозивного характера испарения воды и обеспечат ее пиролиз с выделением водорода при более высоких, чем обычно температурах. Он вместе с компонентами мазута образует смешанный горючий газ. Кроме этого при горении выделяется окислитель – связанный в молекулах пероксида водорода атомарный кислород. Все это, в конечном итоге, сделает использование воды не как балластной присадки, улучшающей только экологию горения, а как части топлива, повышающей его теплотворную способность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Акбарзаде К. и др. Асфальтены: проблемы и перспективы // Нефтегазовое обозрение. Лето 2007, С. 28-53
2. Ермаков С.А., Мордвинов А.А. О влиянии асфальтенов на устойчивость водонефтяных эмульсий // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2007, <http://www.ogbus.ru>
3. Рогов И.А., Шестаков С.Д. Надтепловое изменение термодинамического равновесия воды и водных растворов: Заблуждения и реальность // Хранение и переработка сельхозсырья, ч.1, 4, 2004; ч.2, 10, 2004
4. Jinesh K. B., Frenken J. W. M. Experimental evidence for ice formation at room temperature // Physical Review Letters, 101, 2008, 036101
5. WO 2007111524, Biopolymer hydrating method, 2006
6. Шестаков С.Д., Красуля О.Н. Исследования и опыт применения сонохимических технологий в пищевой промышленности // Электронный журнал «Техническая акустика», <http://www.ejta.org>, 2010, 10
7. Сонохимический реактор для обработки воды в процессе приготовления топливно-водной эмульсии: Отчет по ОКР / Российское акустическое общество. Вологодское региональное отделение, № 01201155399, 2011
8. Шестаков С.Д. Многопузырьковая акустическая кавитация: Математическая модель и физическое подобие // Электронный журнал «Техническая акустика», <http://www.ejta.org>, 2010, 14
9. Хинт Й.А. Об основных проблемах механической активации.-Таллин: Изд. ЭНИИТИ и ТЭИ, 1977
10. Хинт Й.А. УДА-технология: проблемы и перспективы.-Таллин: Валгус, 1981
11. Балабышко А.М., Зимин А.И. и Ружицкий В.П. Гидромеханическое диспергирование.- М: Наука, 1998
12. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. – М.: Машиностроение - 1; 2001
13. Шестаков С.Д. Основы технологий кавитационной дезинтеграции.-М: ЕВА-пресс, 2001
14. Статья «Кавитация» // Физический энциклопедический словарь / под ред. А.М. Прохорова.- М: Советская энциклопедия, 1984
15. Шестаков С.Д. Математическая модель гидродинамической кавитации // Труды XVI сессии Росс. акуст. об-ва, Т.2.- М.: ГЕОС, 2005, С. 71-73
16. Кнэпп Р., Дейли Дж. и Хэммит Ф. Кавитация.-М.: Мир, 1974
17. Горелик Г.С. Колебания и волны.-М: ИФ-МЛ, 1959



**Рис. 4.** Фотографии изготовленного образца роторного кавитационного дезинтегратора со снятой уплотняющей крышкой рабочего объема 1 и изъятым из статора 2 ротором 3 (слева) и аппарата для приготовления олеофильных эмульсий, состоящего из роторного дезинтегратора 4 и насоса 5, собранных в рамную конструкцию на виброопорах.

18. Klotz A.R., Hynynen K. Simulations of the Devin and Zudin modified Rayleigh-Plesset equations to model bubble dynamics in a tube // Electronic Journal «Technical Acoustics», <http://www.ejta.org>, 2010, 11.
19. Фукс Б.А., Левин В.И. Функции комплексного переменного и некоторые их приложения.-М, Л: Наука, 1951
20. Лаврик В.И., Савенков В.Н. Справочник по конформным отображениям.- Киев: Наукова думка, 1970

УДК 621.436.038: 621.9.048.6

**И.В.Багров, А.Ю.Дунин, Б.А.Кудряшов, А.Н.Ливанский**

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ**

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Россия, 117036 Москва, Ленинградский пр-т, д. 64.

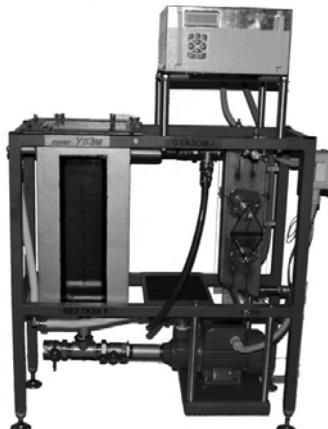
Тел.: (499) 155-0868; E-mail: lefmo@ya.ru

*Одна из актуальных проблем двигателестроения – экологическая, связанная токсичностью отработавших газов. Проблема токсичности выхлопа дизелей усугубляется задачами топливной энергетики. Известны различные пути решения указанных проблем. Один из них – применение наряду с традиционным топливом альтернативных энергоносителей и присадок. В качестве альтернативных топлив в мировой практике рассматриваются спирты, эфиры, растительные масла и их сложные эфиры. В работе приведены результаты исследования изменение вязкости топливных эмульсий на основе дизельного топлива и этанола, различного состава, в зависимости от режима ультразвуковой обработки.*

В лаборатории кафедры Технологии конструкционных материалов МАДИ совместно с проблемной лаборатории транспортных двигателей МАДИ проведен комплекс экспериментов по изучению свойств эмульсий на основе дизельного топлива (ДТ). В качестве образцов для проведения испытаний были выбраны топливные эмульсии с 10-ти, 20-ти и 30% содержанием этанола.

Исследуемые эмульсии были получены при помощи разработанного в МАДИ ультразвукового диспергатора ЛЭФМО-УлЭм (рис.1.). Установка, предназначена для получения эмульсий на основе нефтяных топлив и может применяться в нефтеперерабатывающей отрасли, а также в крупных автохозяйствах, как средство технического обслуживания.

Техническими задачами, на решение которых направлена разработка данной установки, являются упрощение конструкции установки с целью упрощения ее монтажа на транспортное средство и подключения системы к системе подачи топлива; расширение технологических возможностей установки за счет отказа от использования дополнительных механизмов эмульгирования. Для отказа от использования эмульгаторов в установке реализован ряд технических решений. Конструкция камеры, в которой происходит обработка: камера выполнена в виде акустически проницаемого герметичного металлического короба, с присоединенными к нему с двух сторон двумя парами пьезокерамических преобразователей. Для предварительного перемешивания компонентов эмульсии с целью улучшения процесса эмульгирования система подачи выполнена в виде замкнутого контура, имеющего две обратные магистрали. Цикличность обработки с постоянным дополнительным механическим перемешиванием позволяет увеличить характеристики полученной эмульсии, при незначительной потере времени. Основные компоненты установки могут быть смонтированы на транспортном средстве и занимают незначительный объем, также в качестве объема для хранения эмульсии может быть использован топливный бак автомобиля.

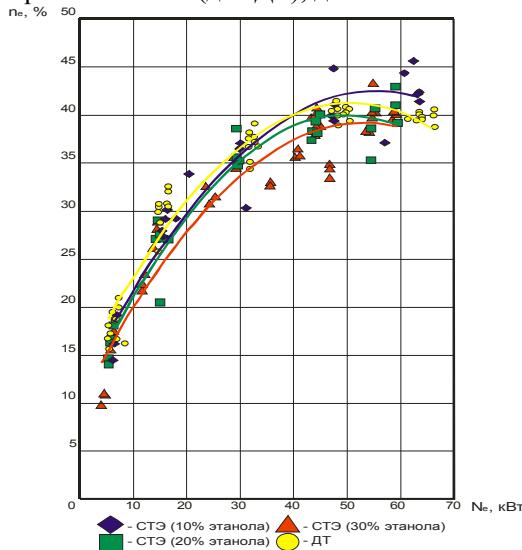


**Рис. 1.** Общий вид установки ЛЭФМО – УлЭм

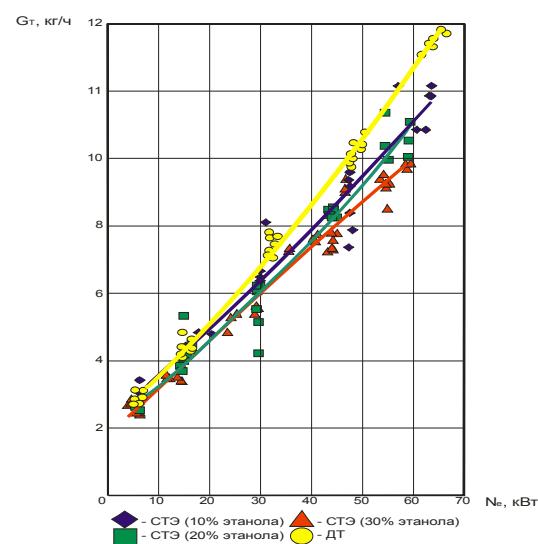
Исследования моторных свойств спирто-топливных эмульсий (СТЭ) проводились на четырехтактном четырехцилиндровом двигателе с газотурбинным наддувом ММЗ-245.10 Минского моторного завода.

Программой исследований предусматривалась оценка экологических показателей (по содержанию в отработавших газах (ОГ):monoоксида углерода CO; углеводородов CH; оксидов азота NOx, также велись замеры дымности) и экономических показателей дизеля (путем замера массового расхода топлива, а также последующего расчета эффективного КПД).

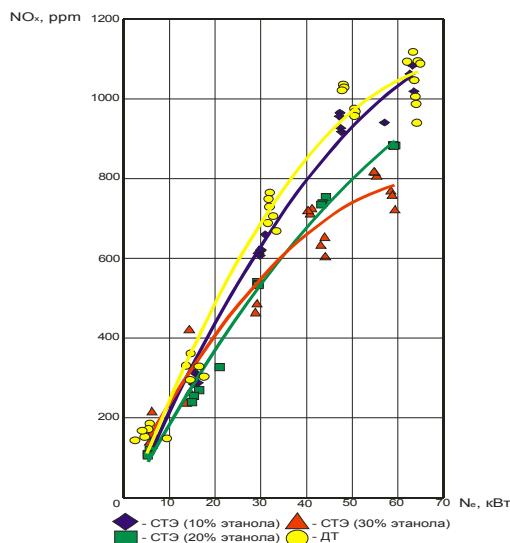
Проведенные экспериментальные исследования топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля ММЗ-245, показали, что для исследованного двигателя наибольшие значения эффективного КПД (рис. 2.) наблюдались при использовании СТЭ с 10% содержанием этанола ( $K_{cm}=10$ ). При малых нагрузках использование эмульсии практически не оказывает влияния на КПД, а при максимальной нагрузке ( $N_e > 60$  кВт), КПД возрастает с 40% (для ДТ), до 43%. Увеличение содержания этанола приводит к падению КПД



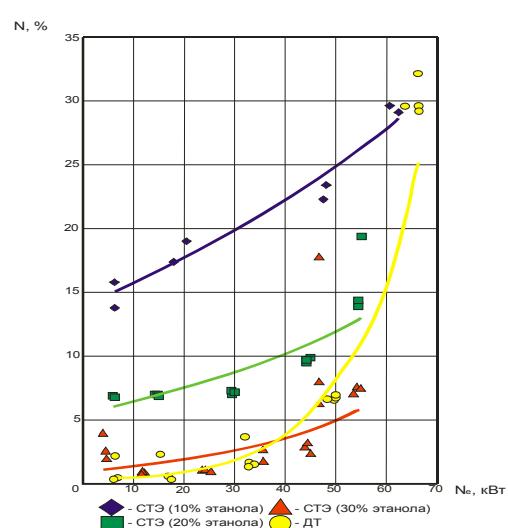
**Рис. 2.** Зависимость эффективного КПД двигателя от нагрузки для эмульсии с разным содержанием этанола.



**Рис. 3.** Зависимость расхода топлива от нагрузки для эмульсии с разным содержанием этанола.



**Рис. 4.** Зависимость содержания NOx в ОГ от нагрузки для эмульсии с разным содержанием этанола.



**Рис. 5.** Содержание сажи в зависимости от нагрузки для эмульсии с разным содержанием этанола.

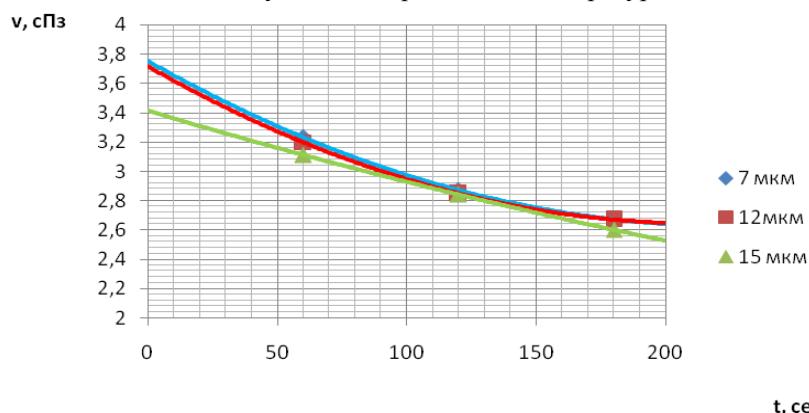
Расход топлива уменьшается по мере увеличения нагрузки, при этом, чем выше  $K_{cm}$  в СТЭ, тем больше экономия ДТ (рис.3). Суммарный расход эмульсии, также ниже, чем расход ДТ.

Присутствие этанола в ДТ оказывает значительное влияние на образование  $NO_x$ (рис.4). Увеличение доли этанола в СТЭ уменьшает содержание  $NO_x$  в ОГ, что, однако, проявляется, только при  $N>20$  кВт Так, при  $N=60$  кВт и  $n=1700$  мин<sup>-1</sup> увеличение  $K_{cm}$  с 10% до 30% уменьшает значение  $NO_x$  на 25%.

Дымность ОГ дизеля также значительно изменяется в зависимости от доли этанола в СТЭ. Увеличение количества этанола уменьшает содержание дыма в ОГ. Для исследованного дизеля при  $n=1700$  мин<sup>-1</sup> и  $N=60$  кВт увеличение  $K_{cm}$  с 20% до 30% приводит к снижению коэффициента отражения света в 2,1 раза.

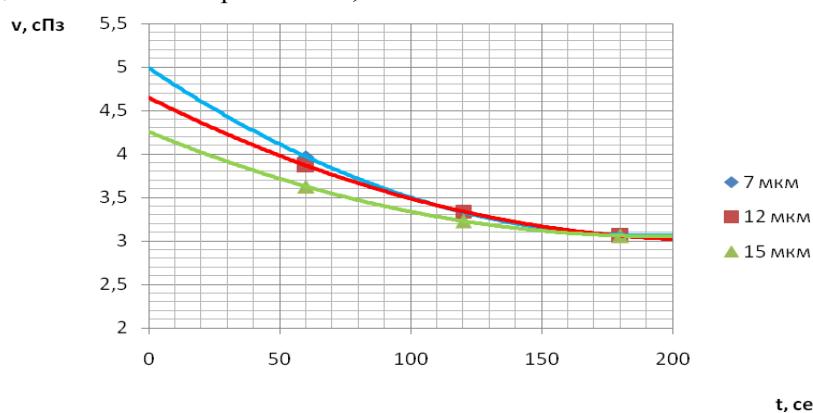
Также следует отметить что, при больших нагрузках доля этанола незначительно влияет на уровень CO в ОГ дизеля. На этих нагрузках уровень выбросов CO составил 0,01...0,02% и практически не зависел от частоты вращения. На малых нагрузках двигателя наблюдалось значимое увеличение уровня выбросов CO. При этом увеличение содержания этанола приводит к увеличению уровня выбросов. Так, при  $n=1700$  мин<sup>-1</sup> и  $N=10$  кВт увеличение  $K_{cm}$  с 10% до 30% приводит к увеличению концентрации CO с 0,04 до 0,08%.

Применение СТЭ увеличивает уровень выбросов CH в отработавших газах дизеля практически на всех режимах его работы. Однако точную количественную оценку данного явления выполнить не представляется возможным из-за используемой измерительной аппаратуры.



**Рис. 6.** Зависимость вязкости топливной эмульсии с 10% содержанием этанола от времени обработки и амплитуды ультразвуковых колебаний

В качестве исследуемого параметра эмульсии была выбрана вязкость как одно из наиболее важных эксплуатационных свойств ДТ. Требования ГОСТ 305-82 «Топливо дизельное. Технические условия» регламентируют кинематическую вязкость при 20 °C для летних сортов в пределах 3,0÷6,0 сст (2,7-6,0 сПз). Вязкость эмульсий определялась на ротационном вискозиметре в соответствии с ГОСТ 1929-87 «Методы определения динамической вязкости на ротационном вискозиметре». Все образцы эмульсии подвергались ультразвуковой обработке при различных режимах: амплитуда колебательных смещений 7, 12 и 15 мкм и продолжительность обработки 60, 120 и 180 сек.

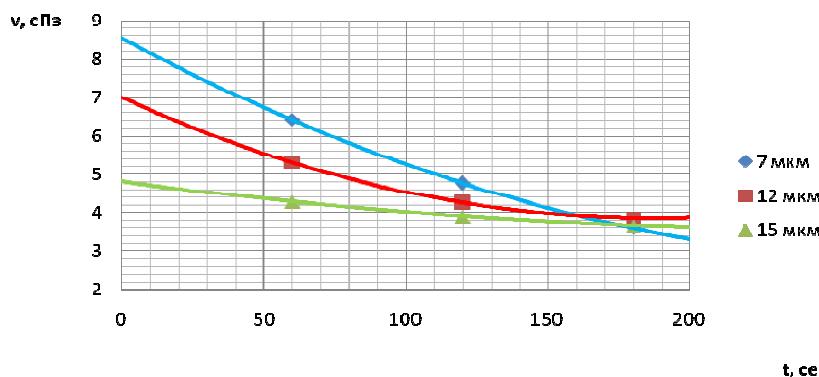


**Рис. 7.** Зависимость вязкости топливной эмульсии с 20% содержанием от времени обработки и амплитуды ультразвуковых колебаний

По результатам экспериментов был построен ряд характеризующих изменение вязкости топливной эмульсии в зависимости от режима обработки (рис. 6-8):

Графики показывают снижение динамической вязкости топливных эмульсий под влиянием ультразвука. В зависимости от режима обработки меняются как числовые значения, так и характер графиков.

Из графиков видно, что ультразвуковое эмульгирование повышает вязкость топливных эмульсий по сравнению с дизельным топливом, предположительно это вызвано значительной степенью дегазации исходного ДТ в процессе озвучивания. Однако этот процесс требует дальнейшего изучения. Также следует отметить, что при увеличении амплитуды колебательных смещений характер изменения вязкости приобретает более пологий характер, при этом по мере увеличения массового содержания этанола в СТЭ скорость изменения вязкости в зависимости от времени ультразвуковой обработки возрастает.



**Рис. 8.** Зависимость вязкости топливной эмульсии с 30% содержанием от времени обработки и амплитуды ультразвуковых колебаний

Совместный анализ графиков также показал, что при содержании  $K_{cm}=30\%$  вязкость СТЭ резко изменяется в зависимости от режима озвучивания. При этом даже при длительном озвучивании (180 сек) вязкость эмульсии (3,8-4,0 сПз) превышает вязкость ДТ (3,25 сПз), уменьшение количества этанола в СТЭ до 20% позволяет получить вязкость близкую к вязкости ДТ. При дальнейшем уменьшении количества этанола вязкость достигает значений ниже вязкости как ДТ так и этанола (2,9 сПз).

С точки зрения эффективности применения на дизелях, наибольшей эффективностью по всем показателям обладают эмульсии с содержанием этанола не более 10%:

- в сравнении с ДТ применение таких эмульсий позволяет улучшить эффективный КПД дизеля;
- применение СТЭ с  $K_{cm}=10\%$  также позволяет уменьшить содержание  $NO_x$  в ОГ. В тоже время в сравнении с ДТ применение данных эмульсий не так значительно увеличивает уровень выбросов.
- СТЭ с долей этанола 10% обладают вязкостью соответствующей требованиям ГОСТ 305-82.

В дальнейшем планируется комплекс экспериментов направленных на исследование зависимости экологических характеристик эмульсии с 10% содержанием этанола от вязкости эмульсии.

УДК 625.861: 625.7.08: 621.9.048.6

**М.В.Морщилов, Р.И.Нигметзянов, Ю.В.Юрьев**

### **ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОРОЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БИТУМА**

ГОУ ВПО Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, д. 64,

Телефон (раб.) (499) 155-0868 Факс (499) 155-8965; Электронная почта [lefmo@ya.ru](mailto:lefmo@ya.ru)

*Работа описываемая в этой статье направлена на разработку технологии изменения физических свойств битумов применяемых в дорожном строительстве методом ультразвуковой обработки, с целью повышения прочности, износостойкости и долговечности битумосодержащих материалов. Рассматриваются механизмы воздействия ультразвука на битум применяемый в дорожном строительстве.*

*Разрабатываемая технология позволит сократить ряд издержек как экономического, так и технологического характера по сравнению с уже существующей технологией. Что в свою очередь может привести к постепенному внедрению данной технологии на всех асфальтобетонных заводах и улучшению качества получаемых дорожных материалов.*

При строительстве и ремонте автомобильных дорог общепризнанным вяжущим материалом является нефтяной битум. При соединении битума и минерального материала вязкость первого должна быть минимальной, так как это приводит к оптимальному расходованию вяжущего материала и улучшению его сцепления с поверхностью минерального материала. Добиться снижения вязкости битума возможно следующими способами:

- нагревом;
- использованием растворителей;
- эмульгированием.

Битумная эмульсия представляет собой двухфазную систему, состоящую из трех основных компонентов: битума, воды и присадок (присадки позволяют надлежащим образом структурировать эмульсию, стабилизировать состояние и изменять ее свойства). Как правило, в эмульсии битум находится в виде отдельных капель диаметром от  $0,1 \times 10^{-6}$  до  $50 \times 10^{-6}$  м. Эти капли не соединяются в следствии действия между ними электростатических сил, создаваемых в системе битум-вода присадками.

Битумные эмульсии применяют в строительстве автомобильных дорог с начала прошлого века, но пока еще не в больших масштабах. Причиной этого является то, что работа с данным материалом сопряжена с определенными нюансами. Основным из них, является технологическое время использования.

Согласно ВСН 115-75 [1] битумные эмульсии в дорожном строительстве могут быть использованы в ходе ниже следующих работ:

- устройства дорожных одежд из эмульсионно-минеральных смесей, приготовленных в установке;
- устройства дорожных одежд из эмульсионно-минеральных смесей способом смешения на дороге;
- устройства конструктивных слоев дорожных одежд способом пропитки;
- устройства слоев износа с шероховатой поверхностью;
- ухода за свежеуложенным цементобетоном и цементогрунтом;
- укрепления откосов насыпей и выемок;
- закрепления песков в верхнем слое земляного полотна;
- закрепления подвижных песков;
- подгрунтовки;
- обессыливания покрытий из неукрепленных материалов;
- ремонта покрытий.

Не смотря на некоторые недостатки в технологии применения битумных эмульсий, эти материалы обладают очень важным преимуществом – дорожные материалы, приготовленные с применением битумных эмульсий более неприхотливы к погодным условиям, и обладают хорошим средством к различного рода наполнителям. Это связано с уровнем кислотности присадок.

Битумные эмульсии могут быть катионными ( $\text{pH} < 7$ ) и анионными ( $\text{pH} > 7$ ). В дорожном строительстве наиболее применимы битумные эмульсии с  $\text{pH} < 7$ . Это обусловлено тем, что битумные эмульсии применяются в основном при ремонтных работах, и наносятся на заполнители обладающие отрицательным зарядом. Это приводит к тому, что для лучшего сцепления с подобного рода наполнителями будут подходить эмульсии с положительно заряженными каплями.

Эмульсия должна быть стабильной при хранении и транспортировке, но при нанесении на минеральный заполнитель или поверхность дорожного покрытия она должна разрушаться с установленной для данного вида работ скоростью. В нашей стране фундаментальные исследования по механизму образования эмульсий проводились академиком П.А. Ребиндером [5] и его школой. В их трудах механизм эмульгирования выглядит следующим образом:

**1 стадия:** растягивание капли жидкости в цилиндр, что сопровождается увеличением поверхности дисперсной фазы и происходит затрата работы для преодоления молекулярных сил поверхностного натяжения;

**2 стадия:** вытянутая капля становится неустойчивой и распадается на более мелкие капли, приобретающие сферическую форму, что сопровождается уменьшением поверхности и свободной поверхностной энергии. Образующиеся при перемешивании цилиндрики жидкости начинают распадаться на капельки только тогда, когда их длина становится больше длины окружности сечения;

**3 стадия:** одновременно протекающие процессы коалесценции при столкновении капель и диспергирования образующихся капель. Чем меньше становятся капельки, тем труднее происходит их вытягивание. Под действием увеличивающегося капиллярного давления более мелкие капли делаются все более жесткими, сопротивляющимися изменению формы. Диспергирование капель происходит не только при растягивании капель, но и при небольшом сжатии.

На сегодняшний день дорожные эмульсии производят с помощью различного рода эмульсионных машин, которые в общем виде можно классифицировать следующим образом [2]:

1. Механические диспергаторы
  - 1.1. Диспергаторы
    - 1.1.1. Роторнолопасные
    - 1.1.2. Плунжерного типа
  - 1.2. Мешалки
    - 1.2.1. Лопастные
    - 1.2.2. Пропеллерные
    - 1.2.3. Турбинные
    - 1.2.4. Шнековые
    - 1.2.5. Шнеколопастные
2. Акустические диспергаторы
  - 2.1. Пьезоэлектрические
  - 2.2. Магнитострикционные
  - 2.3. Гидродинамические

Длительное время на предприятиях использовались в основном механические диспергаторы. Данные машины обладают некоторыми недостатками: быстрым износом рабочих поверхностей, так же данные установки являются энерго- и ресурсоемкими и достаточно дорогостоящими при приобретении и эксплуатации.

В 70-х годах прошлого века для получения битумных дисперсий начали применять гидродинамические установки. Принцип работы данных установок основан на том, что поток жидкости подается под давлением на тонкую стальную пластину. Под напором проходящий жидкости пластина начинает вибрировать, и за счет вибрации пластины происходит диспергирование. Применение гидродинамических диспергаторов не получило широкого распространения в следствие того, что рабочая поверхность пластины очень быстро выходит из строя.

В настоящее время в лаборатории МАДИ проводятся исследования по получению битумных эмульсий с помощью магнитострикционных и пьезокерамических преобразователей. Основным преимуществом подобной обработки является то, что износ оборудования при данном способе получения эмульсий носит естественный характер.

При получении битумных эмульсий с помощью магнитострикционных и пьезокерамических преобразователей диспергирование при воздействии ультразвука происходит вследствие 3х основных причин:

- во-первых, под действием колебательной скорости и колебательного ускорения (модель Ржевкина-Островского);
- во-вторых, под действием ударных волн кавитации (модель Недужего);
- в-третьих, путем растягивания капель фазы сверх критической длины (модель Фридмана).

Известно также, что наибольшие значения скорости и ускорения колебательного смещения достигаются на полуволновом расстоянии от излучающей поверхности, а наибольшие деформации жидкость испытывает на четвертьволновом.

В настоящее время разработано множество способов приготовления эмульсий при помощи ультразвука. Можно выделить 3 основных схемы ультразвукового оборудования в зависимости от способа приготовления эмульсии:

При осуществлении первого способа компоненты эмульсии располагают в емкости для смешивания слоями один над другим, затем возбуждают в них ультразвуковые колебания. Первый способ эмульгирования, в основном использовался в научных исследованиях для изучения закономерностей ультразвукового эмульгирования [3]. Наиболее совершенным примером такого способа является известный способ, в соответствии с которым компоненты располагают в емкости для смешивания таким образом, чтобы толщина слоя каждого из них составляла половину длины волны звука в нем на частоте ультразвуковых колебаний, которыми осуществляют последующее воздействие при эмульгировании. Границу раздела компонентов эмульсии располагают в плоскости пучности колебательного смещения стоячей продольно-упругой акустической волны. Главный недостаток такого способа это то, что из трех перечисленных наиболее значимых механизмов ультразвукового эмульгирования здесь в полной мере используется только один, что не позволяет получить высокую дисперсность эмульсии за короткое время эмульгирования. Кавитационные области в стоячей волне концентрируются в пучностях напряжений, а ударная волна кавитации ослабевает пропорционально расстоянию от центра кавитационных каверн, в

результате участие в процессе эмульгирования 2го и 3го из перечисленных выше механизмов ослаблено. Действуют лишь тогда, когда под воздействием первого из механизмов эмульсия будет заполнять рабочий объем, а границы диффузии капель фазы распространяется на достаточное расстояние от положения первоначальной границы раздела фаз. Кроме того, при таком способе получения эмульсий образуется одновременно два вида эмульсий в различном соотношении объемов, которое зависит от использованного типа эмульгатора. Получаемый продукт после энергичного механического перемешивания может какое-то время существовать в виде бинарной смеси противоположных видов эмульсии, но вскоре распадается на две системы: слой обратной эмульсии над слоем прямой эмульсии.

При втором способе компоненты эмульсии механически смешивают, затем (или одновременно) полученную смесь диспергируют воздействием возбуждаемых в ней ультразвуковых колебаний. Типичным примером реализации второго способа эмульгирования является известный способ изготовления эмульсий, при котором компоненты механически смешивают посредством какого-либо технического средства, например, шестеренчатого насоса. Затем полученную механическую смесь подают на ультразвуковой диспергатор, представляющий собой один из типов ультразвуковых преобразователей, оснащенных приспособлениями для акустического диспергирования. Далее либо запускают эмульсию по циклу между механическим смесителем и диспергатором до получения нужной дисперсности, либо сливают. Известно использование такого способа при производстве эмульсий из растительного жира и воды для улучшения качества теста [4].

Однако использование данного способа связано с теми же проблемами, что при использовании механических диспергаторов.

При третьем способе для получения эмульсий используется энергия потока рабочей жидкости из насоса. Для этой цели в качестве ультразвукового устройства используется гидроакустический излучатель, встроенный в трубопровод сброса, что позволяет получать высокодисперсные эмульсии. Поток рабочей жидкости, пройдя через вихревые камеры гидроакустического излучателя, турбулизируется, и в нем возникают вторичные эффекты (микро- и макропотоки, мощные пульсации давления и акустические колебания), которые эффективно интенсифицируют процессы диспергирования и эмульгирования.

Применение гидроакустических диспергаторов для эмульгирования битума также представляется затруднительным и не получило широкого распространения. Это связано с высокой вязкостью битума, в следствие которой возникновение турбулентных течений происходит при значительно более высоких скоростях, чем у менее вязких жидкостей, что в свою очередь приводит к необходимости использования достаточно мощных и дорогостоящих насосов, а также устройств для разогрева битума, который значительно усложняют конструкцию установки, а также эти элементы подвергаются наибольшему износу и требуют частой замены.

Значительный опыт ультразвукового эмульгирования накоплен в пищевой, фармакологической и косметической отраслях промышленности, в первую очередь для получения эмульсий веществ обладающих высокой вязкостью и высокой степенью дисперсности (кремов, лекарств и пищевых продуктов).

Примером такого оборудования может служить ультразвуковой диспергатор-смеситель, описанный в патенте РФ №205096. Диспергатор содержит источник ультразвука, трансформатор упругих колебаний, выполненный с сообщающимися каналом подвода к рабочему торцу трансформатора упругих колебаний и по меньшей мере двумя каналами для ввода компонентов, отличающийся тем, что в канале подвода к рабочему торцу трансформатора упругих колебаний выполнены по количеству каналов для ввода компонентов сообщающиеся с ними и пересекающиеся винтовые канавки.

Также известно устройство (патент РФ №2172207) для приготовления, эмульсионных лечебных препаратов и косметических средств, а также эмульсионных пищевых продуктов, например, маргарина и эмульсионных компонентов, используемых в процессе производства различных продуктов питания (колбас, шоколада, кремов, соусов). В смесительную емкость заливают масло с предварительно растворенным в нем эмульгатором и закрывают ее крышкой со встроенным электромиксером, выполняющим роль устройства механического перемешивания. Затем включают ультразвуковой генератор и электромиксер. В расходную емкость, расположенную выше смесительной емкости, заливают воду. Вода, вытекая из отверстий в масло, в соответствии с законом сообщающихся сосудов растекается по излучающей поверхности в виде тонкого слоя за счет разницы плотностей и акустического смачивания. Часть воды, смешиваясь на границе раздела сред с маслом и диспергируясь под воздействием акустических течений и энергии кавитации в тонком слое, уносится от излучателя вместе с маслом макропотоком, создаваемым устройством механического перемешивания, в виде готовой эмульсии.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. ВСН 115-75 Технические указания по приготовлению и применению дорожных эмульсий (<http://www.gosthelp.ru/text/VSN11575Tehnicheskieukaza.html>).
2. Соколов Ю.В. Шестаков В.Н. Битумные эмульсии в дорожном строительстве. – ОМСК: ГУИПП «Омский дом печати», 2000 г. – 256 стр.
3. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. - М: ИИЛ, 1956. - 726 с.
4. Ауэрман Л. Я., Федорова Г.С. Применение в хлебопечении эмульсий жира в воде, получаемых ультразвуковым методом // Известия высших учебных заведений. Сер. Пищевая технология. - 1960, N 6. - С. 72-77.
5. Будник В.А., Евдокимова Н.Г., Жирнов Б.С. Битумные эмульсии. Особенности состава и применения. Тематический обзор. Нефтегазовое дело, 2006. <http://www.ogbus.ru.1>

УДК 667.6: 621.9.048.6

**А.И.Аристов, С.К.Сундуков, Д.С.Фатюхин**

**ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА**

Московский Автомобильно-Дорожный Государственный Технический Университет (МАДИ)  
Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, д.64,  
Тел.: (499) 155-0868; E-mail: [lefmo@ya.ru](mailto:lefmo@ya.ru)

*Лакокрасочные материалы (ЛКМ) - это многокомпонентные составы (жидкие, пастообразные или порошкообразные), которые при нанесении тонким слоем на твердую подложку высыхают с образованием лакокрасочного покрытия (ЛКП). Технология нанесения ЛКМ включает в себя подготовку ЛКМ перед использованием, подготовку окрашиваемой поверхности и нанесение ЛКМ на поверхность. Каждый этап технологии имеет факторы, негативно сказывающиеся на свойствах ЛКМ и ЛКП: степени перетира, адгезии, вязкости, времени и степени высыхания, водо- и атмосферостойкости, декоративных свойствах. В результате увеличивается расход ЛКМ и стоимость оборудования. Внедрение ультразвуковых технологий на всех этапах покраски положительно сказывается на свойствах ЛКМ перед нанесением, качество подготовки поверхности и эффективности распыления.*

Лакокрасочные материалы (ЛКМ) - это многокомпонентные составы, которые при нанесении тонким слоем на поверхность высыхают и образуют лакокрасочное покрытие (ЛКП) с заданными свойствами.

Все лакокрасочные материалы являются дисперсными системами (сuspensionами, эмульсиями) и состоят из пленкообразующего вещества, пигментов, наполнителей, растворителей, аддитивов.

По составу и назначению ЛКМ подразделяют на лаки, грунтовки, шпатлевки, краски (в том числе эмали).

Технологический процесс покраски включает в себя подготовку ЛКМ перед нанесением, подготовку поверхности перед окрашиванием и нанесение ЛКМ на поверхность. Качество получаемого ЛКП зависит от технологии выполнения каждого из этих этапов.

Данная работа посвящена проблемам (недостаткам), возникающим на каждом этапе покраски, и возможностям модернизации технологии путем использования ультразвука.

Подготовленный ЛКМ должен быть полностью однородным, т.е. иметь одинаковую консистенцию по всему объему без осадка на дне, и доведен до рабочей вязкости, чтобы его было удобно наносить на поверхность.



**Рис. 1.** Ультразвуковая установка: 1-магнитострикционный преобразователь, 2-волновод-ноцентратор, 3-излучатель, 4-емкость с ЛКМ

Это достигается путем добавления растворителя и последующего механического перемешивания. Применение растворителя ведет к таким негативным последствиям, как необходимость производить покраску в несколько слоев, повышение вероятности возникновения ряда дефектов (рябь, шагрень, «всплытие растворителя», подтеки, опыл и дефектов, связанных с загрязнением предыдущих слоёв перед

нанесением последующих), снижение производственной и экологической безопасности, ухудшение укрывистости (способности ЛКМ делать невидимым цвет или цветовые различия окрашиваемой поверхности).

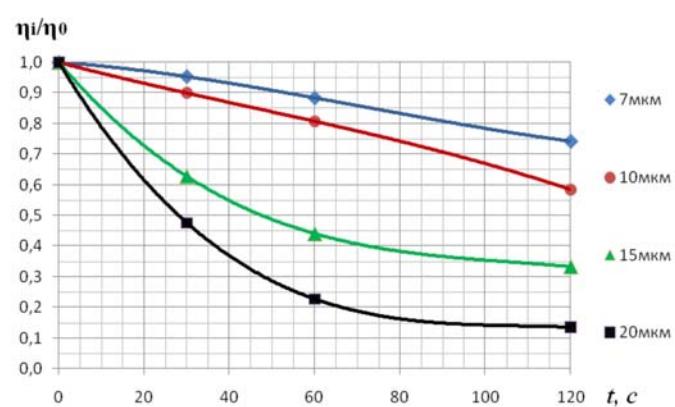
В лаборатории электрофизических методов обработки Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) в рамках работ по совершенствованию технологии получения ЛКП проводились эксперименты по влиянию ультразвука на ЛКМ в процессе его подготовки. Экспериментальная установка показана на рис. 1.

В образцы автоэмали МЛ-1110, состоящей из пигментов, алкидных и меламиноформальдегидных смол, растворителей и специальных добавок, по 50 мл вводился излучатель ультразвуковых колебаний. Озвучивание проводилось на низкоамплитудном, промежуточном и высокоамплитудном режимах.

После обработки на ротационном вискозиметре Fungilab EXPERT L (рис. 2) замерялась вязкость образцов  $\eta$ .



**Рис. 2.** Ротационный вискозиметр Fungilab EXPERT L



**Рис. 3.** Зависимость относительной вязкости эмали МЛ-1110 от времени и режима ультразвуковой обработки

Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

Графики на рис. 3. показывают снижение относительной вязкости ЛКМ под влиянием ультразвука. В зависимости от режима обработки меняются как числовые значения, так и характер графиков. При амплитуде колебательных смещений 7 мкм вязкость снижается на 25%, при 20 мкм на 80%. Также при амплитудах 7 и 10 мкм происходит плавное снижение вязкости в течении всего цикла обработки, а при амплитудах 15 и 20 мкм происходит резкое снижение в первую минуту озвучивания и в дальнейшем меняется незначительно.

При введении в ЛКМ ультразвуковых колебаний возникают эффекты механической природы: кавитация, переменное звуковое давление, радиационное давление, акустические потоки. Эти первичные эффекты вызывают ряд вторичных: нагрев, диспергирование, коагуляцию, окисление, ускорение химических реакций и др [1].

Очевидно, что значительное влияние на снижение вязкости при ультразвуковой обработке оказывает эффект нагрева. Для оценки влияния ультразвуковых эффектов без нагрева проводился замер вязкости эмали при последовательном нагреве без использования ультразвука. Анализ полученных данных показал, что влияние нагрева на снижение вязкости составляет 25-60%, а влияние остальных ультразвуковых эффектов 40-75% в зависимости от режима.

Также после озвучивания происходил осмотр образцов, который показал, что эмаль однородна и не имеет осадков на дне.

Таким образом, применение ультразвука в процессе подготовки ЛКМ приводит к снижению вязкости, что позволяет снизить расход растворителя и тем самым минимизировать негативные явления, связанные с его применением. Параллельно осуществляется нагрев и перемешивание, что позволяет проводить весь процесс подготовки ЛКМ на одной установке.

Этап подготовки поверхности перед покраской заключается в очистке от продуктов коррозии, старой краски, пыли, жировых и других загрязнений. Способы подготовки поверхности подразделяются на две основные группы: механические и химические.

К механическим способам очистки относятся: очистка с помощью инструмента (щетки, шлифовальные машинки), очистка при помощи песка, дроби, смеси песка и воды. Применяя эти способы можно получить хорошо очищенную поверхность с равномерной шероховатостью, которая способствует наилучшей адгезии лакокрасочной пленки.

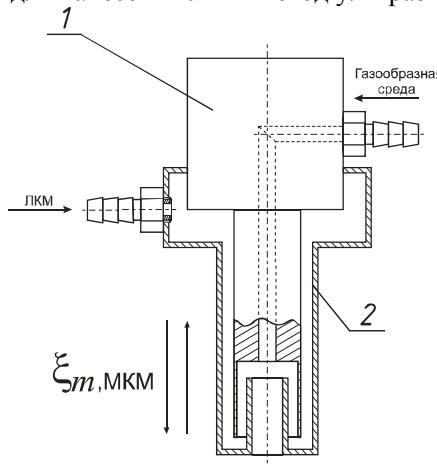
К химическим способам очистки прежде всего относится обезжикирование поверхности, которое

производится с помощью щелочных моющих составов или с помощью активных растворителей (смывок) в зависимости от типа загрязнения.

Также для очистки поверхности можно применять ультразвуковые технологии. Ультразвуковая очистка является одним из наиболее изученных методов применения ультразвука. Имеются данные и рекомендации по очистке большой номенклатуры деталей от различных видов загрязнений. Используя накопленные знания можно подобрать оптимальный метод очистки для любого конкретного случая.

В настоящее время нанесение ЛКМ на поверхность осуществляется методами распыления: пневматическим, безвоздушным, электростатическим и комбинированным. Несмотря на достоинства эти методы имеют и существенные недостатки: большой расход ЛКМ, ограниченность применения, высокая стоимость оборудования, требование подачи ЛКМ (или воздуха) под большим давлением.

Предлагается использовать для нанесения ЛКМ метод ультразвукового распыления (рис.4) [2].



*Рис.4. Система ультразвукового распыления: 1-концентратор, 2-стакан для подачи ЛКМ*

ЛКМ под небольшим давлением подается в стакан 2 из которого попадает на торец ультразвукового излучателя 1, под действием колебаний которого ЛКМ дробиться на мелкие капли. Распыление происходит в кавитационном режиме.

По сравнению с другими методами получения аэрозолей в промышленных технологических процессах ультразвуковой обладает рядом преимуществ: однородность факела распыла, возможность распыления жидкостей с высокой вязкостью, не требуется подача жидкости под большим давлением, возможность настройки рабочего инструмента на различные частоты и мощности, что позволяет выбрать оптимальный режим распыления в зависимости от требуемых параметров, относительно низкая энергоемкость.

Использование ультразвукового распыления позволяет повысить адгезию, сократить расход и время высыхания, сделать покрытие более тонким и ровным.

Таким образом, ультразвук оказывает положительное воздействие на каждый этап технологии получения ЛКП., и его применение целесообразно для модернизации существующих технологических процессов.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Приходько В.М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте автотракторной техники. // М.: Издательство «Техполиграфцентр», 2003. – 253 с.
2. Аристов А.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Совершенствование технологии нанесения лакокрасочных покрытий путем использования ультразвука // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 11-го Международного научно-технического семинара, 21-25 февраля 2001г., г. Свалява. – Киев : ATM Украины, 2011. – 12-14 с.

УДК 621.9.048.6

**В.Д.Александров, В.М.Приходько, Е.Г.Юдаков**

#### **ОСОБЕННОСТИ УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКЕ**

Московский Автомобильно-Дорожный Государственный Технический Университет (МАДИ)  
Россия, 125319 Москва, Ленинградский пр-т, д.64  
Тел.: (499) 755-0868; E-mail: student810@gmail.com

*Рассматривается удаление загрязнений с поверхности на примере ультразвуковой очистки крупногабаритных деталей. Представлены особенности затраты энергии на удаление загрязнений с поверхности. Работа по очистке складывается из работы совершающей очищающей средой за счет своей физико-химической активности, работы связанной с механическим*

*воздействием среды на разрушение загрязнения и его связи с поверхностью и работы совершающейся с моющим раствором при его замене. Оцениваются способы удаления эксплуатационных загрязнений, исходя из их способности противостоять воздействию микроударных нагрузок схлопывающихся кавитационных пузырьков, прочности связи с очищаемой поверхностью, характеру химического взаимодействия с моющей жидкостью. Рассмотрены энергетические характеристики процесса ультразвуковой очистки, перспективы развития ультразвукового оборудования.*

При эксплуатации автотранспортной техники, внешние и внутренние поверхности узлов и агрегатов покрываются нежелательными веществами - загрязнениями. Зачастую эти загрязнения делают затруднительным или невозможным сохранение требуемых функций в заданных условиях эксплуатации, снижается надежность и эффективность использования узлов и агрегатов, ухудшают эстетические показатели, препятствуют проведению технического обслуживания и ремонта.

Осаждение различных загрязнений на детали двигателя внутреннего сгорания не одинаково и зависит зачастую от специфики выполняемых функций, а так же от площади поверхности детали. Зависимость между степенью загрязнения поверхности и ее площадью носит прямо пропорциональный характер.

Большая площадь поверхности крупногабаритных корпусных деталей ДВС, таких как блоки цилиндров (БЦ), головки блоков цилиндров (ГБЦ), и различные виды загрязнений, характерные каждой отдельной поверхности детали вызывают определенные сложности при очистке.

На внешних поверхностях основными видами загрязнений являются дорожно-почвенные, масляно-грязевые отложения. Причиной возникновения этих видов загрязнений являются условия эксплуатации дорожной техники, а также герметичность трубопроводов подачи топлива и рабочих жидкостей. На внутренних поверхностях детали, к примеру, ГБЦ, основными видами загрязнений являются асфальтоэмалистые загрязнения, нагары, лаки. Их возникновение обусловлено условиями работы детали, а именно высокими температурами в камере сгорания. Эти виды загрязнений имеют хорошую адгезию к очищаемой поверхности, в частности, откладываются в каналах и труднодоступных областях, доступ к которым затруднен. Для эффективной очистки необходим способ, позволяющий без особых усилий удалять загрязнения с любых поверхностей корпусных деталей, включая каналы и скрытые полости. Для этих целей хорошо подходят способы ультразвуковой очистки.

Для ультразвуковой очистки подбор аппаратуры и моющих сред зависит, прежде всего, от вида загрязнений. В связи с тем, что при озвучивании жидкости под действием кавитации происходит механическое разрушение пленки загрязнений и одновременно ускоряется процесс химического взаимодействия моющей жидкости с загрязнением под воздействием акустических течений, целесообразно все загрязнения разделить по трем основным признакам [1]:

- 1) способности противостоять воздействию микроударных нагрузок;
- 2) прочности связи с очищаемой поверхностью;
- 3) характеру химического взаимодействия с моющей жидкостью.

По первому признаку загрязнения подразделяются на кавитационно-стойкие и кавитационно-不稳定ные, по второму — на загрязнения с высокой и низкой адгезией к очищаемой поверхности, по третьему — на химически взаимодействующие и невзаимодействующие с моющей жидкостью.

Следует отметить, что классификация загрязнений по характеру взаимодействия с моющей жидкостью достаточно условна, так как всегда можно подобрать такой химический состав жидкости, с которым загрязнение будет вступать в химическую реакцию. Поэтому под средой, химически взаимодействующей с загрязнением, следует понимать жидкость, которая, удаляя загрязнение с поверхности, не вступает в химическую реакцию с материалом очищаемой детали, а если такое взаимодействие и наблюдается, то оно должно протекать гораздо медленнее, чем процесс удаления пленки загрязнений, и не вызывать повреждение детали и изменение физико-механических свойств материала.

Любой процесс очистки можно характеризовать работой, которая необходима для удаления загрязнений с очищаемой детали и дезактивация моющего раствора, с целью или регенерации, или исключения экологического вреда. Непосредственно, очистка связана с затратой энергии на разрушение загрязнений (преодоление прочностных, когезионных сил) и на удаление загрязнений с поверхности (преодоление удерживающих, адгезионных сил). В общем работа по очистке  $A_o$  складывается из работы  $A_{\phi x}$ , совершающей очищающей средой за счет своей физико-химической активности, работы  $A_m$ , связанной с механическим воздействием среды на разрушение загрязнения и его связи с поверхностью и работы  $A_{dez}$ , совершающей с моющим раствором при его замене [2].

$$\dot{A}_f = \dot{A}_{\phi i} + \dot{A}_i + \dot{A}_{adz} \quad (1)$$

Чем физико-химически активнее очищающая среда (т. е. больше  $A_{\phi x}$ ), тем потребуется меньше механической энергии, и наоборот, чем меньше  $A_{\phi x}$ , тем больше  $A_m$  необходимо затратить для достижения одинакового эффекта очистки. Но стоит обращать внимание на то, что зачастую, чем активнее физико-химически очищающая среда, тем она сильнее оказывает негативное влияние на окружающую среду, и для ее нейтрализации необходимо затратить определенную работу  $A_{dez}$ . Выбор пути интенсификации процесса очистки за счет  $A_{\phi x}$  или  $A_m$  решается на основании технологических и экономических соображений. При этом необходимо учитывать следующее. Работа  $A_{\phi x}$  зависит от моюще-очищающей активности среды – вида среды ее концентрация и температура. Работа  $A_m$  зависит от механической интенсификации процесса очистки. Работа  $A_{dez}$  зависит от опасности для окружающей среды и сложности нейтрализации моющего раствора.

При ультразвуковой очистке фактором интенсификации процесса удаления загрязнений являются колебания высокой частоты, которые приводят к возникновению различных эффектов, способствующих удалению загрязнений. Для эффективного удаления загрязнений с поверхностей корпусных деталей целесообразно сочетать работы  $A_{\phi x}$  и  $A_m$ . К очищающей среде предъявляются повышенные требования по экологичности и безопасности. Применение токсичных, легковоспламеняющихся, взрывоопасных растворителей увеличивают риск возникновения чрезвычайных ситуаций на производстве. Учитывая это в качестве очищающей среды выгодно использовать водный раствор тринатрийфосфата. Этот моющий раствор не требует специальных способов утилизации, за исключением обычной фильтрации. Фильтрация необходима для удаления частиц загрязнения из раствора. В результате чего,  $A_{dez}$  будет минимальна.

Величина работы  $A_m$  при ультразвуковой очистке анализировалась с точки зрения энергетических характеристик. Оценивалась эффективная амплитуда колебаний излучателя  $\xi$ , эффективная площадь излучения  $S_{uzl}$ , излучаемая акустическая мощность  $N_{uzl}$ , удельная мощность  $N_{y0}$ , вводимая в озвучиваемую среду, и мощность  $N_{nomp}$ , потребляемая генератором ультразвуковых колебаний и необходимая для получения на площади  $S_{uzl}$  амплитуды колебаний  $\xi$ . Использование при анализе мощности, а не работы, вызвано тем, что ультразвуковое оборудование характеризуется мощностью, а соотношение работы и мощности происходит при помощи времени.

Основным параметром, оказывающим влияние на энергоемкость и эффективность процесса очистки является амплитуда колебаний излучателя  $\xi$ . По амплитуде оценивалась изменением площади разрушенной части тест-объекта – алюминиевой фольги в следствии эрозии. Возникающая эрозия на алюминиевой фольге является одним из самых простых способов определить эффективность удаления загрязнений с поверхности детали за счет возникновения кавитации в зоне ультразвукового воздействия (рис. 1) [3].

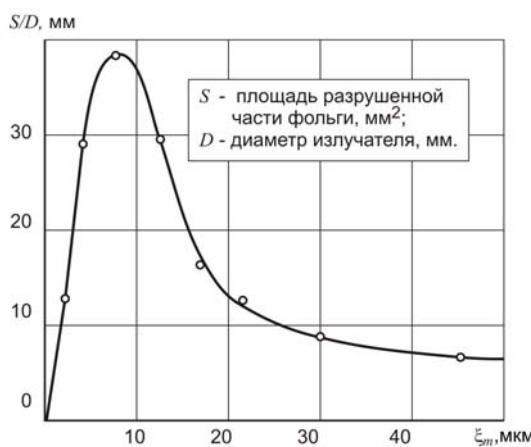


Рис. 1. Эрозионное разрушение фольги в зависимости от амплитуды смещения  $\xi$

Акустической характеристикой процессов ультразвуковой очистки и разборки, определяющей их энергетику, является интенсивность излучения:

$$I = \rho c \omega^2 / 2 , \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность обрабатываемой среды;

$c$  - скорость распространения ультразвука в среде;

$\omega$  - круговая частота колебаний,  $\omega = 2\pi f$ .

Однако, введение в жидкость ультразвуковых колебаний значительной мощности сопровождается возникновением ряда нелинейных эффектов, изменяющих акустическое сопротивление среды (нагрузки) -  $Z_n$ , определяемое как  $\rho c$ . Имея в виду, что при больших амплитудах колебаний  $\xi$  в жидкости сопротивление

нагрузки падает пропорционально величине колебательной скорости, т.е.  $Z_u \sim 1/(\xi\omega)$ , вводимая в жидкость удельная акустическая мощность теоретически может быть вычислена по формуле:

$$N_{y\vartheta} = Z_u(\xi\omega)^2/2, \text{ Вт/см}^2. \quad (3)$$

В силу нелинейности происходящих процессов реальную зависимость  $N_{y\vartheta}$  от  $\xi$  для высокоамплитудного озвучивания удается установить лишь экспериментальным путем:

$\xi$  - измеряется электродинамическим датчиком, откалиброванным с помощью бесконтактного виброметра;

$N_{nomp}$  - определяется с помощью высокочастотного ваттметра;

$N_{uzl}$  и  $N_{y\vartheta}$ , связанные соотношением

$$N_{y\vartheta} = N_{uzl}/S_{uzl}, \text{ Вт/см}^2, \quad (4)$$

оцениваются калориметрическим методом.

Важной энергетической характеристикой является электроакустический коэффициент полезного действия  $\eta_{ea}$ , определяемый как отношение мощности  $N_{uzl}$ , излучаемой в жидкость, к потребляемой мощности  $N_{nomp}$ .

$$\eta_{ea} = N_{uzl}/N_{nomp}. \quad (5)$$

С учетом всех вышеперечисленных соотношений размеры эффективной излучающей площади определяются соотношением

$$S_{uzl} = \eta_{ea} N_{uzl}/N_{nomp}. \quad (6)$$

В результате математической обработки результатов экспериментов по методу наименьших квадратов были получены следующие эмпирические зависимости для расчета энергетического баланса при работе ультразвуковой высокоамплитудной колебательной системы УКС-1,5, производство ЛЭФМО каф. ТКМ МАДИ в жидкости:

$$N_{y\vartheta} = 0,77 \xi + 3,57; \quad (7)$$

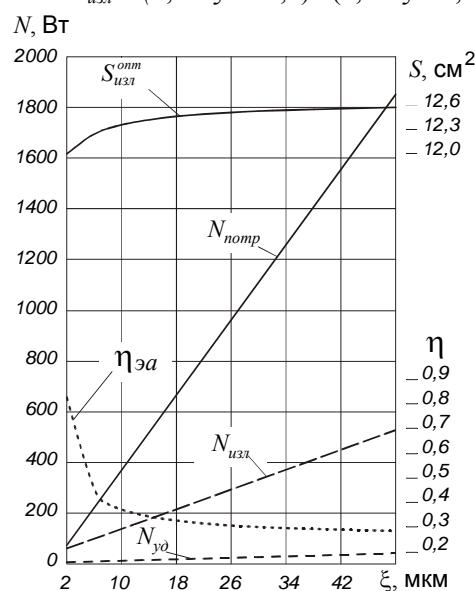
$$N_{uzl} = 9,75 \xi + 41,8; \quad (8)$$

$$N_{nomp} = 37,06 \xi + 0,0794; \quad (9)$$

$$\eta_{ea} = (9,75 \xi + 41,8) / (37,06 \xi + 0,0794); \quad (10)$$

Для определения эффективной площади излучения при известном из предварительных экспериментов оптимальном значении амплитуды колебательных смещений получено следующее выражение, графически представленное на рис. 2<sup>2</sup>

$$S_{uzl} = (9,75 \xi + 41,8) / (0,77 \xi + 3,57). \quad (11)$$



*Рис. 2. Энергетические характеристики ультразвуковой высокоамплитудной колебательной системы, применяемой для очистки.*

Из графиков, представленных на рис. 1 и рис. 2 можно сделать вывод, о том что наиболее эффективно при очистке использовать амплитуду 5-10 мкм. Во-первых, при таких значениях амплитуд колебаний наблюдается наибольшая кавитация, что способствует более интенсивному удалению загрязнений с поверхности очищаемой детали. Во-вторых, при этих значениях амплитуд наблюдается оптимальное значение электроакустического коэффициента полезного действия  $\eta_{ea}$ , что означает минимальные рассеивание мощности. В-третьих, диапазон потребляемой мощности  $N_{nomp}$  является минимальной, из чего следует и минимальное потребление энергии, а значит и минимальные энергетические затраты.

Современное оборудование ультразвуковой очистки в настоящее время специализируется на удалении эксплуатационных загрязнений на деталях топливной аппаратуры, таких как форсунки, карбюраторы, то есть деталей, имеющих небольшие габаритные размеры. В настоящее время применение ультразвуковой очистки и разработка оборудования по очистке ультразвуком крупногабаритных и корпусных деталей является перспективным. Поэтому хотелось бы более подробно остановиться на проектировании оборудования для очистки корпусных деталей двигателя внутреннего сгорания, на примере блоков цилиндров, головок блоков цилиндров и др.

Одним из немало важных аспектов применения ультразвука при очистке корпусных деталей является экономический аспект. Ультразвуковая очистка энергоемкий процесс, как описывалось выше, за счет применения ультразвуковых генераторов, ультразвуковых излучателей. Поэтому создание больших по объему ванн с большим количеством излучателей ультразвука для очистки корпусных деталей на сегодняшний день не целесообразно. Требуется создать такую компоновку оборудования, которая бы свела количество используемых преобразователей до одного с возможностью его перемещения.

Одним из недостатков ультразвуковой очистки является сложность поддержания режима обработки. На ряду с этим детали, применяемые в современной технике, имеют сложную конфигурацию и различные требования к чистоте поверхности. Без применения автоматизированных систем контроля (мониторинга) и управления рабочими органами очистного ультразвукового оборудования не представляется возможным.

Развитие современной автоматизации и повсеместное появление на производстве станков с числовым программным управлением (ЧПУ) создает новую, перспективную область использования ультразвуковой очистки. Появляется потребность в разработке нового ультразвукового очистного оборудования, которое имело бы возможность программного управления через персональный компьютер или стенд оператора – установка ультразвуковой очистки с ЧПУ.

Задание преобразователю последовательности перемещения является одной из основных трудностей проектируемого оборудования. В связи с тем, что поверхность очищаемой корпусной или крупногабаритной детали не является плоской, то необходимо каким-либо образом регулировать расстояние между излучателем и поверхностью детали. Это необходимо, во-первых, для сохранения эффективного зазора излучатель – деталь, во-вторых, для исключения возможности заклинивания излучателя о выступ на поверхности очищаемой детали.

Создание установки ультразвуковой очистки с элементами перемещения, управление которыми осуществлялось бы программой, а так же со следящими устройствами в виде датчиков позволит интенсифицировать процесс очистки крупногабаритных корпусных деталей. Это предполагается достичь за счет более эффективного применения ультразвукового оборудования, что приведет к уменьшению энергозатрат путем уменьшения количества преобразователей, за счет создания единой базы данных очищаемых деталей и технологических процессов их очистки, за счет поддержания необходимых параметров ультразвуковой очистки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Под ред. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука том 3. Физические основы ультразвуковой технологии. // М.: Наука, 1970. – С.169 – 179,
2. Козлов Ю.С. Очистка автомобилей при ремонте // М.: Транспорт, 1981. – С.15 – 19
3. Приходько В.М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте транспортной техники // М: Техполиграфцентр, 2003. – С.120-128.

УДК 534-14

**В.Д. Гончаров, А.А. Новик**  
**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЛЬТРАЗВУКА**  
**ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ КЕРАМИКИ**

Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»  
Россия, 197376, г. С-Петербург, улица профессора Попова, д.5  
Тел.: +7 (812) 329-4961, факс +7 (812) 329-4962  
E-mail: alexsei-newman@yandex.ru

Доклад посвящен применению технологического ультразвука при диспергировании керамических материалов. Рассматриваются различные жидкие среды, в которых проводилась ультразвуковая обработка. Проведены исследования по влиянию времени диспергирования на конечный результат. Представлены результаты исследования полученных структур после ультразвуковой обработки.

Свойства керамических материалов определяются в первую очередь линейным размером частиц, из которых они производятся. Чем меньше частицы тем лучше многие физические свойства керамики, легче

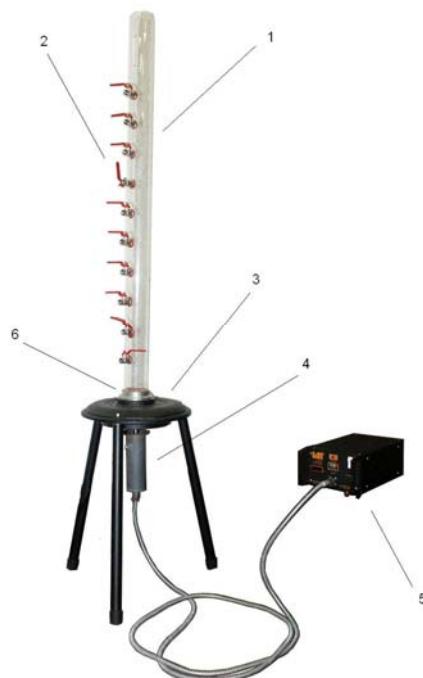
и менее затратно её производство. Этим объясняется интерес к разработке методов получения ультрадисперсных материалов, используемых для получения керамики.

В настоящее время известно несколько способов получения ультрадисперсных материалов. Все применяемые методы можно разделить на два типа: диспергационные и конденсационные. В диспергационных методах макрообразец измельчается до наноразмеров. В конденсационных методах к процессу подходят с другой стороны и выращивают необходимых размеров частицы из отдельных атомов.

Одним из наиболее эффективных физических методов получения ультрадисперсных частиц различных материалов является ультразвуковое диспергирование. Следует учитывать тот факт, что полученные физическими методами ультрадисперсные частицы начинают интенсивно образовывать агломерации под действием сил Ван-дер-Вальса после выключения ультразвука.

На текущий момент в мире множество лабораторий и фирм ведут исследования по диспергированию различных материалов под воздействием ультразвуковых колебаний, происходящих в жидкой среде. Одной из этих фирм является Hielscher Ultrasonics GmbH, на сайте которой представлена статья об ультразвуковом диспергировании кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) [1]. В этой работе приведены результаты сравнения различных методов измельчения и показано, что наиболее эффективным из них является ультразвуковое диспергирование. При проведении исследований для ультразвукового диспергирования использовалась установка с пьезокерамическим преобразователем, мощностью 1000Вт и рабочей частотой 20кГц (изменение этого параметра в диапазоне от 20кГц до 30кГц не влияло на получаемый результат). В процессе диспергирования авторам работы удалось получить частицы с линейным размером 200 нм, однако представленные на рисунках результаты свидетельствуют, что эти частицы собираются в агломераты, при этом свойства получаемых из данных частиц материалов существенно ухудшаются (агломерированная частица выступает как отдельный «кирпичик», из которого собирается материал и размеры большинства из этих «кирпичиков» значительно больше, чем 1 мкм).

К положительным результатам применения ультразвукового диспергирования пришли в лаборатории специальных функциональных материалов, Хенанский университет, КНР.[2] В рамках проводимых исследований авторы получили ультрадисперсный сульфид индия( $\text{In}_2\text{S}_3$ ) с помощью ультразвукового диспергирования. Используется установка мощностью 1.6кВт, рабочая частота 25кГц. Представленные на рисунках образцы свидетельствуют о высокой эффективности ультразвуковой обработки. Однако полученные частицы  $\text{In}_2\text{S}_3$  также образовывают агломераты достаточно больших размеров.



*Рис. 1. Зависимость Используемый ультразвуковой диспергатор. 1) Камера диспергатора 2) Сливные краны 3) Станина 4) Магнитострикционный преобразователь 5) Ультразвуковой генератор 6) Волновод-излучатель*

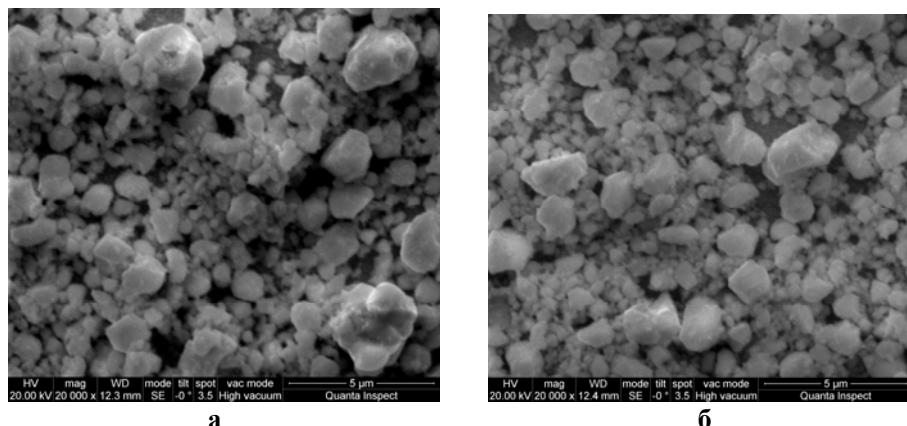
В работе [3] лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института приведены результаты применения ультразвукового диспергирования керамических материалов, и, в частности, сегнетоэлектриков. Полученные результаты позволяют утверждать, что диспергирование сегнетоэлектриков снижает давление прессования, температуру спекания и повышает однородность структуры материалов. Однако в статье не приводятся данные о получаемых размерах отдельных частиц, а описание экспериментов свидетельствует, что получаемые частицы, в процессе осаждения были агломерированы.

Таким образом, проведённый обзор литературы свидетельствует, что диспергирование порошковых материалов возможно эффективно проводить при мощности УЗ установки в 0.5-1.5 кВт, на частоте 20-30 кГц. Однако авторам всех упомянутых выше работ не удалось решить проблему агломерации получаемых частиц.

Нами были проведены эксперименты по диспергированию различных типов керамических веществ. В качестве источника ультразвука использовался генератор ИЛ10-0.63 производства ООО «Ультразвуковая техника - ИНЛАБ». Выходная мощность 630Вт, рабочая частота 22кГц. Внешний вид используемой для экспериментов установки представлен на рис. 1. Сливные краны были сделаны для проведения экспериментов по отстаиванию полученных частиц в воде, забор супензий производился на разной высоте столба жидкости.

Цель эксперимента: получение ультрадисперсных частиц устойчивого размера, до 200нм. Полученные частицы также не должны образовывать агломерации под действием сил Ван-дер-Вальса.

Диспергированию подвергался цирконат титанат свинца в воде и этиловом спирте. При обработке частиц в воде использовалась камера со сливными кранами. В случае обработки в спирте процесс проводился в закрытых стеклянных сосудах объёмом 25 мл, которые помещались на заполненное жидкостью (высота столба 2 см) дно рабочей камеры. Варьировали: массу порошка (от 50мг до 100мг), время обработки (10, 30, 60 мин). Исходный размер частиц находился в пределах от 10 до 50мкм. Пробы брались из верхней части сосуда. Отбиралась капля жидкости и помещалась на подложку. Далее, после испарения жидкости, подложка с полученными образцами частиц подвергалась дальнейшим исследованиям. Анализ полученных образцов производился с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Типичные результаты исследования образцов, взятых через 30 и 60 минут после начала процесса приведены на рис. 2.а и 2.б соответственно. Получены частицы разного размера, от 100 до 500нм и отдельные частицы до 3мкм.



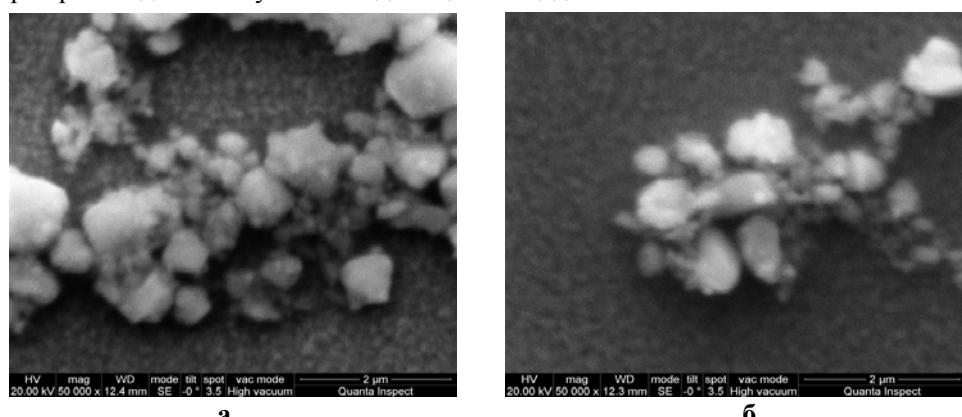
*Рис. 2. Результаты исследования образцов, взятых через 30 (а) и 60 (б) минут  
после начала процесса*

Пробы отбирались как во время работы установки, так и после окончания её работы (через 1 и 24 часа). В частности, на рисунке 3 приведены типичные результаты исследования образцов, взятых через 1 и 24 часа после окончания процесса, рис. 3.а и 3.б, соответственно.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что размер частиц уменьшается с 10-50 мкм до 100-500 нм. В виде супензии в верхней части сосуда после отстаивания остаются только мелкие ультрадисперсные частицы (УДЧ).

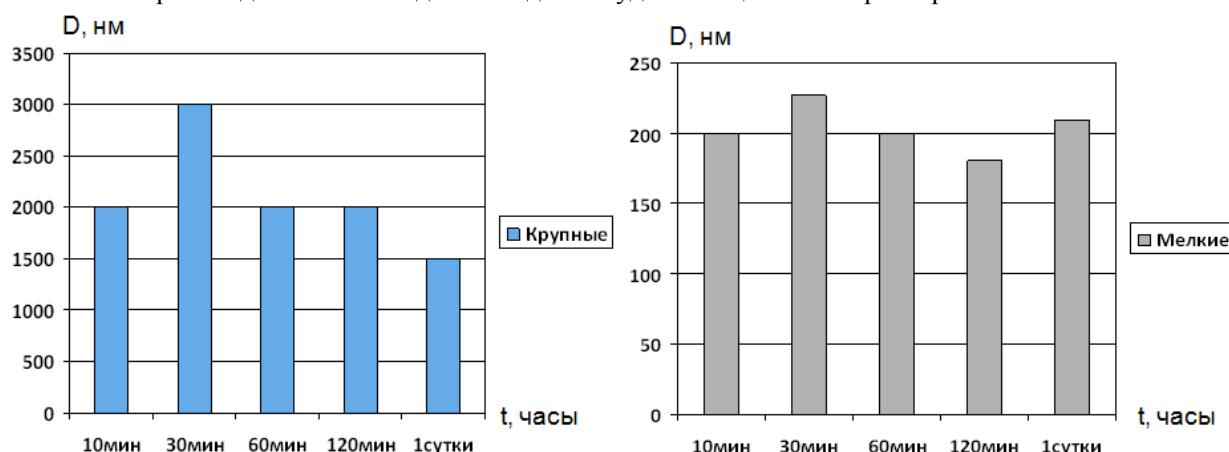
Из результатов экспериментов следует, что минимальный размер частиц практически не изменяется во времени. Происходит лишь количественное увеличение диспергированных частиц (растёт число частиц, которые прошли кавитационную обработку, но каждая такая обработка приводит, в данных условиях, к уменьшению частиц до определённого размера). Диаграммы зависимости размеров частиц от времени диспергирования представлены на рисунке 4. На данном рисунке «1 сутки» - это время отстоя,

после которого был произведен повторный забор образцов для сравнения. Подсчет количества частиц разного размера производился визуально с единицы площади



*Рис. 3.* Результаты исследования образцов, взятых через 1 (а) и 24 (б) часа после окончания процесса (среда – спирт, объём – 25 мл, масса порошка 1 г)

С увеличением времени выдержки после окончания процесса диспергирования происходит уменьшение плотности УДЧ на пластинах, которые используются для отбора проб. Причём это уменьшение происходит за счёт оседания на дно сосуда частиц больших размеров.



*Рис. 4.* Размеры получаемых частиц в зависимости от времени ультразвуковой обработки

Из представленных результатов можно сделать вывод об эффективности ультразвукового диспергирования для получения ультрадисперсных частиц. Однако при выключении ультразвукового воздействия полученные частицы начинают активно образовывать агломерации. Использование этилового спирта не позволило избавиться от агломерации. Анализируя полученные данные представляется два возможных механизма образования агломератов:

- 1) Полученные частицы начинают «слипаться» непосредственно после выключения ультразвукового воздействия.
- 2) Агломераты образуются в момент нанесения капли жидкости на подложку для исследования на РЭМ. В процессе испарения капля уменьшается, и частицы слипаются под сдавливающим действием поверхностного натяжения жидкости.

В настоящее время мы активно занимаемся поиском способа, применение которого позволит избежать агломерации получаемых ультрадисперсных частиц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Маркус П., Хельмар III.* Дисперсия и деагломерация наночастиц в водных растворах, 2004, [http://www.hielscher.com/ru/size\\_reduction\\_silica\\_01.htm](http://www.hielscher.com/ru/size_reduction_silica_01.htm)
2. *Zhiwei Li \*, XIAOJUN Tao, ZhiShen Wu, Pingyu Zhang, Zhijun Zhang.* Preparation of In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> nanoparticle by ultrasonic dispersion and its tribology property, 2009, Laboratory for Special Functional Materials, Henan University, Kaifeng 475004, PR China, Ultrasonics Sonochemistry 16 (2009) 221–224.

3. Хмелёв В.Н., Попова О.В. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве, научная монография/ Алт. гос. Техн. Ун-т. им. И.И. Ползунова. - Барнаул: изд. АлтГТУ, 1997, <http://u-sonic.ru/pubs/mon1/mon6/7>

УДК 534.321.9:621.762

**М.А.Красавина<sup>1</sup>, И.Б.Московенко<sup>2</sup>, С.И.Пугачев<sup>3</sup>, Е.Ю.Рытов<sup>3</sup>**

**УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДИСКОВ  
ИЗ ОКСИДНО-ЦИНКОВОЙ КЕРАМИКИ**

1. ЗАО «Завод энергозащитных устройств» («ЗЭУ»)  
Россия, 197342, Санкт-Петербург, пер. Красногвардейский, д. 8  
Тел.: (812) 295-1501; Факс: (812) 327-6415; E-mail: [energo@mail.rcom.ru](mailto:energo@mail.rcom.ru)
2. ООО «Звук»  
Россия, 197342, Санкт-Петербург, ул. Белоостровская, д. 17  
Тел. (812) 596-3402; E-mail: [info@ndtest.ru](mailto:info@ndtest.ru)
3. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
Россия, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3  
Тел. (812) 757-1055; Факс: (812) 757-0911; E-mail: [spugachev@bk.ru](mailto:spugachev@bk.ru)

*Рассмотрены элементы технологии ультразвукового формообразования (УЗФО) оксидно-цинковых дисков большого (свыше 100 мм) диаметра, являющихся основой одноименных варисторов, предназначенных для защиты высоковольтных электрических сетей от грозовых и коммутационных перенапряжений. С использованием метода математического планирования экспериментов разработаны технологические режимы УЗФО, обеспечивающие получение высоко- и равноплотных дисков при пониженном значении статического механического давления. Показана эффективность использования неразрушающего акустического метода для анализа физико-механических свойств оксидно-цинковых варисторов, изготовленных как по промышленной технологии, так и с использованием УЗФО. Приведены результаты стандартных испытаний крупногабаритных оксидно-цинковых варисторов, изготовленных с применением УЗФО, в сильном электрическом поле.*

В работе [1] представлена математическая модель ультразвукового формообразования (УЗФО) дисков из оксидно-цинковой керамики и приведены результаты экспериментов применительно к образцам диаметром 56 мм. В то же время использование оксидно-цинковой керамики для создания одноименных варисторов делает актуальным переход к крупногабаритным (диаметром свыше 100 мм) образцам. Создание подобных варисторов, являющихся основой защитных устройств электросетей от грозовых и коммутационных перенапряжений, позволит оптимизировать конструкции защитных устройств и повысить их основные эксплуатационные характеристики. Следует отметить, что промышленная технология формообразования оксидно-цинковой керамики не позволяет получить однородные и высокоплотные образцы в форме дисков большого диаметра. Преимущество УЗФО перед промышленной технологией формообразования и определило целесообразность проведения работ, основные результаты которых составили содержание настоящей статьи.

Опытная установка для УЗФО включала гидравлический пресс с максимальным усилием 150 тонн, ультразвуковой генератор УЗГЗ-4 с выходной мощностью ( $4,0 \pm 20\%$ ) кВт и регулируемой частотой ( $18 \pm 7,5\%$ ) кГц, а также магнитострикционный преобразователь ПМС-15А-18. Преобразователь размещался в подвижной части пресса, и ультразвуковые колебания вводились в пресс-форму через верхний пuhanсон.

Для разработки технологических режимов УЗФО использовали метод математического планирования экспериментов. В качестве функции отклика, зависящей от технологических факторов, приняли относительную плотность

$$\rho_{\text{отн}} = (\rho_1 - \rho_2) / \rho_1,$$

где  $\rho_1$  – плотность заготовки после УЗФО,  $\rho_2$  – плотность заготовки, полученной без применения ультразвукового воздействия (способом статического прессования).

Варьируемыми технологическими факторами (табл. 1) являлись масса навески  $M$ , статическое давление прессования  $P$  и выходная акустическая мощность  $W$ . В соответствии с принятыми диапазонами варьирования проведена серия опытов по формообразованию оксидно-цинковых дисков и получена матрица планирования (табл. 2). Зависимость функции отклика от технологических факторов представлена уравнением регрессии

$$\rho_{\text{отн}} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{12} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3,$$

где коэффициенты регрессии  $b$  (табл. 3) рассчитывались по известным формулам [2].

Результаты планирования использовались при разработке режимов УЗФО оксидно-цинковых дисков с диаметром заготовки 150 мм. В качестве пластификатора использовался 5% раствор

поливинилового спирта, его содержание в порошке составляло 2,5 %. Продолжительность воздействия ультразвука в процессе формообразования находилась в интервале 20...25 с.

Прессованные заготовки прошли операцию высокотемпературного обжига в электрических печах сопротивления в окислительной атмосфере (в воздухе). На плоские поверхности обожженных заготовок методом шоопирования наносили металлическое покрытие (алюминий), а на боковые поверхности металлизированных образцов – электроизоляционное покрытие. Изготовленные варисторы испытывались неразрушающим акустическим методом и в сильном электрическом поле.

**Таблица 1.** Технологические факторы процесса формообразования

Фактор	$M$ , кг	$P$ , МПа	$W$ , Вт
Основной уровень	1,2	40	1650
Интервал варьирования	0,2	10	150
Верхний уровень	1,5	50	1800
Нижний уровень	0,9	30	1500

**Таблица 2.** Полный трехфакторный эксперимент

Номер опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$M$ , кг	$P$ , МПа	$W$ , Вт	$\rho_{omn}$ , %
1	-1	-1	-1	0,9	30	1500	2,91
2	-1	-1	1	0,9	30	1800	3,09
3	-1	1	-1	0,9	50	1500	3,18
4	-1	1	1	0,9	50	1800	3,20
5	1	-1	-1	1,5	30	1500	3,21
6	1	-1	1	1,5	30	1800	3,40
7	1	1	-1	1,5	50	1500	3,15
8	1	1	1	1,5	50	1800	3,24

**Таблица 3.** Коэффициенты регрессии

$b_0$	3,1725	$b_2$	0,0200	$b_{12}$	-0,0750	$b_{23}$	-0,0325
$b_1$	0,0775	$b_3$	0,0600	$b_{13}$	0,0100	$b_{123}$	0,0075

Для неразрушающего контроля физико-механических свойств различного рода материалов и изделий в условиях действующего производства находят достаточно широкое применение акустические методы контроля, использующие акустические колебания как звукового, так и ультразвукового диапазона частот, основанные на измерении частот собственных колебаний изделий [3].

С использованием серийно выпускаемой аппаратуры, реализующей акустические методы, были выполнены работы по исследованию возможности их использования как для контроля свойств оксидно-цинковых варисторов в условиях действующего производства, так и для мониторинга технологического процесса производства изделий и проведения, при необходимости, корректировки процесса.

С этой целью с помощью прибора «Звук-130», в котором реализован резонансный метод измерения частот собственных колебаний, проводился контроль изготовленной ЗАО «ЗЭУ» партии (102 шт.) оксидно-цинковых варисторов диаметром 46 мм и высотой 26 мм. С позиций теории колебаний, подобные варисторы представляют собой достаточно толстые диски, в которых предпочтительными для регистрации являются низкочастотные изгибные колебания двух типов: мода с двумя узловыми диаметрами  $f_1$  и мода с одной узловой окружностью  $f_2$  [4]. С целью удобства проведения измерений в условиях производства для регистрации были выбраны колебания типа  $f_2$  и, в соответствии с рекомендациями компьютерной программы прибора «Звук-130», проводились измерения частоты  $f_2$  и приведенной скорости распространения акустических волн  $C_1$  (определение по ГОСТ 25961-83). При этом закрепление изделия в измерительной стойке между двумя пьезоэлектрическими оппозитно расположенными датчиками осуществлялось при расположении датчиков по центру диска без применения специальных дополнительных опор. Такая методика контроля обеспечивала минимальное искажение спектра частот собственных колебаний и достаточную точность и воспроизводимость результатов контроля.

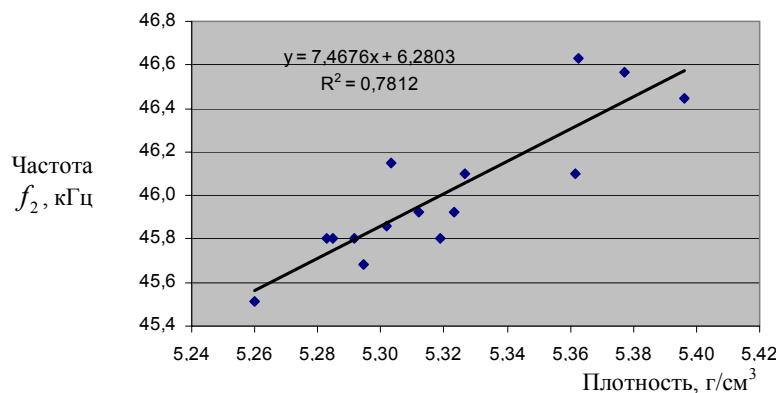
Из проконтролированной партии изделий были отобраны 15 образцов с различными значениями  $f_2$  во всем указанном диапазоне частот (табл. 4). Видно (рис. 1), что существует достаточно надежная линейная корреляционная связь между плотностью образцов и результатами акустического контроля.

На рис. 2 приведена гистограмма, позволяющая оценить распределение варисторов в исследуемой партии по значениям  $C_1$ . На рис. 3 приведена кривая распределения изделий в партии по значениям

результатов измерений, выполненных на приборе «Звук-130». При достаточно представительной выборке изделий наличие подобной кривой позволяет оценить состояние технологического процесса по результатам неразрушающего контроля экспрессным акустическим методом. Ширина кривой распределения изделий в выборке характеризует стабильность технологического процесса, а смещение кривой распределения по шкале частот свидетельствует об изменении физико-механических свойств изделий, в первую очередь, прочности и пористости. Такое наблюдение за состоянием технологического процесса (его мониторинг) может обеспечить возможность своевременного выявления отклонений процесса от действующего регламента и позволяет корректировать технологический процесс до обнаружения существенных дефектов или выявления существенных его нарушений. Это будет способствовать повышению качества и надежности выпускаемой продукции и позволит увеличить выход изделий с заданными параметрами.

**Таблица 4.** Физико-механические свойства варисторов диаметром 46 мм

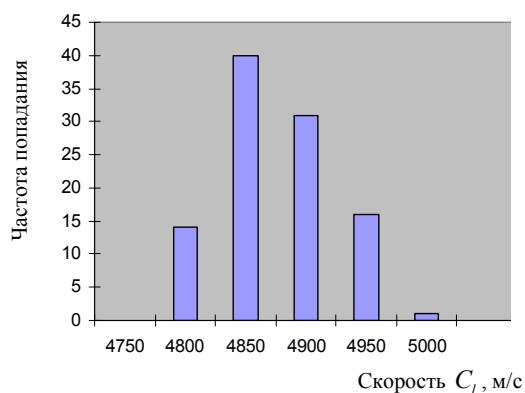
Номер п/п	Номер образца	$f_2$ , кГц	$C_l$ , м/с	Диаметр, мм	Высота, мм	Масса, г	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$
1	3	45,51	4770	46,8	25,2	227,9	5,26
2	15	45,8	4800	46,7	25,2	228,3	5,29
3	18	45,8	4800	46,8	25,4	230,7	5,28
4	21	45,8	4800	46,8	25,5	231,7	5,28
5	23	45,8	4800	46,8	24,9	227,7	5,32
6	27	46,45	4860	46,4	25,1	228,9	5,40
7	31	46,63	4880	46,4	25,2	228,4	5,36
8	33	45,92	4810	46,6	25,3	229,1	5,31
9	48	46,57	4880	46,4	25	227,2	5,38
10	58	46,1	4830	46,5	24,9	226,6	5,36
11	59	45,92	4810	46,7	24,7	225,1	5,32
12	73	45,86	4800	46,8	25,1	228,8	5,30
13	79	46,15	4830	46,6	25	226	5,30
14	85	46,1	4830	46,6	24,9	226,1	5,33
15	87	45,68	4780	46,7	25	226,6	5,29



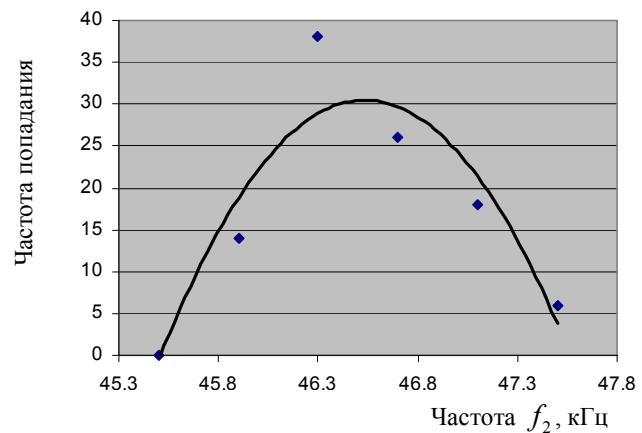
**Рис. 1.** Зависимость частоты от плотности

Из представленных выше данных следует, что акустический метод контроля целесообразно использовать также при отработке новых технологий производства варисторов, включающих, применение ультразвука в процессе формообразования. Использование метода позволяет оценить, с одной стороны, стабильность физико-механических свойств варисторов внутри опытных партий, изготавливаемых при отработке технологии изделий, и, с другой стороны, – производить достаточно представительную минимальную выборку изделий, необходимую для определения наиболее важных параметров, определяющих их эксплуатационные характеристики.

В качестве примера в таблице 5 приведены результаты контроля, которые были получены на образцах варисторов большого диаметра, изготовленных в ходе отработки технологии УЗФО. На образцах помимо значения частоты  $f_2$  была измерена частота  $f_1$ , что позволило по известным зависимостям [4] произвести дополнительный расчет коэффициента Пуассона  $v$  – весьма важной характеристики, также определяющей физико-механические, в первую очередь упругие, свойства изделий.



*Рис. 2.* Распределение варисторов по  $C_l$



*Рис. 3.* Распределение варисторов по  $f_2$

*Таблица 5.* Физико-механические свойства варисторов диаметром 124...125 мм

Номер образца	Диаметр, мм	Высота, мм	Масса, кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$f_1$ , Гц	$f_2$ , Гц	$C_l$ , м/с	$\nu$
1	124,8	25,2	1,608	5220	6154	10102	4280	0,325
2	124,5	24,8	1,602	5310	6177	10189	4340	0,330
3	125,2	22,6	1,470	5290	5686	9422	4350	0,326
4	124,4	22,0	1,411	5280	5624	9349	4345	0,330
5	124,6	18,6	1,175	5280	4823	8098	4305	0,330
6	125,0	18,2	1,177	5270	4720	7914	4315	0,327
7	124,1	14,7	0,943	5300	4005	6806	4360	0,331
8	124,0	14,7	0,943	5310	4007	6800	4350	0,332

Целью испытаний, проводимых в сильном электрическом поле, являлась проверка пропускной способности оксидно-цинковых варисторов при воздействии прямоугольных импульсов тока длительностью 2000 мкс амплитудой 3400 А.

Испытания проводились в соответствии с программой:

1) Измерение остающегося напряжения на импульсном токе 8/20 мкс амплитудой 20 кА.

2) Определение наибольшего длительно допустимого напряжения варисторов.

3) Испытания на пропускную способность импульсами тока большой длительности и определение удельной энергии, поглощенной варистором при воздействии одного импульса тока.

4) Измерение остающегося напряжения на импульсном токе 8/20 мкс амплитудой 20 кА.

Варисторы считались выдержавшими испытания, если:

– остающееся напряжение при импульсе тока 8/20 мкс амплитудой 20 кА, измеренное до и после испытаний, отличается не более чем на  $\pm 5\%$ ;

– на осцилограммах отсутствовали искажения формы кривой тока (напряжения), свидетельствующие о наличии повреждений в варисторах;

– визуальный осмотр варисторов после испытания не выявил пробоя, перекрытия, образования трещин или других значительных повреждений варисторов.

Все контрольные образцы выдержали испытания в сильном электрическом поле. Таким образом, с использованием УЗФО были впервые получены не имеющие аналогов в отечественной и зарубежной технике крупногабаритные оксидно-цинковые варисторы пропускной способности 3400 А.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Красавина М.А., Попов Н.М., Пугачев С.И. и др. Математическая модель ультразвукового формообразования оксидно-цинковой керамики // Сб. трудов XVIII сессии РАО. – М.: 2006. Т. 2 – С. 102-105.
2. Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов. – М.: Металлургия. – 1974.
3. Коварская Е.З., Московенко И.Б., Чудакова С.М. Метрологическое обеспечение контроля физико-механических характеристик низкочастотным акустическим методом. // В мире неразрушающего контроля – 2004 – № 2 – С. 17-19.
4. Глаговский Б.А., Московенко И.Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. – Л.: Машиностроение. – 1977.

УДК 534

**Браславец В.Р., Бамбура М.В.**

## **УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СТИМУЛЯЦИЯ РОСТА И РАЗВИТИЯ МОЛОДЫХ РЫБЫ**

ООО "ЮниПроф",

Россия, 129626, Москва, ул. 3-я Мытищинская, д.16, корп. 61, оф.303

Тел: 8(495)426-82-91, E-mail: [Mariya-bambura@yandex.ru](mailto:Mariya-bambura@yandex.ru)

*Способность ультразвука оказывать стимулирующее действие на живые системы подтверждена в опытах на гидробионтах, в частности на рыболовной икре и сперме осетров. В процессе исследований ультразвуковому воздействию с частотой 880 кГц и с интенсивностью излучения в 0,05-0,7 Вт/см<sup>2</sup> подвергли икру осетров в течение 2-5 мин в процессе оплодотворения, а также отдельно сперму осетров (0,05 Вт/см<sup>2</sup>, 10 секунд) до оплодотворения. Полученные данные свидетельствуют о повышении сопротивляемости рыболовной икры заражению сапробиозом, повышении выживаемости молоди осетров в условиях искусственного содержания, ускорении их роста и развития. Полученные данные послужили основанием для дальнейших экспериментов, на других породах рыб (стерляди и карпе), подтвердивших эффективность использования ультразвука в рыбоводстве.*

Будучи фактором, практически не встречающимся в естественных условиях, ультразвук является для биологических систем неспецифическим стимулятором, и при интенсивностях, не вызывающих необратимых изменений в клетках и тканях, как правило, обуславливает ускорение адаптации, роста и развития организмов за счет реализации их внутренних резервов [1, 2].

Способность организма адаптироваться к изменениям окружающей среды зависит от величины резерва его возможностей. Размеры резерва и условия его реализации можно оценить по реакции биологической системы на стимулирующие воздействия.

В результате эволюции живые системы приобрели способность реагировать на изменения окружающей среды, соответственно меняя свои параметры таким образом, чтобы протекающие в организме процессы всегда были по возможности оптимальными. В организме, на регулярно повторяющиеся сигналы, со временем вырабатываются стандартные программы реагирования,

Для реагирования на ситуации, которые возникают достаточно редко, или создаются искусственно (воздействие ультразвуком, например, или незнакомым комплексом полезных или безвредных веществ) организм не обладает стандартными программами. В этом случае срабатывает аварийная программа, и включаются все защитные механизмы. Иначе говоря, организм воспринимает незнакомые воздействия как сигнал возможной опасности в будущем и, увеличивая свою продуктивность, готовится к возможным негативным изменениям в окружающей среде.

Очевидно, что ни природа, ни величина неспецифического стимулятора не окажут существенного влияния на конечный эффект, если стимулирующее воздействие имеет характер сигнала и не вызывает структурных нарушений в системе. Сигнальное воздействие лишь запускает реакцию системы, а механизм биофизического взаимодействия действующего фактора и организма оказывается несущественным для эффекта стимуляции и реализации внутренних резервов.

Бессспорно также, что резервные возможности организма не безграничны, и, следовательно, чем выше продуктивность организма (в общем смысле этого понятия), тем меньше его резерв и тем менее эффективна его стимуляция.



**Рис.1.** Зависимость дополнительной продуктивности организма после неспецифической стимуляции от его исходной продуктивности

Многочисленные данные, полученные в экспериментах на животных, а так же результаты стимуляции организма человека, (например, в спорте) подтверждают: чем ниже исходная продуктивность, а, следовательно, чем больше резерв нереализованных возможностей, тем выше эффект стимуляции.

При очень низкой продуктивности, обусловленной патологическими процессами в организме и очень высокой, когда регуляторные механизмы и без того напряжены до предела, стимуляция может не оказать никакого воздействия, или даже дать результат противоположный ожидаемому.

Стимуляция, прежде всего, направлена на повышение активности репродуктивных органов, что, конечно же, соответствует общефизиологическому настрою. Представления об ограниченном резерве роста и развития живых систем, а также о природе их стимуляции позволяет систематизировать и объяснить многочисленные, хорошо известные экспериментальные данные и дают основу для новых практических разработок.

Полноту реализации резерва нетрудно определить по реакции организма на дополнительный стимул той же, или иной природы.

В процессе исследований ультразвуковой стимуляции, воздействию с частотой 880 кГц, и интенсивностью излучения 0,4 Вт/см<sup>2</sup> подвергли икру осетров в процессе оплодотворения, а также отдельно в течение 10 секунд сперму осетров до оплодотворения используя ультразвуковой преобразователя стандартного терапевтического аппарата УЗТ1-1. Всего, для опыта использовано по 10 садков для 10 различных режимов обработки.

Полученные результаты представлены в Таблицах 1 - 6.

**Таблица 1.** Воздействие на икру осетра ультразвуком в процессе искусственного осеменения

Вид	Интенсивность воздействия Вт/см <sup>2</sup>	Время воздействия сек.	Среднее кол-во икры, шт.	Выход личинок, %	Поражение сапролегнием, %
Русский осетр	0,05	60	691	87	13
	0,4	60	678	89	10
	0,7	60	588	91	9
	1,0	60	1999	85	19
	контроль	контроль	591	86	13

**Таблица 2.** Воздействие на молоки осетра ультразвуком перед осеменением икры

Вид	Интенсивность воздействия, Вт/см <sup>2</sup>	Время воздействия сек.	Среднее кол-во икры, шт.	Выход личинок, %	Поражение сапролегнием, %
Русский осетр	0,05	10	559	92	8
	0,4	10	692	82	18
	0,7	10	861	78	22
	1,0	10	766	80	20
	контроль	контроль	664	75	25

Полученные результаты показали перспективность применения ультразвука в качестве неспецифического стимулятора и легли в основу дальнейших исследований стимулирующего действия ультразвука на икру и молоки рыбы других пород.

**Таблица 3.** Воздействие ультразвуком на икру стерляди в процессе осеменения.

вид	Масса кг ♀	Масса кг ♂	Интенсивность воздействия, Вт/см <sup>2</sup>	Время воздействия сек.	Среднее кол-во икры, шт.	Выход личинок, %	Поражение сапролегнием, %
Стерлянь (опыт 1)	3,55	2,8	0,05	60	830	88,0	12,0
	3,55	2,8	0,4	60	795	90,4	9,0
	3,55	2,8	0,7	60	873	92,2	9,0
	3,55	2,8	контроль	контроль	900	85,4	13,0
Стерлянь (опыт 2)	3,2	2,5	0,05	60	950	86,0	11,0
	3,2	2,5	0,4	60	930	89,0	9,0
	3,2	2,5	0,7	60	940	91,0	10,0
	3,2	2,5	контроль	контроль	960	82,0	12,0

**Таблица 4.** Воздействие ультразвуком на молоки стерляди перед искусственным осеменением икры.

вид	Масса кг ♀	Масса кг ♂	Интенсивность воздействия, Вт/см <sup>2</sup>	Время воздействия сек.	Среднее кол-во икры, шт.	Выход личинок %	Поражение сапро- легнием,%
Стерлядь (опыт 1)	3,55	2,8	0,05	10	970	91,3	8,0
	3,55	2,8	0,4	10	960	83,6	15,0
	3,55	2,8	0,7	10	980	79,5	13,0
	3,55	2,8	контроль	контроль	1000	77,0	16,0
Стерлядь (опыт 2)	3,2	2,5	0,05	10	820	92,4	10,0
	3,2	2,5	0,4	10	830	84,5	12,0
	3,2	2,5	0,7	10	850	78,6	13,0
	3,2	2,5	контроль	контроль	880	79,1	15,0

**Таблица 5.** Воздействие ультразвуком на икру карпа в процессе искусственного осеменения.

вид	Масса кг ♀	Масса кг ♂	Интенсивность воздействия, Вт/см <sup>2</sup>	Время воздействия сек.	Среднее кол-во икры, шт.	Выход личинок, %	Поражение сапро- легнием,%
Карп парский (опыт 1)	5,5	<b>3,7</b>	0,05	60	1200	86,5	13,0
	5,5	3,7	0,4	60	1250	88,0	10,0
	5,5	3,7	0,7	60	1150	89,4	13,0
	5,5	3,7	контроль	контроль	1300	80,0	14,0
Карп парский (опыт 2)	5,3	3,8	0,05	60	1300	87,2	12,0
	5,3	3,8	0,4	60	1250	89,3	8,0
	5,3	3,8	0,7	60	1270	91,1	9,0
	5,3	3,8	контроль	контроль	1300	80,0	15,0

**Таблица 6.** Воздействие ультразвуком на молоки карпа перед осеменением.

вид	Масса кг ♀	Масса кг ♂	Интенсивность воздействия, Вт/см <sup>2</sup>	Время воздействия сек.	Среднее кол-во икры, шт.	Выход личинок, %	Поражение сапро- легнием,%
Карп парский (опыт 1)	5,5	3,7	0,05	10	900	91,6	12,0
	5,5	3,7	0,4	10	1100	82,3	11,0
	5,5	3,7	0,7	10	950	80,7	11,0
	5,5	3,7	контроль	контроль	1200	78,0	14,0
Карп парский (опыт 2)	5,3	3,8	0,05	10	1100	88,0	13,0
	5,3	3,8	0,4	10	950	82,0	7,0
	5,3	3,8	0,7	10	1000	79,4	8,0
	5,3	3,8	контроль	контроль	1150	79,6	12,0

Сравнение вышеприведенных результатов с полученными ранее данными [3] о реакции живых систем, в том числе и гидробионтов, на «Баксин» - сухую инактивированную биомассу галобактерий [4] и на янтарную кислоту[5], проявляющих высокоеффективное положительное действие на организм рыбы можно заключить, что использование ультразвука для реализации внутренних резервов роста и развития представляет собой практический интерес, так как легко реализуемо, не требует затрат на производство указанных соединений и введение их в корма рыбы, не приводит к излишнему увеличению концентрации органических веществ в воде рыбоводных бассейнов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коржевенко Г.Н., Акопян В.Б., Шангин-Березовский Г.Н. Скрытый резерв роста и развития живых систем. // Вестник сельскохозяйственной науки / -1988.- Вып.4 (380). -С.96 -105.
2. Акопян В.Б., Ериков Ю.А.. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами.// Москва, Изд-во РГТУ им Баумана/ - 2005. -223с.
3. Богорук А.К., Браславец В.Р., Акопян В.Б., Призенко В. К.. Основы применения ультразвука в рыбном хозяйстве.// М. ФГНУ «Росинформагротех» -2009. - 92 с.

А.Н.Неверов

## ВЫСОКОАМПЛИТУДНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

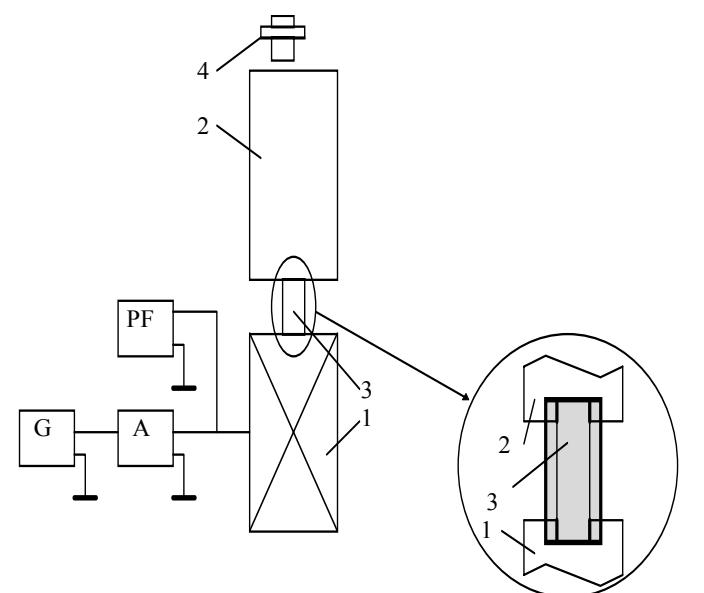
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)  
Россия, 125164, Ленинградский пр., 64  
Тел.: (495)155-0868; E-mail: [neverov\\_an@mail.ru](mailto:neverov_an@mail.ru)

Предложена ультразвуковая колебательная система, состоящая из полуволновых преобразователя и инструмента. Слабая связь низкодобротного преобразователя и высокодобротного инструмента обуславливает высокую добротность составной системы. Приведены результаты экспериментальных исследований предлагаемой системы.

Многие ультразвуковые технологические процессы, например, поверхностное пластическое деформирование, возможны лишь при достаточно высоких амплитудах колебаний. Поэтому зачастую в качестве источников упругих колебаний в этих случаях применяются магнитострикционные преобразователи. Их использование предполагает, однако, наличие громоздкой системы охлаждения.

Составные пьезоэлектрические преобразователи не требуют принудительного водяного охлаждения, но

достижимые с их помощью амплитуды колебаний недостаточны. Потому необходимы устройства для дополнительного увеличения амплитуд колебаний. Обычно для повышения амплитуд продольных колебаний ультразвуковых преобразователей используются акустические трансформаторы – стержни переменного сечения [1–3]. Усиление в них достигается благодаря изменению волнового сопротивления вдоль оси стержня. В то же время существует и вторая возможность – разделение функций преобразования электрических колебаний в механические и введение энергии упругих колебаний в обрабатываемый объект. При этом элемент связи между преобразователем и инструментом должен предотвратить внесение сопротивления потерь из низкодобротного преобразователя в высокодобротный инструмент. Тогда добротность инструмента почти не снижается, а амплитуда колебаний инструмента повышается.



**Rис. 1.** Блок – схема экспериментальной установки.

1.Преобразователь; 2.Инструмент; 3.Соединительный элемент (шпилька); 4.Бесконтактный виброметр; G.Генератор;  
A.Усилитель; PF.Частотомер

В настоящей работе исследуется возможность повышения амплитуды колебаний стержневых систем подбором элемента связи между преобразователем и инструментом. Этот элемент подберем так, чтобы потери, вносимые в высокодобротный инструмент из низкодобротного преобразователя, были минимальны.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Исследуемая колебательная система состояла из составного пьезоэлектрического преобразователя 1 и инструмента – однородного стержня, соединенных при помощи стальной шпильки с резьбой M8x1 так, что акустический контакт между низкодобротным преобразователем и высокодобротным инструментом происходил только по ниткам резьбы соединительного элемента (шпильки) [4]. Конструкция преобразователя была выбрана так, чтобы его можно было аппроксимировать однородным стержнем. Собственная частота преобразователя была равна 25,27 кГц, добротность – 180. Длина пассивного волновода изменялась от 111 до 43 мм, соответственно изменялась и его собственная частота. Эксперименты проводились со шпильками длиной 25 и 63 мм.

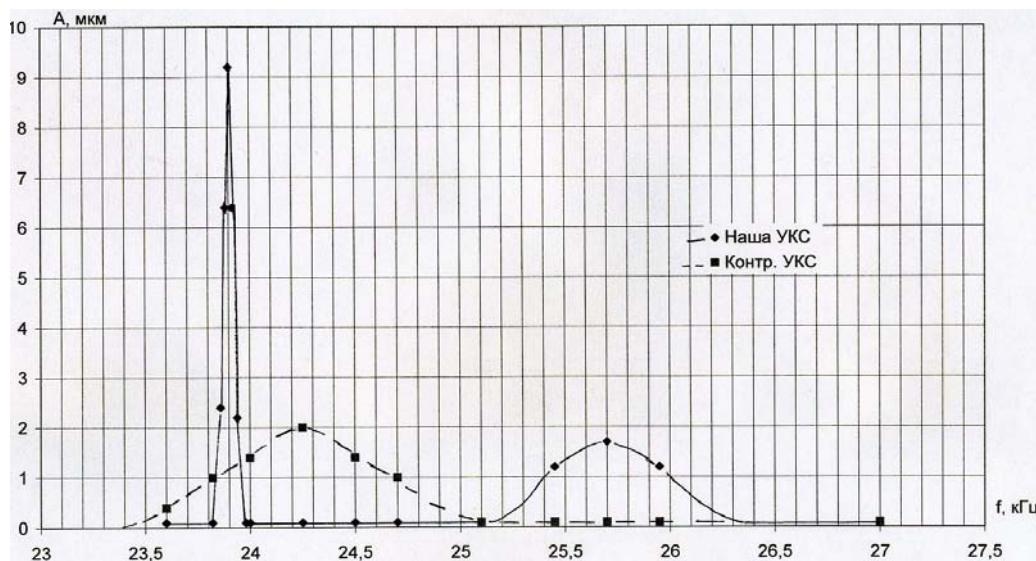
Для каждой из построенных таким образом систем снималась амплитудно-частотная характеристика при постоянной амплитуде возбуждающего преобразователь электрического напряжения. С помощью полученных амплитудно-частотных характеристик определялись резонансные частоты, добротности и амплитуды колебаний при резонансе, которые сравнивались с соответствующими

параметрами контрольной колебательной системы, построенной из тех же волноводов, соединенных непосредственно встык.

Пример таких экспериментальных амплитудно-частотных характеристик приведен на рис. 2.

В исследованном диапазоне частот контрольная система имеет одну резонансную частоту приблизительно 25,25 кГц, соответствующая условию резонанса двухстержневой системы [5].

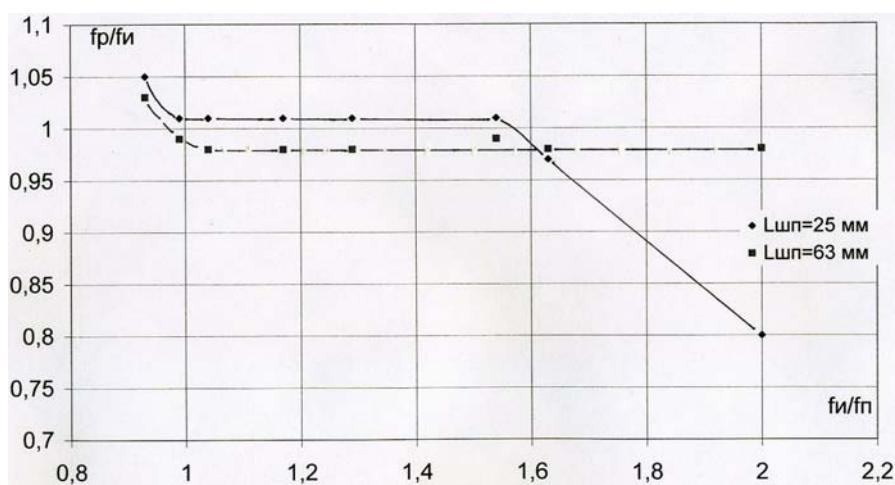
У предложенной нами системы наблюдались две резонансные частоты – приблизительно 23,8 и 25,7 кГц.



*Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики предлагаемой и контрольной систем*

Первая из этих частот близка к собственной частоте инструмента. Действительная часть переходного сопротивления при этом определяется высокодобротным инструментом, амплитуда колебаний существенно выше, чем в предыдущем случае. Вторая резонансная частота 25,7 кГц близка к собственной частоте преобразователя; добротность системы и амплитуда колебаний инструмента невелики.

Таким образом, здесь имеет место «расщепление» собственных частот, характерное для связанных систем.



*Рис. 3. Экспериментальные зависимости резонансных частот fp от соотношения собственных частот инструмента fi и преобразователя fn*

Аналогичная картина наблюдалась и при других соотношениях собственных частот преобразователя и инструмента:

- резонансная частота контрольной системы размещалась между резонансными частотами предлагаемой системы;

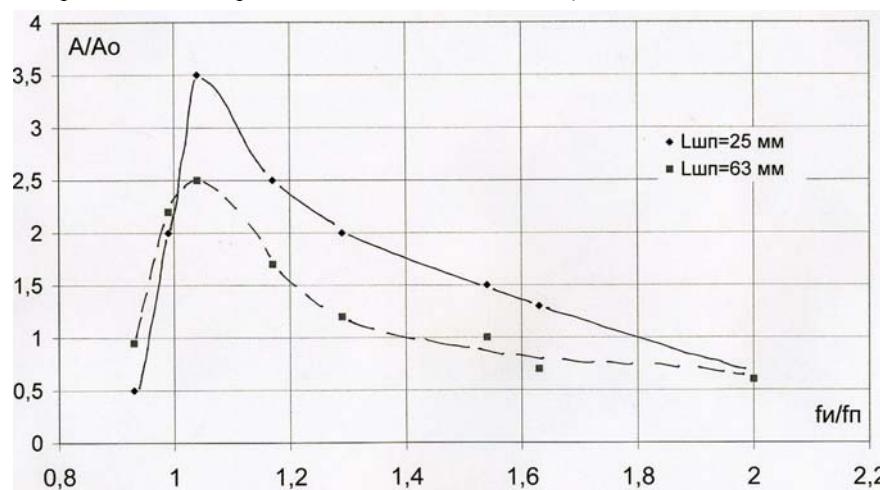
- на частоте возбуждения, близкой к собственной частоте преобразователя, добротность и амплитуда колебаний были того же порядка, что и у контрольной системы;
- на частоте возбуждения, близкой к собственной частоте инструмента, добротность и амплитуда колебаний определялись высокой добротностью инструмента, т.е. существенно превосходили соответствующие показатели контрольной системы.

Экспериментальные зависимости резонансных частот предлагаемой ультразвуковой колебательной системы  $f_p$  от соотношения собственных частот инструмента  $f_i$  и преобразователя  $f_p$  приведены на рис. 3.

Резонансная частота системы (частота, на которой амплитуда колебаний максимальна) очень близка к собственной частоте высокодобротного инструмента.

Лишь при очень значительной разнице собственных частот инструмента  $f_i$  и преобразователя  $f_p$  и при большой длине шпильки  $L_{sp}$  эта частота смещается в сторону собственной частоты преобразователя  $f_p$ .

Экспериментальные зависимости амплитуд колебаний предлагаемой ультразвуковой колебательной системы А от соотношения собственных частот инструмента  $f_i$  и преобразователя  $f_p$  приведены на рис. 4 (Ао – амплитуда колебаний системы, составленной из тех же преобразователя и инструмента, что и предлагаемая, при их стыковом соединении).



**Рис. 4.** Экспериментальные зависимости амплитуд колебаний системы А от соотношения собственных частот инструмента  $f_i$  и преобразователя  $f_p$

Наибольшее увеличение амплитуды получено тогда, когда собственная частота инструмента  $f_i$  была чуть больше собственной частоты преобразователя  $f_p$ . Заметим, что выигрыш по амплитуде колебаний наблюдался вплоть до значений  $f_i/f_p \approx 1,5$ , когда длина шпильки была 63 мм, и до значений  $f_i/f_p \approx 1,8$  для короткой шпильки 25 мм.

Таким образом, можно считать доказанной возможность существенного повышения амплитуды колебаний системы, состоящей из низкодобротного преобразователя и высокодобротного инструмента посредством введения между ними элемента связи с высокой податливостью.

К недостаткам разработанной системы относятся, прежде всего, ее высокая импеданс-чувствительность и трудность настройки на максимальную амплитуду. Связано это, очевидно, с высокой добротностью системы, полоса пропускания составляет всего 16 Гц.

Тем не менее, вполне очевидна перспективность применения описанных колебательных систем тогда, когда необходимы высокие амплитуды колебаний; нагрузка на преобразователь должна быть малой. Эти условия реализуются, например, в установках ультразвукового поверхностного пластического деформирования, высокоамплитудной очистки, в некоторых других технологических процессах.

## ЛИТЕРАТУРА

- Меркулов Л.Г. Расчет ультразвуковых концентраторов // Акустический журнал. - 1957. Т. III. С. 230-238.
- Senda T. Propagation of Longitudinal Plastic Waves Produced by Tensile Impact // Bull. Japan Soc. of Prec. Eng.- 1979. Vol. 13. No 1. P. 13-19.
- Lesniewski P. Discrete Component Equivalent Circuit for Webster's Horns// Applied Acoustics.- 1995. No 44. P. 117-124.
- Пат. РФ № 2097149. Колебательная система. Приоритет от 27.09.95. Опубл. в Бюл. № 33, 1997
- Мишра А., Неверов А.Н. Влияние армирования на свойства составных стержневых колебательных систем. Труды// XX сессия Российского акустического общества. М., Геос, 2008, т. 2, с. 84-88

УДК 534.6

Н.П. Коломеец

**КОНТРОЛЬ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ИНДЕНТОРА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ  
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПРИЛОЖЕНИИ К НЕМУ  
СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

ООО «Ультразвуковая техника-ИНЛАБ»

Россия, 194044, г. С-Петербург, Чугунная, д. 20

Тел.: +7 (812) 329-4961, факс +7 (812) 329-4962; E-mail: [nikolom@mail.ru](mailto:nikolom@mail.ru)

При ультразвуковой финишной обработке (УФО), применяемой для упрочняюще-чистовой обработки поверхности деталей без применения абразивов, получаемая шероховатость зависит от амплитуды колебательного смещения  $\xi$ . Для контроля амплитуды при контакте инструмента с обрабатываемой деталью предлагается использовать глубину его внедрения в деталь с измерением геометрии пятен контакта с помощью цифрового микроскопа.

Ультразвуковая финишная обработка (УФО) является известным методом упрочняюще-чистовой обработки поверхности, без применения абразивов, который позволяет ликвидировать дефекты, созданные в поверхностном слое на предшествующих операциях резания, упрочнить поверхностный слой и создать в нем сжимающие напряжения, что положительно сказывается на долговечности деталей. Простота процесса и оснастки, возможность использования универсального металлорежущего оборудования располагают к применению метода в технологических процессах финишной обработки деталей. Небольшие усилия, прилагаемые к детали, позволяют распространять УФО на тонкостенные и маложесткие детали [1].

При разработке технологических процессов с применением УФО важно знать зависимость получаемой шероховатости от электрических параметров ультразвукового генератора и режимов работы токарного станка, на котором установлено оборудование для УФО.

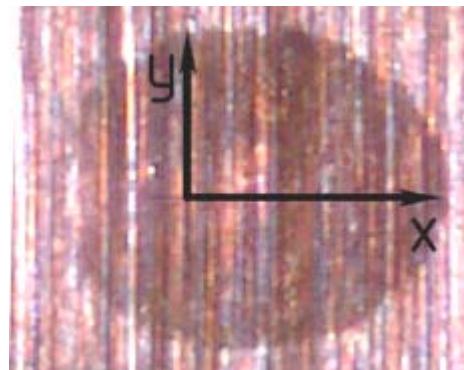
Ультразвуковой преобразователь технологического устройства для УФО, в частности магнитострикционный преобразователь, нормируется по энергетическим параметрам двумя основными характеристиками: входной электрической мощностью  $P_e$ , Вт и амплитудой колебательного смещения  $\xi$ , мкм, что определяется международным стандартом МЭК 782 [2]. Стандарт устанавливает основные характеристики, процедуры и предпочтительные методы измерений для оценки работы преобразователей.

Существующая приборная база [3], в том числе и рекомендованная стандартом МЭК 782, позволяет производить измерение мощности и амплитуды ультразвукового инструмента на холостом ходу, без контакта с обрабатываемой деталью. В случае, когда индентор, под действием статического усилия контактирует с обрабатываемой поверхностью, проконтролировать амплитуду колебаний торца индентора не представляется возможным, так как невозможно установить измерительный датчик или провести оптические измерения амплитуды колебательных смещений.

Измеряемая электрическая мощность генератора не может однозначно характеризовать воздействие сопротивления нагрузки на инструмент, поэтому измерение амплитуды колебаний под нагрузкой, является важной задачей. Тем более, амплитуда - один из главных технологических параметров, которые влияют на шероховатость получаемой поверхности [4,5].

Кроме того, важно определить значения нагрузки – статического усилия прижима инструмента к детали, при которых амплитуда колебаний снижается и не соответствует заявленным паспортным данным на устройство.

Предлагается [6] для измерения амплитуды колебательного смещения инструмента использовать глубину его внедрения в деталь. Математическое описание глубины внедрения инструмента в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала, т.е. нагрузки, представляет определённые трудности, поэтому её определение производилось опытным путём с помощью цифрового микроскопа по геометрии пятен контакта для каждой из исследуемых марок материала. Образованное пятно контакта на неподвижном образце представлено на рис. 1.



*Rис. 1. След сферического индентора на цилиндрической заготовке, (60x)*

Для определения глубины внедрения индентора проводился ряд опытов для получения следов инструмента на поверхности образца. В ходе опытов варьировалось статическое усилие работы прижима индентора к образцу и мощность (ступенчато) ультразвукового генератора. Время контакта индентора с заготовкой в процессе опытов не превышало 3-х секунд.

Фотографии пятен контакта снимали с помощью цифрового микроскопа Intel Play QX3, который обеспечивает увеличение в 10, 60 и 200 раз. Микроскоп представляет собой цилиндрический корпус, в котором установлены три механически переключаемые объектива, видеоматрица, осуществляющая фиксацию и необходимое преобразование изображения, блок микропроцессора для связи с компьютером.

Исследуемые образцы помещаются на предметный столик с пластмассовой станиной. Необходимо отметить, что конструкция микроскопа допускает использование цилиндра с оптикой и электроникой отдельное от станины. Это позволяет расширить возможности устройства и исследовать образцы, размеры которых не позволяют поместить их на предметный столик микроскопа. Микроскоп подключался к персональному компьютеру, посредством которого и осуществлялось управление.

Измерение пятен контакта производили в программе Adobe Photoshop и пересчитывали в действительный размер (находилось отношение полученных размеров отпечатка к увеличению микроскопа).

После измерений производился расчёт глубины внедрения индентора по следующей методике:

Исходные данные:

$R_{\Gamma}$ -радиус инструмента в горизонтальной плоскости;

$R_d$ -радиус заготовки в точке внедрения индентора;

$R_{OB}$ - радиус инструмента в вертикальной плоскости;

$B_{OG}$ - размер отпечатка в горизонтальной плоскости;

$B_{OB}$ - размер отпечатка в вертикальной плоскости.

Глубина внедрения -  $h_{\Gamma}$  инструмента в деталь в горизонтальной плоскости по отпечатку (по оси X)

$$h_{\Gamma} = R_{\Gamma} - \sqrt{R_{\Gamma}^2 - \frac{B_{OG}^2}{4}} \quad (1)$$

Глубина внедрения –  $h_B$  инструмента в деталь в вертикальной плоскости по отпечатку (по оси Y)

$$h_B = \left( R_{\Gamma} - \sqrt{R_{\Gamma}^2 - \frac{B_{OB}^2}{4}} \right) + \left( R_d - \sqrt{R_d^2 - \frac{B_{OB}^2}{4}} \right) \quad (2)$$

Средняя глубина внедрения инструмента в заготовку –  $h_{cp}$

$$h_{cp} = \frac{h_{\Gamma} + h_B}{2} \quad (3)$$

Опыты проводились на образце, обработанном согласно рис. 2 с исходной шероховатостью поверхности  $R_a = 3$  мкм. Согласно рис. 3 в каждом из указанных сечений при неизменном статическом усилии получали 4 пятна контакта, соответственно на I, II, III, IV ступенях регулировки мощности генератора и одно пятно без включения генератора, равномерно распределяя их по окружности в соответствующем сечении.

В ходе опытов индентор подводился к соответствующей точке заготовки, включался генератор ультразвуковых колебаний, устанавливалась необходимая ступень мощности работы генератора, и производился прижим. По достижении статического усилия, оговорённого в опыте, происходила выдержка в течение 3-х секунд при данной статической силе, и затем отвод индентора. Те же операции производилось в точке 5, но без включения генератора.

Для обработки стали 40Х использовался индентор с радиусом 10 мм. Для обработки стали 08Х18Н10Т, индентор с радиусом 6 и 10 мм.

Результаты измерений полученных пятен контакта и соответствующие им рассчитанные глубины внедрений, по методике, приведённой выше, сводились в таблицы.

В результате опытов получено значение глубины внедрения индентора в зависимости от его конфигурации, статического усилия прижима и мощности генератора (динамическая глубина внедрения).

По результатам измерений построена зависимость глубины вдавливания индентора от статической силы прижима при изменении радиуса индентора и его положения по длине обрабатываемой поверхности, рис. 4 (без включения генератора).

Здесь  $h$  – глубина внедрения индентора, измеренная с помощью цифрового микроскопа, а  $P_{CT}$  - статическая сила прижима.

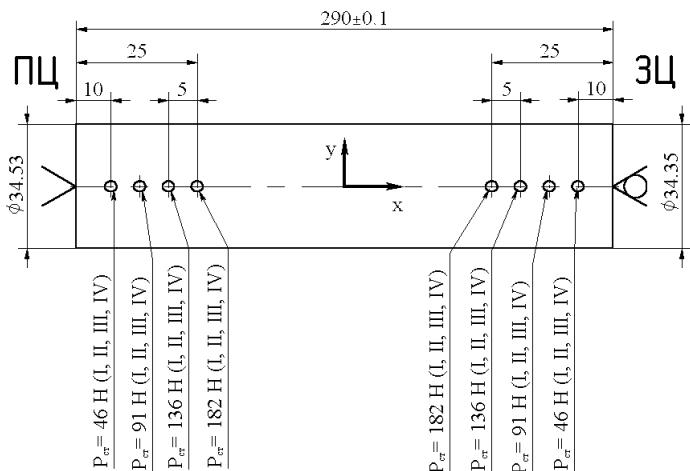


Рис. 2. Образец с пятнами контакта от индентора

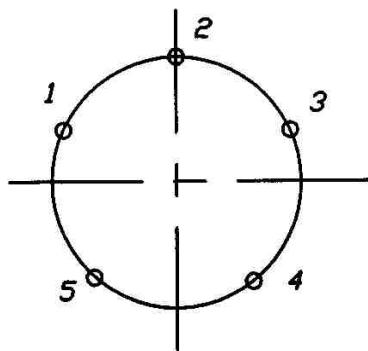
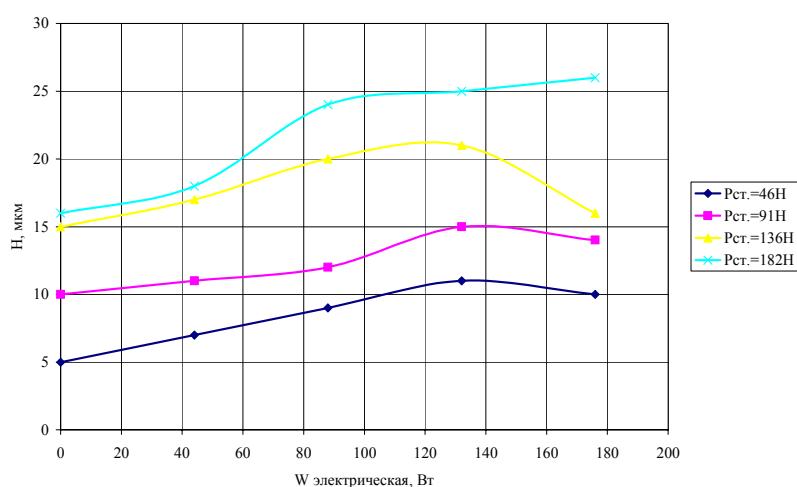


Рис. 3. Распределение пятен контакта по диаметру образца

Из полученной зависимости, очевидно, что чем пластичнее материал, тем большую деформацию он претерпевает. Статическое усилие прижима благоприятно влияет на уменьшение шероховатости поверхности при УФО [4,5], но для каждого материала существует свой предел значения  $P_{CT}$ .



определенную мощность генератора, глубина внедрения уменьшается. При дальнейшем увеличении

Рис. 4. Зависимость глубины внедрения от геометрии индентора при мощности генератора 176 Вт

увеличивать статическое усилие.

Используя графические зависимости, рис. 4, 5 и формулу 4 можно определить амплитуду колебаний индентора под нагрузкой на различных ступенях мощности генератора и изменении статического усилия прижима.

Амплитуда колебаний индентора:

$$\xi = h_K - h_{CT} \text{ [мкм]}, \quad (4)$$

где:  $h_K$  - глубина внедрения индентора в ультразвуковом поле (определяется экспериментально-аналитическим методом);  $h_{CT}$  - статическая глубина внедрения.

Для практических целей при разработке технологических процессов ультразвуковой финишной обработки важно знать зависимость амплитуды колебаний под нагрузкой (т.е. глубины наклена при обработке) от значения статического усилия прижима индентора к заготовке. По графическим

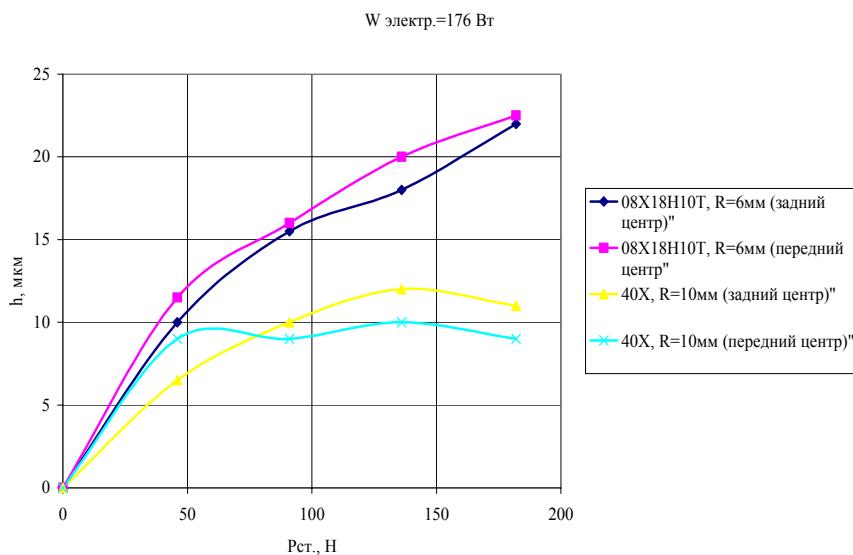
Те же измерения были проведены при включенном генераторе (с наложением ультразвука) при этом ступенчато менялась мощность генератора. Зависимости при включенном генераторе (с наложением ультразвука) на 1, 2, 3 и 4 ступенях приведены на рис. 5.

Очевидно, что увеличение мощности генератора приводит к возрастанию глубины внедрения индентора, причем, если при этом также повышается статическое усилие прижима, но до определенного предела. В случае, когда статическое усилие превышает

мощность генератора значение

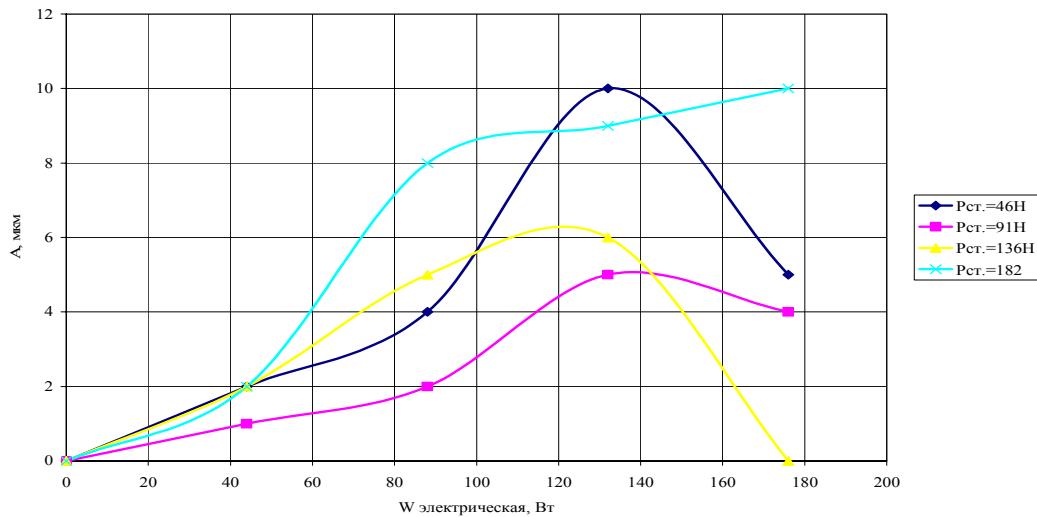
глубины внедрения опять

увеличивается, при этом можно



**Рис.5.** Изменение глубины внедрения индентора при наложении колебаний

- возрастает значения площади пятна контакта при повышении мощности генератора (динамическое внедрение);
- величина, на которую происходит динамическое внедрение, при неизменном статическом, представляет величину амплитуду колебательного смещения индентора;



**Рис. 6.** Изменение амплитуды колебательной скорости индентора от статического усилия прижима и мощности генератора

- для стали 08Х18Н10Т воздействие статического и динамического усилий на величину пятна практически линейное, что связано с высокой пластичностью материала;
- для стали 40Х неоднозначно влияние статического и динамического (мощности генератора) воздействия на величину пятна.
- варьируя геометрию индентора и учитывая значение статической силы прижима, параметров ультразвуковой системы и механических свойств обрабатываемого материала можно добиться требуемой глубины внедрения. При внедрении индентора на определенную глубину, в зависимости от диаметра обрабатываемой поверхности, можно получить определенную площадь контакта, что будет влиять на шероховатость обработанной поверхности.

зависимостям, рис. 6, можно судить о том, что амплитуда колебаний индентора в первую очередь зависит от свойств обрабатываемого материала. Скорее всего, при обработке различных материалов на одной и той же мощности генератора, изменение амплитуды колебаний является результатом влияния микротвердости обрабатываемого материала.

#### Выходы:

Обработка полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- очевидно влияние статической силы на величину пятна контакта - с её увеличением площадь пятна возрастает;

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Киричек А. В., Соловьев Д. Л., Лазуткин А. Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004. - 288 с.
2. ГОСТ 27955-88 (МЭК 782-84) Преобразователи ультразвуковые магнитострикционные. Методы измерения характеристик.
3. Макаров Л.О. Акустические измерения в процессах ультразвуковой технологии. М.: Машиностроение, 1983. - 56 с.
4. Муханов И.И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом. - М.: Машиностроение, 1978. - 44 с.
5. Муханов И.И., Голубев Ю.М., Комиссаров В.И. Ультразвуковая упрочняюще-чистовая обработка деталей машин и инструментов. - ГОСИНТИ, М., 1967, № 20-67-1323/17.
6. Рогов В.А., Малыгин В.И., Коломеец Н.П., Обловашка Н.С. Повышение качества поверхностного слоя изделий методом ультразвуковой финишной обработки // Технология Машиностроения.-2007.- № 10. С. 17-20.

УДК 534.114

**А.А. Вьюгинова**

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДОПОЛНЕННЫХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

ООО "Ультразвуковая техника - ИНЛАБ"

Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, Чугунная ул. 20

Тел.: (812) 329-4961; Факс: (812) 329-4962

E-mail: [alenaanovik@rambler.ru](mailto:alenaanovik@rambler.ru)

*Традиционно колебания двух взаимосвязанных элементов ультразвуковых технологических систем: пьезоэлектрического преобразователя и волновода описываются на основе одномерной модели колебаний. Такой анализ правомерен только для идеального случая. Существует несколько методов коррекции одномерной модели, дающие значительное повышение точности расчетов резонансных свойств стержневых конструкций и не требующие ее значительного усложнения. Один из них - метод дополненных модулей упругости. В данной работе рассматривается применение данного метода для анализа резонансных свойств пьезоэлектрического преобразователя с цилиндрическими накладками на основе уравнения полуволнового составного преобразователя, а также рассматривается применение данного метода для анализа цилиндрических ультразвуковых волноводов.*

Продольные гармонические колебания стержня переменного сечения описываются дифференциальным уравнением Вебстера [например, 1]. Такой анализ правомерен только для идеального случая, когда механические смещения постоянны по сечению стержня. В реальных условиях, если длина волны не намного больше по сравнению с размерами цилиндра в радиальном направлении, распространение волны не равномерно, а искажается из-за смещения в радиальном направлении, возникающего вследствие эффекта Пуассона, которое перпендикулярно направлению распространения волны. Это приводит к неравномерности амплитуды колебаний в выходном сечении стержня, кроме того, изменяется резонансная частота конструкции.

Таким образом, такой анализ является приблизительным, основное приближение – это то, что волновые фронты являются плоскими и параллельными. Повышение точности расчета резонансных свойств стержней при переходе от одномерной модели к трехмерной связано со значительными математическими трудностями, получаемые при этом решения трудно применимы на практике. Поэтому было разработано несколько методов коррекции одномерной модели, дающие в определенном диапазоне соотношений продольных и поперечных волновых размеров значительное повышение точности расчетов резонансных свойств стержневых конструкций и не требующие ее значительного усложнения. Первый метод – это, так называемая, поправка Рэлея для скорости распространения волны, второй метод носит название метода дополненных модулей упругости. В данной работе приводится анализ зависимостей собственной частоты основной продольной моды однородного титанового стержня от диаметра, полученных с использованием поправки Рэлея, метода дополненных модулей упругости и метода конечных элементов (МКЭ).

Поправка Рэлея для скорости распространения продольной волны в стержне конечного диаметра представляет собой следующее выражение [3]:

$$c = c_0 \left(1 - \frac{1}{16} \nu^2 k_0^2 d^2\right), \quad (1)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала цилиндра,  $d$  – его диаметр,  $k_0$  – исходное волновое число,  $c_0$  – скорость звука в данном материале.

Метод дополненных модулей упругости был впервые предложен в работе [2]. Основная его идея заключается в том, что взаимодействие двух мод колебаний – продольной и поперечной (радиальной, если

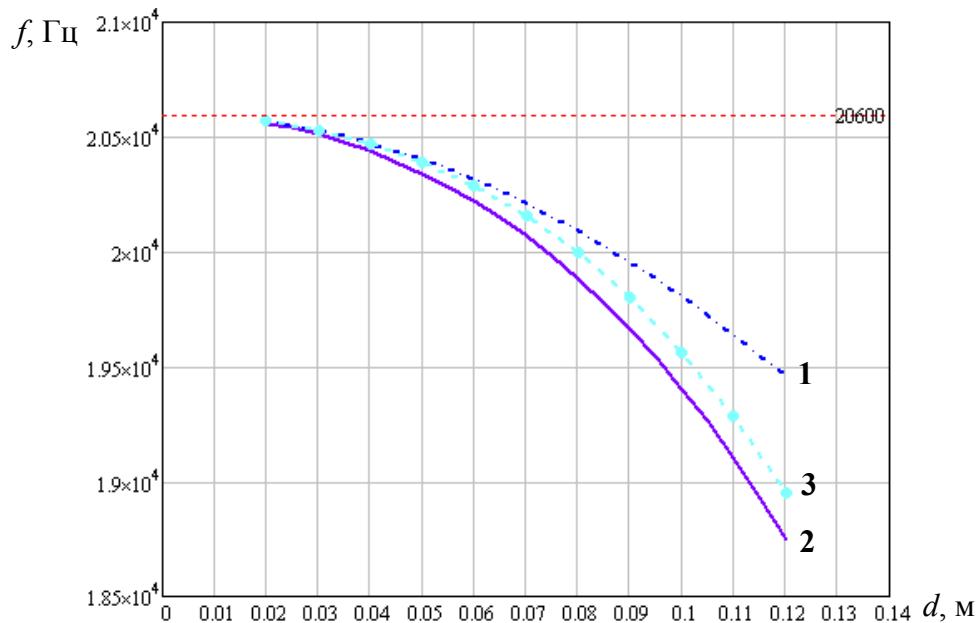
речь идет о колебании тел вращения), которое имеет место, когда диаметр стержня сравним с половиной длины волны в материале, может быть описано введением поправок в постоянные упругости материала. Окончательное выражение для дополненного модуля упругости для продольных колебаний с учетом возникновения радиальных колебаний имеет следующий вид:

$$E_z = \frac{E \left[ 1 - \nu^2 - \left( \frac{2\alpha}{k_0 d} \right)^2 \right]}{1 - 3\nu^2 - 2\nu^3 - \left( \frac{2\alpha}{k_0 d} \right)^2}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль Юнга материала стержня,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $k_0$  – исходное волновое число для полуволнового резонанса,  $\alpha$  – первый корень частотного уравнения, описывающего радиальные колебания тонкого диска, который приблизительно может быть определен как

$$\alpha = 1.84 + 0.68\nu. \quad (3)$$

Сравним результаты расчета зависимостей частоты основной продольной моды колебаний стержня от его диаметра, полученные с использованием поправки Рэлея, метода дополненных модулей упругости и МКЭ для однородного титанового стержня постоянного сечения длиной 120 мм (параметры титана следующие:  $\rho = 4500$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 110$  ГПа,  $\nu = 0.3$ ) при изменении его диаметра от 20 до 120 мм, т.е. от  $1/6\cdot\lambda/2$  до  $\lambda/2$ . Результаты приведены на рис. 1. Видно, что они хорошо согласуются между собой, при этом кривая расчета по МКЭ расположена между двумя кривыми, полученными аналитическими способами. Поскольку в расчетах по МКЭ использовалась твердотельная модель, более сложная и учитывающая большее количество процессов, происходящих при колебании стержня, МКЭ берется за эталонный способ расчета. Кроме того, на графике показано постоянное значение первой резонансной частоты стержня, полученное из условия полуволнового резонанса  $L = \lambda/2$ .



*Рис. 1.* Зависимость частоты основной продольной моды колебаний стержня от его диаметра, полученная с помощью поправки Рэлея (1), метода дополненных модулей упругости (2) и МКЭ (3)

Видно, что для меньших значений диаметра стержня, приблизительно до 0.08 м, т.е. до  $2/3\cdot\lambda/2$ , значения, полученные с использованием поправки Рэлея ближе к эталонным значениям частоты. При бо'льших значениях диаметра стержня более точный результат расчета собственной частоты дает метод дополненных модулей упругости.

Составные пьезоэлектрические преобразователи широко используются в промышленности. В традиционной теории, описывающей их колебания – в уравнении Ланжевена и уравнении полуволнового  $\lambda/2$  составного преобразователя [4], предполагается, что составной преобразователь также колебается в продольной моде и поперечные колебания не учитываются. Это означает, что поперечные размеры преобразователя должны быть меньше продольных. Для некоторых случаев, таких как ультразвуковая сварка металлов и пластмасс требуется очень большая мощность ультразвука. В этих случаях поперечные

размеры преобразователя превосходят четверть длины волны и одномерная теория дает большую погрешность.

В работе [5] предложен метод учета поперечных колебаний при определении частотных характеристик составного пьезоэлектрического преобразователя на основе метода дополненных модулей упругости. Сечения накладок полагаются квадратными, узловая плоскость находится в среднем сечении. В данной работе рассматривается применение этого метода для преобразователя с цилиндрическими накладками при условии расположения узловой плоскости в произвольном сечении.

Рассмотрим составной пьезоэлектрический преобразователь с цилиндрическими накладками (рис. 2). Индекс  $h$  относится к передней накладке,  $t$  – к задней, ноль указывает на пьезопластины.

Выражения дополненных модулей упругости для пьезокерамических колец в радиальном и продольном направлении имеют вид [5]:

$$\begin{aligned} E_{r0} &= \left[ S_{11}^E (1 - \nu_{12}^2 - \nu_{13} n_0 (1 + \nu_{12})) \right]^{-1} \\ E_{z0} &= \left[ S_{33}^E (1 - 2\nu_{31} / n_0) \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $S_{ij}^E$  – упругие податливости пьезокерамики,  $\nu_{12} = -S_{12}^E / S_{11}^E$ ,  $\nu_{13} = -S_{13}^E / S_{11}^E$ ,  $\nu_{31} = -S_{31}^E / S_{33}^E$ ,  $n_0$  – коэффициент связи. Коэффициент связи продольных и поперечных колебаний для пьезокерамических колец выглядит следующим образом:

$$n_0 = \frac{1 - \nu_{12}^2 - c_{01}^2 R^2 / \omega^2 a_0^2}{\nu_{13} (1 + \nu_{12})}, \quad (4)$$

где  $c_{01}^2 = 1 / S_{11}^E \rho_0$ ,  $\omega$  – круговая частота колебаний,  $R = k_{ro} a_0$  – первый корень частотного уравнения радиальных колебаний диска с отверстием, которое имеет следующий вид [там же]:

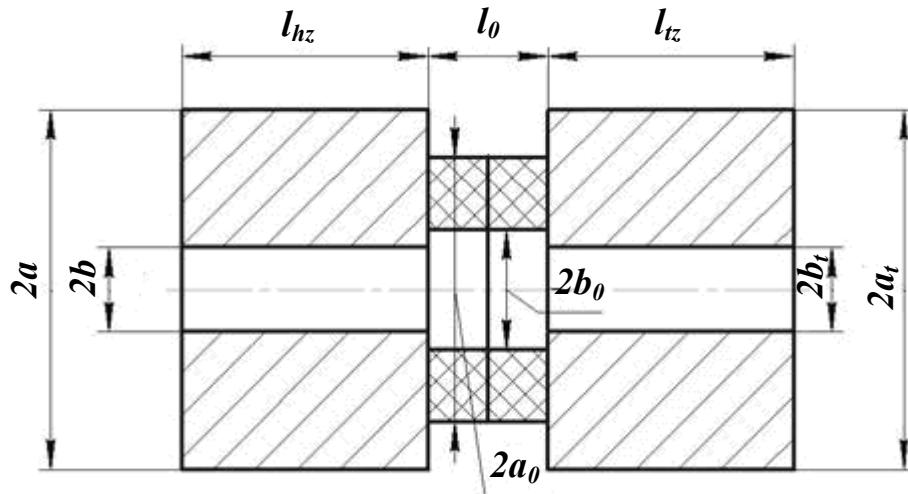


Рис. 2. Составной пьезоэлектрический преобразователь с цилиндрическими накладками и узловой плоскостью, расположенной в произвольном сечении

$$\frac{k_{ro} a_0 N_0(k_{ro} a_0) - (1 - \nu_{12}) N_1(k_{ro} a_0)}{k_{ro} a_0 J_0(k_{ro} a_0) - (1 - \nu_{12}) J_1(k_{ro} a_0)} = \frac{k_{ro} b_0 N_0(k_{ro} b_0) - (1 - \nu_{12}) N_1(k_{ro} b_0)}{k_{ro} b_0 J_0(k_{ro} b_0) - (1 - \nu_{12}) J_1(k_{ro} b_0)}, \quad (5)$$

где  $J_0$ ,  $J_1$  и  $N_0$ ,  $N_1$  – функции Бесселя первого и второго рода нулевого и первого порядка; корень уравнения  $R$  является функцией коэффициента Пуассона и отношения внешнего и внутреннего радиусов кольца.

Частотные уравнения для радиальных колебаний накладок будут аналогичны уравнению (5). Пусть  $R_h$  и  $R_t$  – корни частотных уравнений для радиальных колебаний передней и задней накладки соответственно. Тогда коэффициент связи для передней накладки:

$$n_h = \frac{1 - v_h^2 - c_h^2 R_h^2 / \omega^2 a^2}{v_h (1 + v_h)}, \quad (6)$$

где  $c_h$  – скорость звука в материале передней накладки.

Для задней накладки коэффициент связи:

$$n_t = \frac{1 - v_t^2 - c_t^2 R_t^2 / \omega^2 a_t^2}{v_t (1 + v_t)}, \quad (7)$$

где  $c_t$  – скорость звука в материале задней накладки.

Выражения дополненных модулей упругости для накладок:

$$\begin{aligned} E_{ri} &= E_i (1 - v_i^2 + v_i n_i (1 + v_i))^{-1} \\ E_{zi} &= E_i (1 + 2v_i / n_i)^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $i$  соответствует либо передней  $h$ , либо задней накладке  $t$ .

Запишем частотное уравнение для продольных колебаний преобразователя, содержащее в себе параметры обеих накладок и пьезокерамических колец [6]:

$$\begin{aligned} \cos(k_{tz} l_{tz}) \sin(k_o l_0) \cos(k_{hz} l_{hz}) - z_{t0} z_{h0} \sin(k_{tz} l_{tz}) \sin(k_0 l_0) \sin(k_{hz} l_{hz}) + \\ + z_{t0} \sin(k_{tz} l_{tz}) \cos(k_0 l_0) \cos(k_{hz} l_{hz}) + z_{h0} \cos(k_{tz} l_{tz}) \cos(k_0 l_0) \sin(k_{hz} l_{hz}) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

где  $k_{iz} = \omega/c_{iz}$ ,  $k_0 = \omega/c_{0z}$ ,  $c_{iz} = (E_{zi}/\rho)^{1/2}$ ,  $c_{0z} = (E_{z0}/\rho)^{1/2}$ ,  $z_{t0} = z_t/z_0$ ,  $z_{h0} = z_h/z_0$ ,  $z_t = \rho_t c_t S_t$ ,  $z_h = \rho_h c_h S_h$ ,  $z_0 = \rho_0 c_0 S_0$ ,  $S_h$ ,  $S_t$  и  $S_0$  – площади передней, задней накладок и пьезокерамических колец.

На основе полученного частотного уравнения построим зависимость частоты колебаний составного преобразователя от длины передней накладки для конкретного случая. Геометрические размеры элементов преобразователя следующие: внешний диаметр обеих накладок 60 мм, внутренний – 12 мм, длина задней накладки фиксирована и равна 30 мм. Внешний диаметр пьезокерамических колец – 35 мм, внутренний – 13 мм, толщина 10 мм, параметры пьезокерамики APC-841 следующие:  $\rho = 7600$ ,  $S_{11} = 12.3 \cdot 10^{-12}$  Па $^{-1}$ ,  $S_{33} = 15.5 \cdot 10^{-12}$  Па $^{-1}$ ,  $v_{12} = 0.34$ ,  $v_{13} = 0.43$ . Параметры материалов накладок: для титана такие же, как в предыдущем случае, для стали:  $\rho = 7800$ ,  $E = 210$  ГПа,  $v = 0.3$ , для алюминия:  $\rho = 2700$ ,  $E = 70$  ГПа,  $v = 0.34$ .

Графики зависимостей собственной частоты преобразователя от толщины передней накладки для двух вариантов материалов накладок: титан-титан и сталь-алюминий представлены на рис. 3.

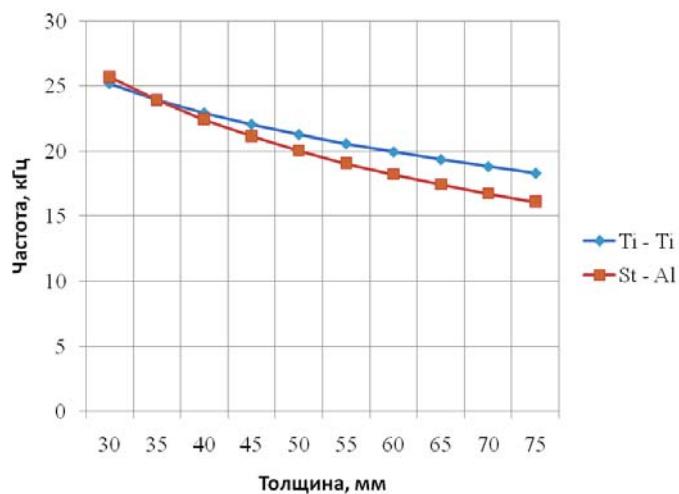


Рис. 3. Зависимости собственной частоты преобразователя от толщины передней накладки

Как можно заметить, при небольших размерах накладки, преобразователь сталь-алюминий имеет более высокую собственную частоту. При увеличении толщины накладки более высокую собственную частоту имеет преобразователь с титановыми накладками.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Меркулов Л. Г., Харитонов А. В. Теория и расчет составных концентраторов // Акустический журнал. – 1959. – 5. – 2. – С. 183-190

2. E. Mori, K. Itoh, A. Imamura. Analysis of short column vibrator by apparent elasticity method and its application // Ultrasonics International 1977 conference proceedings. – 1977. – p. 262-265
3. Дж. В. Стремм (Лорд Рэлей). Теория звука, т. 1. М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – С. 274
4. Neppiras, E A. The prestressed piezoelectric sandwich transducer Ultrasonics International 1973 Conference Proceedings Butterworths, Borough Green, UK (1973)
5. Shuyu, L. Design of Piezoelectric Sandwich Ultrasonic Transducers with Large Cross-Section // Applied Acoustics, 1995 – v. 44 – p. 249-257
6. Dominguez, R., Ranz, C. Sandwich transducer, Simplified Mathematical Model I // Acustica, 1973 – v. 29 – № 3 – p. 156-161

УДК 62-791.2

**В.К. Хамидуллин<sup>1</sup>, Р.Н. Малаханов<sup>1</sup>, А.А. Гнедов<sup>2</sup>**

**УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ДАТЧИКИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ  
ВОЛНОВОДАМИ ДЛЯ РАСХОДОМЕРОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ЖИДКИХ СРЕД**

<sup>1</sup>Гос. Университет Аэрокосмического Приборостроения  
Россия, 190000, С. Петербург, ул. Большая Морская, д.67  
Тел.: (812) 494-7041; E-mail: vakif\_hamidullin@mail.ru

<sup>2</sup>ЗАО Взлет, Россия, 190121,  
ул. Мастерская, д.9

*Исследовано акустическое поле, возбуждаемое ультразвуковым датчиком с длинным многослойным волноводом кольцевой структуры. Рассчитано трехмерное акустическое поле, возникающее при импульсном воздействии плоских кольцевых излучателей. Требуемые параметры волновода были достигнуты подбором ширины колец и зазора между ними. Многослойные волноводы трубчатой конструкции были изготовлены с использованием фольги из углеродистой стали толщиной 0,2 мм и нержавеющей стали толщиной 0,1 мм. Проведены натурные испытания датчиков с волноводами длиной 60 мм. Испытания показали прохождение короткого волнового пакета на частоте 1 МГц с отношением сигнал/шум около 20.*

## ВВЕДЕНИЕ

При измерении расхода жидкости в трубопроводе время-импульсным методом в широком диапазоне температур и давлений необходимо применять датчики с металлическими волноводами. Длинный волновод обеспечивает защиту пьезоэлемента от высоких температур и давлений, удаляя его на достаточное расстояние. Волновод должен эффективно передавать акустический сигнал в движущуюся жидкость и принимать сигнал из жидкости. Для корректного измерения скорости жидкости необходимо сформировать узконаправленный луч.

В данной работе описаны теоретические и практические результаты по ограничению влияния дифракции и паразитных эхо-сигналов при передаче в жидкость акустического сигнала от волновода с многослойной кольцевой структурой. Основная задача – получить достаточно короткий импульс с быстрым затуханием.

Эффект дифракции акустической волны приводит к увеличению длительности переходного процесса. Для уменьшения краевых эффектов применяются различные рассеивающие структуры. Не так давно Ларри Линнворт и др. [1] применили пучок тонких металлических стержней диаметром по 1 мм, плотно упакованных в цилиндрическую обойму. Йоко Оно, Чен и др. [2] для борьбы с паразитными эхо-сигналами покрыли волновод крупинками стального порошка. Разработано несколько вариантов волноводов и демпферов из трубок, например, несколько концентрических тонкостенных трубок [1] или рулон из металлического листа [3, 4].

Исследование акустического поля на излучающем конце датчика проведено методом импульсного возмущения. Излучающая и приемная поверхность волновода рассматривается как набор концентрических колец. Проведен расчет 3-мерного акустического поля, возникающего после одиночного импульсного сигнала. Излучатель - набор плоских колец разного профиля, например, конец волновода, составленного из вложенных друг в друга трубок.

## РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ПОЛЯ КОЛЬЦЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Метод импульсного возмущения описан в 1939 году А.А. Харкевичем [5]. П.Р. Степанишен [6] представил связь между распространением импульсного возмущения и нормальной скоростью частиц в форме интеграла по объему и по времени. Метод импульсного возмущения был далее применен для кольцевых датчиков Харкевичем [7], Хайманом и Вейтом [8] и другими исследователями. Переходное поле для вогнутой поверхности из концентрических колец было исследовано Ардити и др. [9].

Теоретически, луч без дифракции может возбуждаться только бесконечной апертурой. На практике луч с ограниченной дифракцией в некотором приближении можно получить и на конечной апертуре. Лу и Гринлиф [10] предложили возбуждать кольца не одновременно, а с задержкой, вычисленной как функция Бесселя от радиуса кольца. В этом случае удается получить луч с малой дифракцией на плоской конечной структуре из концентрических колец. Для этого радиусы колец должны давать нулевые значения функции Бесселя. В [11] С. Хольм показал, что для функции Бесселя нулевого порядка можно возбудить луч с ограниченной дифракцией датчиком кольцевой структуры с элементами одинаковой площади.

Принципиальная цель данной работы – изучение эффекта кольцевого квантования применительно к лучу с ограниченной дифракцией для датчика с многослойным волноводом.

Метод импульсного возмущения вычисляет реакцию на одиночный импульс. Реакция зависит от формы излучающей области датчика и координат точки наблюдения. Рассмотрим давление  $p$  в точке  $r$  в момент времени  $t$ :

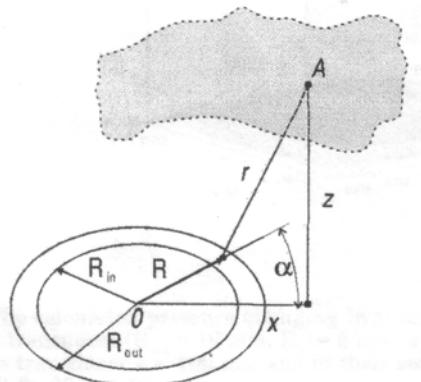
$$p(r, t) = \rho \cdot \frac{\partial}{\partial t} X(r, t), \quad (1)$$

где  $X$  – потенциал скорости,  $\rho$  – плотность среды.

Точное выражение для вычисления объемной реакции на импульс от плоского кольца можно получить согласно [5]. Элементарное давление в точке наблюдения  $A$  (Рис. 1) на плоскости, параллельной поверхности датчика и расположенной на расстоянии  $z$  от конца датчика, определяется выражением

$$\delta p(r, t) = \rho \cdot \frac{\partial}{\partial t} (dX(r, t)) = \frac{\rho v ds}{2\pi} \delta\left(t - \frac{r}{c}\right), \quad (2)$$

где  $ds$  – элементарная площадь на поверхности датчика,  $c$  – скорость звука в среде,  $v$  – нормальная составляющая скорости частиц на поверхности апертуры,  $r$  – расстояние от точки  $A$  до элементарной площади  $ds$  кольца,  $\delta(\cdot)$  – дельта-функция Дирака.

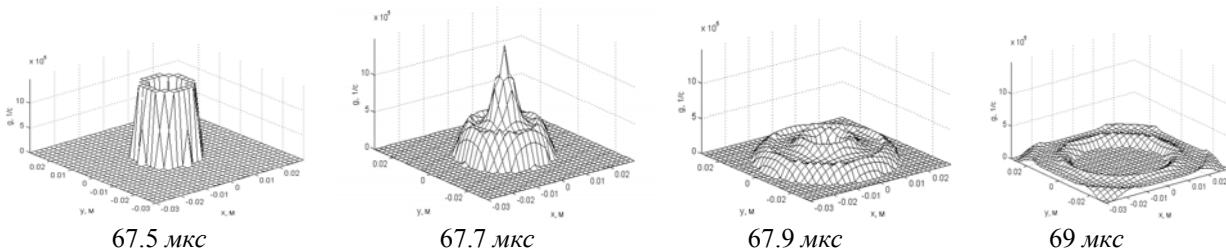


**Рис. 1.** Геометрическая схема для кольцевого датчика.

Теперь в соответствии с принципом Гюйгенса мы получаем выражение для расчета давления в точке  $A$  как реакции на импульс:

$$p = \frac{\rho v}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{R_{in}}^{R_{out}} \frac{1}{r(R, \alpha)} \delta\left(t - \frac{r(R, \alpha)}{c}\right) R dR d\alpha \quad (3)$$

Функция  $r(R, \alpha)$  в (3) может быть найдена по геометрической схеме на Рис.1.



**Рис. 2.** Переходной процесс для поля давления в 3-мерном виде в дискретные моменты времени для апертуры датчика в виде широкого кольца ( $R_{out}=10$ мм,  $R_{in}=5$ мм,  $c=1482$ м/с), возбужденного одиночным импульсом, в параллельной плоскости на удалении  $z=100$ мм.

Взяв двойной интеграл в (3), мы получаем точное выражение для вычисления давления в точке  $A$

$$p = \frac{\rho c v}{\pi} \left[ (\pi + \beta(ct)) h\left(t - \frac{r_1}{c}\right) - (\pi + \beta_1(ct)) h\left(t - \frac{r_2}{c}\right) \right] + \frac{\rho c v}{\pi} \left[ (\pi + \beta(ct)) h\left(t - \frac{r_3}{c}\right) - (\pi + \beta_1(ct)) h\left(t - \frac{r_4}{c}\right) \right] \quad (4)$$

$$\text{где } \beta(ct) = \arccos \frac{c^2 t^2 - z^2 - R_{out}^2 + x^2}{2x\sqrt{c^2 t^2 - z^2}}, \quad \beta_1(ct) = \arccos \frac{c^2 t^2 - z^2 - R_{in}^2 + x^2}{2x\sqrt{c^2 t^2 - z^2}},$$

$$r_1 = \sqrt{z^2 + (R_{in} - x)^2}, \quad r_2 = \sqrt{z^2 + (R_{out} - x)^2}, \quad r_3 = \sqrt{z^2 + (R_{in} + x)^2}, \quad r_4 = \sqrt{z^2 + (R_{out} + x)^2}$$

$R_{in}$  и  $R_{out}$  - внутренний и внешний радиусы кольца соответственно,  $h(t)$ -функция Хевисайда,  $v$ -константа.

Рассчитанные на основании (4) поля давления изображены на Рис. 2 и Рис. 3(a)) [12]. Аналогичные результаты для очень тонкого кольца показаны на Рис.3(b). Первый максимум давления приходит через 67.47 мкс после одиночного импульса и повторяет форму датчика. Следующий максимум появляется, когда большинство волн собирается в центральной точке. Это время вычисляется как время прихода волны из центральной (по ширине) области кольца, для  $R_m = 7,5$  мм оно составляет  $t_m = 67.66$  мкс. Результаты для широкого кольца показаны на Рис.2 и Рис. 3a.

В случае Рис. 3,а процесс затухания медленный и передаваемая энергия велика. В случае узкого кольца (Рис.3 b) затухание происходит быстрее, но и передаваемая энергия существенно меньше. Требуется подобрать количество колец, их ширину и зазоры между ними, чтобы получить требуемую форму суммарного акустического поля.

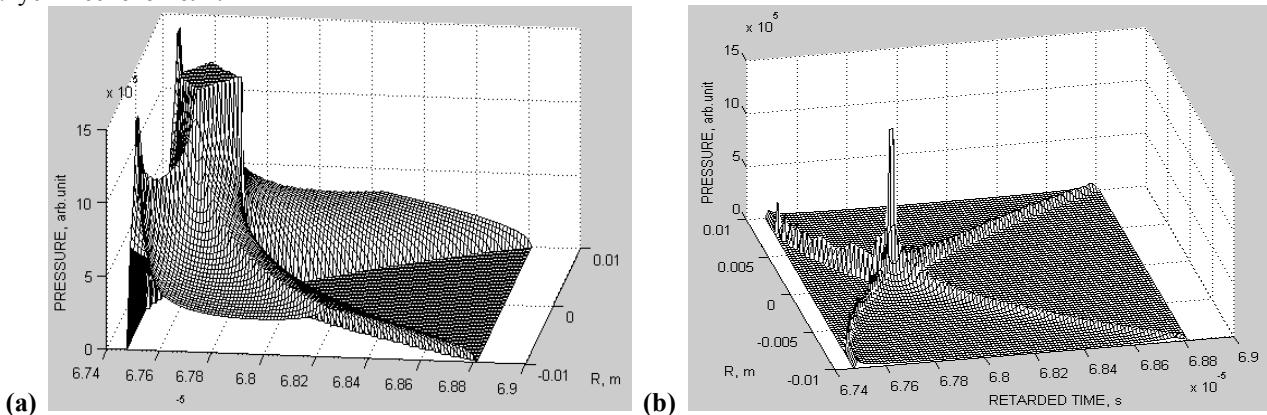


Рис.3. Переходной процесс (диаметральное сечение) для поля давления во времени: (а) широкое кольцо( $R_{in}=5$  мм,  $R_{out}=10$  мм), (б) узкое кольцо ( $R_{in}=9.7$  мм,  $R_{out}=10$  мм).

Для время-импульсного метода измерения расхода требуется четкий передний фронт акустического сигнала и быстрое затухание. Два варианта кольцевой апертуры показаны на Рис.4 для: (а) распределения Бесселя из 6 колец [10, 11] и (б) оригинального распределения колец, обеспечивающего равную амплитуду и длительность импульсов, порожденных каждым кольцом из набора 11 колец. По диаграммам, приведенным на Рис.4 (б) и на Рис.4(а), легко видеть, что переходный процесс заканчивается быстрее, чем в случае распределения Бесселя.

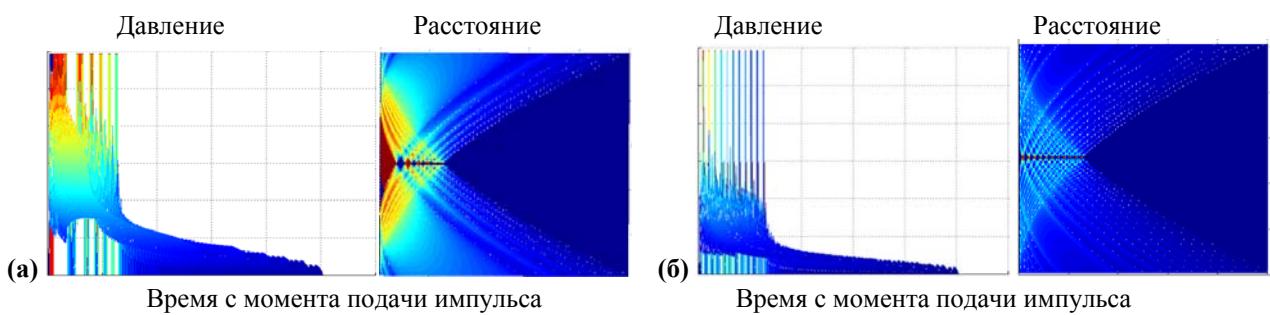


Рис. 4. Вид сбоку и вид сверху на 3-мерный (время, давление, расстояние) переходный процесс для поля, возбужденного одиночным импульсом (сечение по диаметру) для датчиков с различной апертурой колец: распределение Бесселя из 6 колец (а) и оригинальный набор из 11 колец (б).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для натурного эксперимента были изготовлены образцы с толщиной кольца от максимальной до минимально возможной технологически (Рис. 5).

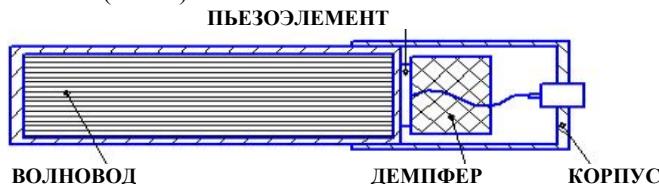
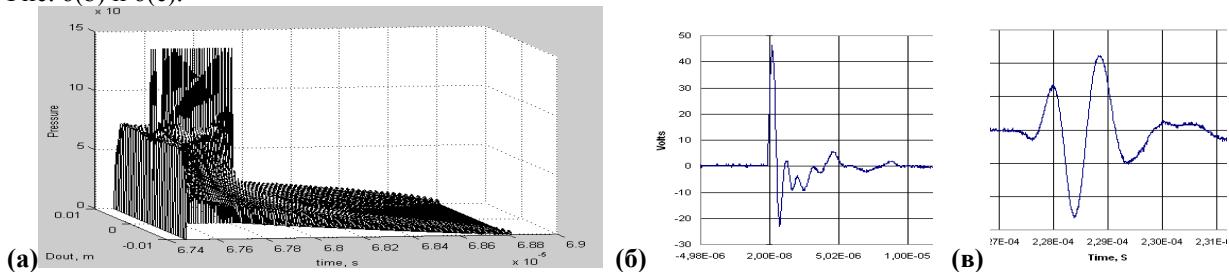


Рис. 5. Датчик с металлическим многослойным волноводом.

Было изготовлено 14 разных вариантов волноводов: сплошной, из нескольких трубок и из рулона фольги. Длина волноводов составила 60 и 100мм, внешний диаметр стального кожуха  $D_{out}$  32 мм, диаметр пьезоэлемента 20 мм, применялась фольга из меди и стальных сплавов толщиной 0,2, 0,1 и 0,06мм. Короткий импульс длительностью в один период на частоте 1 МГц передавался от излучателя к приемнику через слой воды толщиной 100 мм и 200 мм. Для излучателя и приемника использовались датчики одинаковой конструкции. Самые лучшие результаты были получены для фольги из углеродистой стали толщиной 0,2 мм и фольги из нержавеющей стали толщиной 0,1мм. Осциллограммы переданного и принятого сигналов приведены на Рис. 6(б) и 6(с).



**Рис.6.** Расчет поля давления для 50 колец (а), осциллограмма на пьезоэлементе-излучателе (б), осциллограмма на приемнике для датчиков с 60-мм волноводами из фольги нержавеющей стали толщиной 0,1 мм для 1 МГц (с).

Для фольги толщиной 0,1мм получилось 50 слоев. Расчет распространения импульсного возмущения для этого случая показано на Рис. 6(а). В первый момент проходит очень короткий импульс длительностью менее 1 нс с максимальной амплитудой давления. Затем в течение около 300 нс наблюдается 50 импульсов игольчатой формы для каждого из 50 колец. В связи с невозможностью измерить непосредственно объемное поле давления с разрешением по времени порядка 1 нс приходится ограничиться теоретическим расчетом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод расчета реакции акустического поля преобразователя с большим количеством концентрических кольцевых элементов на импульсное воздействие, что обеспечивает возможность оптимизации параметров с точки зрения уменьшения влияния дифракции. Представлен пример практической реализации преобразователя с многослойным достаточно длинным волноводом трубчатой конструкции с использованием фольги из углеродистой стали толщиной 0,2 мм и нержавеющей стали толщиной 0,1 мм. Использование рассмотренных датчиков в ультразвуковых расходомерах обеспечивает возможность измерения расхода высокотемпературных жидкостей на нефтеперерабатывающих заводах, ядерной энергетике и т.д.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. C. Lynnworth, Y. Liu and J. A. Umina, Extensional bundle waveguide techniques for measuring flow of hot fluids// IEEE Trans. Ultason., Ferroelect., Freq. Contr./ vol.52, no. 4, pp.538-544, April 2005.
- [2] Y. Ono, C.-K. Jen. J.-F. Moisan and C.-Y. Su, Aluminum buffer rods for ultrasonic monitoring at elevated temperatures// IEEE Trans. Ultason., Ferroelect., Freq. Contr./ vol.52, no. 6, pp.1042-1047, June 2005.
- [3] A. M. Heijnsdijk and J. M. van der Klooster, //Ultrasonic waveguide/ U.S. Patent 6,400,648, Jun. 4, 2002.
- [4] Н.В. Бабкин, Демпфер для ультразвукового датчика/ патент СССР, 172543, 1964.
- [5] А.А. Харкевич, Дифракция упругой взрывной волны на прямолинейной грани и круглом отверстии// Журнал технической физики, АН СССР/ Москва, том 9, № 6, 1939.
- [6] P. R. Stepanishen, Transient radiation from pistons in an infinite planar baffle// J. Acoust. Soc. Am.(49), pp. 1629-1638, 1971.
- [7] А.А. Харкевич, Теория электроакустических преобразователей волновые процессы. Москва, Наука, 1973.
- [8] A. J. Hayman and J. P. Weight, Transmission and Reception of Short Ultrasonic Pulses by Circular and Square Transducers// J. Acoust. Soc. Am. 66 (4), Oct. 1979.
- [9] M. Ardit, F. S. Foster, and J. W. Hunt, Transient field of concave annular arrays// Ultrasonic Images, vol. 3, pp. 37-61, 1981.
- [10] J.-Y. Lu and J. F. Greenleaf, Ultrasonic nondiffracting transducer for medical imaging// IEEE Trans. Ultason., Ferroelect., Freq. Contr., vol.37, no. 5, pp. 438-447, September 1990.
- [11] S. Holm, Bessel and conical beams and approximation with annular arrays // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol.45, no. 3, pp. 712-718, May 1998.
- [12] V. K. Hamidullin, R. N. Malakhannov and E. V. Khamidoullina, Statics and dynamics of ultrasonic flowmeters as sensing elements for power control system // Proc. of 2001 IEEE Joint International Conference on Control Application and International Symposium on Intelligent Control, September 5-7, 2001, Mexico City, Mexico, pp. 680-685.

УДК 542.34

**Н.В. Дежкунов<sup>a</sup>, А.В. Котухов<sup>a</sup>, А. Франческутто<sup>b</sup>, А.Л. Николаев<sup>b</sup>, А.В. Гопин<sup>b</sup>**  
**ЗАВИСИМОСТЬ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИИ В ФОКУСИРОВАННОМ  
УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ ОТ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСОВ ПОЛЯ**

<sup>a</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Ул. П. Бровки 6, 220027, Минск, Беларусь Тел.: + 375-172-39-86-35

E-mail: [dnv@bsuir.by](mailto:dnv@bsuir.by)

<sup>b</sup>Триестский университет, Италия

<sup>b</sup>Московский государственный университет, Россия

*Показано, что зависимости активности кавитации от приложенного к излучателю напряжения, от длительности и периода следования импульсов ультразвука имеют вид кривой с максимумом. Такой характер полученных зависимостей обусловлен конкурирующим влиянием двух факторов, связанных с увеличением концентрации кавитационных полостей и их размеров в кавитационной области: увеличением числа кавитационных событий (коллапсов) в единицу времени, с одной стороны, и уменьшение эффективности преобразования и концентрации энергии пузырьками при захлопывании - с другой.*

## **Введение**

В ряде работ показано, что активность кавитации, оцениваемая, например, по интенсивности свечения, генерируемого кавитационной областью - звуколюминесценции (ЗЛ) [1-5] или по скорости выделения йода из раствора йодистого калия [6 - 10] может быть существенно повышена при импульсном модулировании ультразвукового поля. В данной работе мы попытались выработать подходы к оптимизации режима озвучивания, обеспечивающего максимум активности кавитации в импульсно модулированном ультразвуковом поле.

## **Установка и методика**

Детальное описание методики и установки измерений приведено в работе [4]. Рабочая емкость представляет собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 10 см и высотой 16 см. На боковой поверхности ячейки навита медная трубка, через которую прокачивается терmostатирующая жидкость. Ячейка заполнялась рабочей жидкостью и после отстаивания в течение 48 часов жидкость дегазировали под действием ультразвука в течение 20 мин при напряжении на излучателе 150 Вольт.

Газосодержание при этом уменьшалось на 20-25% по сравнению с равновесным [31]. Предварительная частичная дегазация жидкости существенно повышает воспроизводимость результатов так как после такой обработки газосодержание под действием ультразвука при проведении эксперимента практически не меняется. После дегазации ячейку закрывали крышкой и жидкость снова отстаивалась в течение 15 часов.

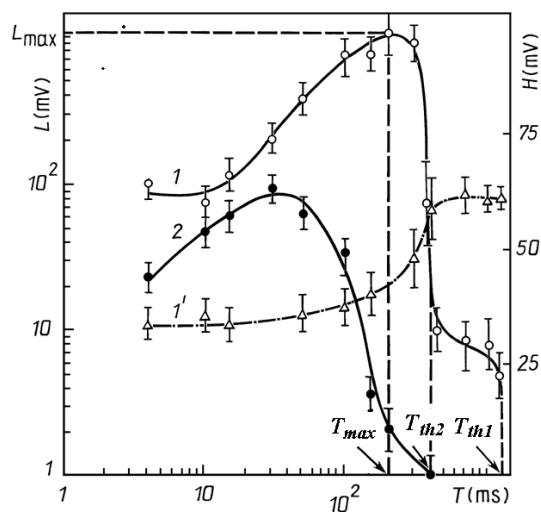
При исследовании зависимости интенсивности ЗЛ от периода следования импульсов Т величину Т меняли начиная с  $T = 2000$  с в сторону уменьшения, т. е. слева направо на рис. 2 и 4. Длительность же импульса  $\tau$  меняли увеличивая  $\tau$  от 0.1 мс. Такой порядок изменения Т и  $\tau$  был выбран с тем, чтобы по возможности уменьшить влияние предыдущего эксперимента на результат последующего. В промежутке времени между двумя последовательными импульсами жидкость релаксирует в направлении к исходному состоянию. Ясно, что чем короче импульс, (т. е. чем меньше  $\tau$ ) и чем больше промежуток времени  $T-\tau$  между двумя импульсами (т. е. чем больше Т при данном  $\tau$ ), тем ближе к исходному состоянию успевает релаксировать жидкость за время между двумя последовательными импульсами ультразвуковых колебаний.

Измерения производились после 10-секундной экспозиции при выбранном значении Т или  $\tau$ . Время отстаивания между двумя измерениями - 30 сек, время отстаивания после серии измерений (запись одной зависимости) - 30 мин.

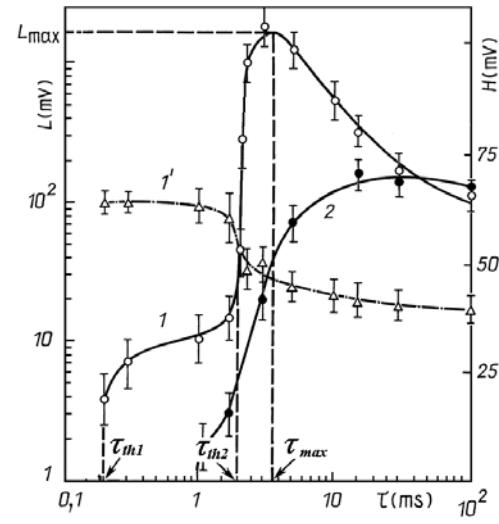
## **Результаты**

На рис. 1 и 2 представлены характерные зависимости интенсивности ЗЛ (сплошные линии) и зависимости сигнала, снимаемого с гидрофона (штриховые линии) от периода следования импульсов Т ультразвука и от длительности импульсов  $\tau$ . При уменьшении периода следования импульсов Т интенсивность ЗЛ увеличивается вначале медленно, а затем, начиная с некоторых критических значений Т – налодается зачительное увеличение наклона зависимости  $L(\tau)$ . Интенсивность ЗЛ достигает максимума и начинает уменьшаться, стремясь к некоторому предельному значению. При больших интенсивностях ультразвука (кривая 1. рис. 1) увеличение интенсивности ЗЛ носит явно выраженный скачкообразный (пороговый) характер, при котором уменьшение Т на 20 – 30% приводит к увеличению L почти на два порядка.

Таким образом, можно выделить два порога кавитации: первый ( $T_{th1}$ ) соответствует возникновению звуколюминесценции, второй ( $T_{th2}$ ) - значительному увеличению ее интенсивности (или изменению наклона зависимости  $L(T)$ ). Отметим, что впервые этот эффект наблюдался нами в [4]. Интенсивность сигнала, принимаемого гидрофоном (штриховая линия), вначале меняется незначительно, точнее – в пределах ошибки измерений. При  $T = T_{th2}$  начинается быстрое падение выходного сигнала гидрофона, что указывает на соответствующее увеличение поглощения ультразвука. Аналогичным же образом изменяется величина  $L$  с ростом длительности импульсов  $\tau$  при постоянных  $T$  и  $U$  (рис. 2). Как и в первом случае, можно выделить два порога  $\tau_{th1}$  и  $\tau_{th2}$ . При  $\tau = \tau_{th1}$  звуколюминесценция возникает, при  $\tau = \tau_{th2}$  наблюдается резкое изменение наклона зависимости  $L(\tau)$  (кривая 1, рис. 2) и увеличение поглощения ультразвука в кавитационной области (кривая 1, рис. 2). После достижения максимального значения  $L$ , активность кавитации снижается. Величины  $T$  и  $\tau$ , соответствующие максимальным значениям интенсивности ЗЛ в дальнейшем будем обозначать как  $T_{max}$  и  $\tau_{max}$  соответственно.

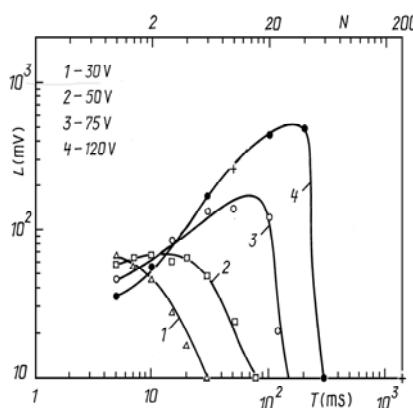


**Рис. 1.** Зависимости  $L$  (кривые 1, 2) и выходного сигнала гидрофона  $H$  (кривая 1') от периода следования  $T$  импульсов ультразвукового поля: рабочая жидкость – дистиллированная вода,  $t = 23^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3$  мс,  $U = 120$  В (1) и  $55$  В (2). Величины  $T_{th2}$ ,  $T_{th1}$  и  $T_{max}$  показаны для кривой 1

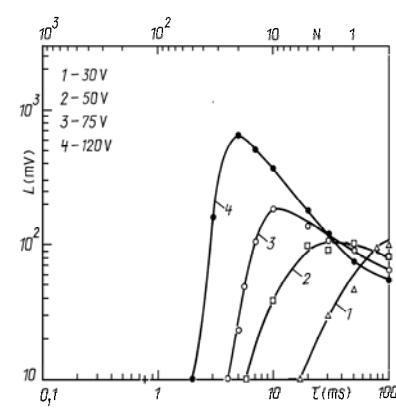


**Рис. 2.** Зависимости  $L$  (кривые 1, 2) и выходного сигнала гидрофона  $H$  (кривая 1') от длительности  $\tau$  импульсов ультразвукового поля: рабочая жидкость – дистиллированная вода,  $t = 23^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3$  мс,  $U = 120$  В (1) и  $55$  В (2). Величины  $\tau_{th2}$ ,  $\tau_{th1}$  и  $\tau_{max}$  показаны для кривой 1

На рис. 3 и 4 представлены интенсивности ЗЛ от  $T$  и  $\tau$  для различных интенсивностей ультразвука. Из представленных графиков видно, что при увеличении напряжения, приложенного к излучателю, максимум интенсивности ЗЛ смещается в сторону больших  $T$  (рис. 3) и меньших  $\tau$  (рис. 4), соответственно пороговые значения  $\tau$  уменьшаются, а пороговые значения  $T$  увеличиваются с ростом  $U$ .

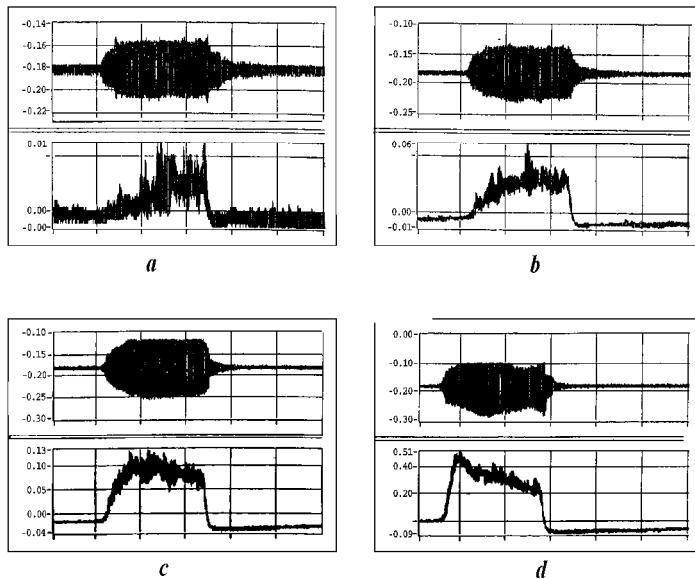


**Рис. 3.** Зависимости  $L$  от периода следования  $T$  импульсов ультразвукового поля для различных напряжений  $U$  на излучателе: рабочая жидкость – дистиллированная вода,  $t = 23^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3$  мс,  $U = 30$  В (1),  $50$  (2),  $75$  (3) и  $120$  В (4)



**Рис. 4.** Зависимости  $L$  от длительности  $\tau$  импульсов ультразвукового поля для различных напряжений  $U$  на излучателе: рабочая жидкость – дистиллированная вода,  $t = 23^\circ\text{C}$ ,  $T = 30$  мс,  $U = 30$  В (1),  $50$  (2),  $75$  (3) и  $120$  В (4)

На рис. 5 представлены результаты одновременной регистрации выходных сигналов гидрофона (верхняя осциллограмма) и фотоумножителя (нижняя) для различных величин периода  $T$ . При  $T_{th2} < T < T_{th1}$  (рис. 5,а) интенсивность ЗЛ увеличивается за время импульса, при  $T \sim T_{max}$  (рис. 5,а и 5,б) L меняется мало, либо вначале быстро достигает максимума и затем начинает уменьшаться, при  $T >> T_{max}$  (рис. 5,б) интенсивность ЗЛ быстро достигает максимального значения и затем уменьшается.



**Рис. 5.** Форма выходных сигналов гидрофона и фотоумножителя :  $\tau = 3$  мс,  $T = 100$  (а), 35 (б), 20 (в) и 10 мс (г)

Аналогично изменяется форма импульсов ЗЛ для различных величин  $\tau$  из следующих диапазонов  $\tau$ :  $\tau_{th1} > \tau > \tau_{th2}$  (на рисунке не показано).

### Обсуждение результатов

Наличие порогового  $\tau$  при заданной интенсивности ультразвука может быть объяснено следующим образом. При включении ультразвука зародыши кавитации начинают увеличиваться в размерах вследствие выпрямленной диффузии и коалесценции. Время роста равно длительности импульса  $\tau$ . В промежутке времени  $T-\tau$  между двумя импульсами, размеры пузырьков уменьшаются. Если за время  $T - \tau$  характерный размер пузырьков успевает уменьшиться до исходного, то при данных  $\tau$ ,  $T$  и  $U$  за достаточно большой промежуток времени в среднем не наблюдается увеличения размеров зародышей. Следовательно, в этом случае  $\tau$  ниже порогового.

Если же  $\tau$  достаточно велико, то диаметр пузырька не уменьшится до исходного за время  $T-\tau$ . В результате за время  $\tau >> T$  будет наблюдаться рост размеров пузырька и за принятное время наблюдения он достигнет резонансного размера, при котором начинается интенсивное захлопывание, сопровождающееся характерными эффектами: генерированием ударных волн и звуколюминесценции. С ростом концентрации пузырьков растет и активность кавитации. Однако при этом происходит также усиление эффектов, которые могут снижать эффективность преобразования и концентрации энергии ультразвука при захлопывании. Это, прежде всего взаимодействия пузырьков, в частности за счет сил Бьеркнесса и ударных волн. а также увеличение концентрации больших неэффективных полостей, которые пульсируют не захлопываясь. Важным фактором может быть образование кластеров кавитационных полостей.

Таким образом, наличие максимума на зависимости интенсивности ЗЛ от длительности импульсов  $\tau$  (рис. 1, рис. 3), вероятно, обусловлено конкурирующим влиянием двух факторов, связанных с увеличением концентрации кавитационных полостей и их размеров в кавитационной области: Это — увеличение числа кавитационных событий (коллапсов) в единицу времени, с одной стороны, и уменьшение эффективности концентрации энергии пузырьками при захлопывании — с другой. При  $\tau < \tau_{max}$  преобладающим фактором является рост числа кавитационных событий; интенсивность ЗЛ растет с ростом  $\tau$  в этом диапазоне  $\tau$ . При  $\tau > \tau_{max}$  преобладающим становится второй фактор — уменьшение эффективности преобразования и концентрации энергии пузырьками при их захлопывании, что приводит

к уменьшению интенсивности ЗЛ с ростом  $\tau$  в данном диапазоне  $\tau$ . Этот вывод подтверждается результатами регистрации динамики изменения интенсивности ЗЛ за время импульса ультразвука (рис. 5). Аналогичными же причинами обусловлено уменьшение активности кавитации после достижения максимума с уменьшением периода следования Т импульсов ультразвука (рис. 2 и 4).

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, Российского фонда фундаментальных исследований и Триестского университета (Италия).

#### **ЛИТЕРАТУРА**

5. *Dezhkunov, N.V., et al.* Sonoluminescence and Subharmonic Generation in a cavitation Zone of Aqueous Sodium Chloride Solutions//J.Eng.Phys.- 1986. – Vol.51. – P. 1052-1058.
6. *Pickworth M. J. W., Dendy P. P., Leighton T. G., and Walton A. J.* Studies of the cavitation effects of clinical ultrasound by sonoluminescence// Phys. Med. Biol. – 1988. Vol. 33. – P. 1249.
7. *Shuangwei Wang, Ruo Feng, Xiping Mo.* Study on pulse cavitation peak in an ultrasound reverberating field// Ultrasonics Sonochemistry. – 1996. – No 4.- P. 65-68.
8. *Dezhkunov N.V., Francescutto A., Ciuti P., Mason T.J., Iernetti G., Kulak A. I.* Enhancement of sonoluminescence emission from a multibubble cavitation zone. fields // Ultrasonics Sonochemistry. – 2000. – No 7. – P. 19–24.
9. *Dezhkunov N.V. Francescutto A., Ciuti P.* Enhancement of the conversion and concentration of energy in a multibubble cavitation zone // Nonlinear acoustics at the beginning of 21-t century. – Moscow, 2002. – Vol. 2. – P. 919–926.
10. *Ciaravino V., Flynn H.G. and Miller M.W.* Pulsed enhancement of acoustic cavitation: a postulated model// Ultrasound Med Biol. – 1981.- Vol. 7.- P. 159-166.
11. *Miller M.W., Miller D.L., Brayman A.A.* A review of *in vitro* bioeffects of inertial ultrasonic cavitation from a mechanistic perspective//Ultrasound in Med. & Biol.- 1996. - No. 9. P. 1131 – 1154.
12. *Mitome H., Hatanaka S.* Otpimization of a sonochemical reactor using a pulsing operation//Ultrasonics. – 2002. V.40.- P. 683-687.
13. *Flynn H.G. and Church C.C.* A mechanism for the generation of cavitation maxima by pulsed ultrasound//J. Acoust. Soc. Am.- 1984. - V.76. - P.505-511.
14. *Casadonte Jr. D.J., Flores M, Petrier C.* Enhancing sonochemical activity in aqueous media using power-modulated pulsed ultrasound: an initial study //Ultrasonics Sonochemistry. – 2005. – No 12. – P. 147–152.

УДК 534.114

**А.А. Новик**

#### **НЕДОРОГОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ГЕНЕРАТОР ШИРОКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

ЗАО «Ультразвуковая техника — Инлаб»  
Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, Чугунная ул. 20  
Тел: (812) 329-49-61; Факс: (812) 329-49-62  
E-mail: damnationru@rambler.ru

Одно из направлений совершенствования и развития современных технологических процессов — озвучивание технологической среды ультразвуком. Широко известен эффект интенсификации и модификации физических и физико-химических технологических процессов, происходящих в жидких средах, под воздействием акустических волн ультразвуковой частоты. Примерами применения ультразвука в промышленности являются системы ультразвуковой очистки, диспергирования, эмульгирования, получения аэрозолей и другие, связанные с созданием в жидкой среде кавитационных полей и течений.

Для многих небольших учебных или производственных лабораторий непреодолимым препятствием для использования ультразвука является высокая цена ультразвуковых установок.

Была поставлена задача разработать недорогой мощный ультразвуковой генератор для пьезокерамических преобразователей.

К генератору были предъявлены следующие требования:

Напряжение питания при частоте 50-60Гц: 220В+/-10%.

Число фаз: 1.

Рабочая частота: 16-25 кГц.

Выходная мощность, Вт, не менее: 200.

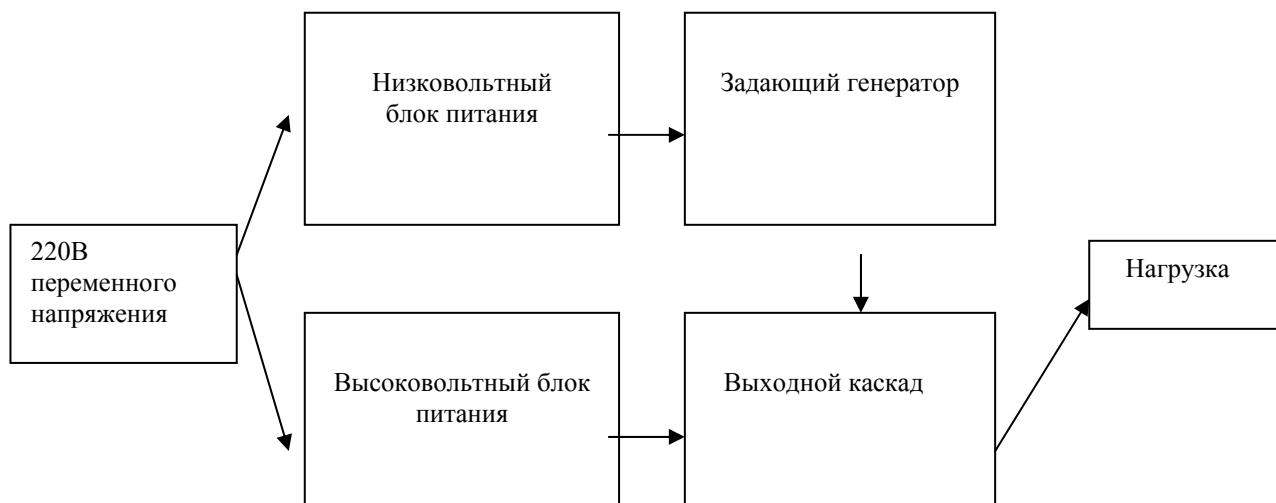
Потребляемая мощность, Вт, не более: 300.

В целях максимального упрощения конструкции было решено отказаться от системы АПЧ.

Разработка схемы.

Функционально ультразвуковой генератор без АПЧ состоит из 4 частей:

- Низковольтный блок питания, питающий задающий генератор
- Высоковольтный блок питания, питающий выходной каскад генератора
- Задающий генератор, формирующий импульсы нужной формы и частоты
- Выходной каскад на мощных полевых транзисторах



*Рис.1* Блок-схема устройства генератора

Задающий генератор.

Использование современной элементной базы позволяет отказаться от сложных и громоздких схем задающего генератора. В данном генераторе применяется микросхема фирмы «International Rectifier» IRS2153D. В ней содержится одновременно и задающий генератор, и драйвер полумостового каскада, кроме того, данная микросхема содержит быстрый высоковольтный диод необходимый для реализации бутстрепной схемы управления верхним плечом.

Был изготовлен опытный макет генератора.



*Рис. 2* Фотография опытного макета

В ходе лабораторных испытаний было установлено, что разработанный генератор отвечает предъявленным к нему требованиям.

