

УДК 621.9.048.6  
DOI:10.30987/2223-4608-2021-8-12-17

**В.М. Приходько**, д.т.н., **Р.И. Нигметзянов**, к.т.н.,  
**С.К. Сундуков**, к.т.н., **Д.С. Фатюхин**, д.т.н.  
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
125319, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 64)  
E-mail: mitriy2@yandex.ru

## **Современные направления ультразвуковой жидкостной обработки в машиностроении**

*Рассмотрены факторы, определяющие эффективность жидкостных ультразвуковых процессов. Предложена модель формирования кавитационных зон в поле поршневого излучателя. Приведены рекомендации по рациональному применению ультразвуковой обработки для различных технологических процессов в жидкости.*

**Ключевые слова:** ультразвуковая технология; машиностроение; акустические потоки; кавитация; кавитационная эрозия.

**V.M. Prikhodko**, Dr. Sc. Tech., **R.I. Nigmatzyanov**, Can. Sc. Tech.,  
**S.K. Sundukov**, Can. Sc. Tech., **D.S. Fatyukhin**, Dr. Sc. Tech.  
(Moscow of Motor Road State Technical University (MADI), 64, Leningradsky Avenue, Moscow, 125319)

## **Current trends in ultrasonic liquid machining in mechanical engineering**

*Factors defining the effectiveness of ultrasonic liquid processes are considered. There is offered a model of cavitation area formation in the field of a piston transmitter. The recommendations on efficient use of ultrasonic treatment for different technological processes in liquid are shown.*

**Keywords:** ultrasonic technology; mechanical engineering; acoustic flows; cavitation; cavitation erosion.

### **Введение**

Ультразвук широко применяется в самых разных областях промышленности, в том числе машиностроении, для изменения свойств материалов, а также формирования требуемых характеристик объектов обработки. Наиболее распространены технологии, связанные с передачей высокочастотных колебаний в жидкие среды. К таким технологиям относятся ультразвуковая очистка деталей, создание эмульсий, кавитационно-абразивная и кавитационно-эрозионная виды обработки, подготовка и нанесение лакокрасочных покрытий и многие другие [1, 2].

В основе этих видов обработки лежит ряд

физических эффектов, создаваемых ультразвуком в жидких средах, основными из которых являются кавитация и гидродинамические потоки.

Основным эффектом принято считать акустическую кавитацию. Кавитация – образование полостей, заполненных паром, газом или их смесью, которые захлопываются, создавая интенсивные импульсы давления [3].

Другим механизмом действия на жидкие среды являются акустические течения – регулярные потоки жидкости, имеющие вихревой характер и возникающие под действием интенсивного звукового поля как вблизи различного рода препятствий, так и в свободном пространстве. Образование акустических те-

чений объясняется законом сохранения количества движения и обусловлено тем, что переносимый звуковой волной импульс, связанный с колебаниями частиц среды, при поглощении волны передаётся среде, вызывая её регулярное движение [4].

Принято различать три типа акустических течений: мелкомасштабные, среднemasштабные и крупномасштабные. Кроме того, в озвучиваемой жидкости наблюдаются мощные потоки, причиной которых является развитие кавитации и вытеснение капельной жидкости из кавитационной области.

Воздействие потоков определяется той мерой интенсификации, которую они вносят в процессы тепло- и массообмена в объёме ультразвуковой обработки и перемещения кавитационных пузырьков в зоне озвучивания.

Для организации различных технологических процессов необходимо четко дозированное воздействие тех или иных механизмов. Так, например, кавитация не только способствует удалению загрязнений при очистке, но и может являться источником разрушения поверхностей объектов обработки.

#### **Физическая модель кавитационного воздействия на жидкие среды**

При исследованиях механизмов и технологических параметров ультразвуковой очистки в полях поршневых излучателей на частотах около 20...25 кГц выяснилось, что эффективность обработки изделий, расположенных более, чем в 10 мм от излучающей поверхности, возрастает с увеличением амплитуды колебаний лишь примерно до 3 мкм. Дальнейший рост амплитуды приводит к увеличению числа кавитационных пузырьков, образованию пузырьков облаков, ограничивающих увеличение эффективности технологии. Однако повышение амплитуды колебаний до больших значений (свыше 10...12 мкм) приводит к последовательному уплотнению пузырькового облака у излучающей поверхности.

Технологические последствия этого процесса имеют неоднозначный характер. До амплитуд 10...12 мкм негативный прогноз в целом подтверждается – эффективность кавитационной эрозии в весовом выражении растёт очень медленно. Начиная с 12...15 мкм, рост кавитационной эрозии (там, где кавитация имеет место) вновь становится регулярным и достаточно значительным, чтобы на его основе создавать новые технически обоснованные режимы обработки.

Кроме того, при больших амплитудах колебаний излучающей поверхности на расстояниях 30...70 мм от нее, т.е. далеко за пределами зоны активной кавитационной эрозии, наблюдаются устойчивые эффекты. Например, очистка изделий от некоторых видов загрязнений (растворимых смазок, остатков полировальных паст и т.п.) без малейших следов кавитационных разрушений.

Таким образом, достигнуты следующие фундаментальные технические результаты. Доказана возможность существенного увеличения производительности эрозионной ультразвуковой обработки твердых поверхностей, расположенных в зоне интенсивной кавитации (до 15...20 мм от поверхности излучателя). Обнаружена довольно обширная отдаленная от излучателя зона, в которой отдельные виды ультразвуковой обработки успешно осуществлялись без каких бы то ни было проявлений кавитационной эрозии.

Результаты оптико-кинематографических наблюдений и исследований эрозионной активности кавитационной области, наряду с исследованиями кинетики процессов ультразвуковой обработки, дали основание сформулировать вывод о наличии в звуковом поле высокоамплитудного излучения, формируемого в жидкости поршневым излучателем, трех различных по эффективности технологических (кавитационных) зон (рис. 1).

Первая зона представляет собой тонкий (порядка 3...10 мм) слой жидкости, исключительно густо насыщенной кавитационными пузырьками. Эта зона обладает наибольшей эрозионной активностью, в ней реализуется чисто кавитационный механизм обработки (например, разрушение твердых тел).

Вторая зона располагается за I зоной, и представляет собой мощный практически не расширяющийся гидродинамический поток жидкости, переносящий массу пузырьков со средней скоростью порядка метра в секунду. Протяженность потока характеризует глубину проникновения кавитирующего потока жидкости в озвучиваемый технологический объем. Вторая зона является наиболее эффективной и управляемой по эрозионной активности кавитационной зоной.

Третья зона обладает наименьшей эффективностью. Несмотря на то, что в ней не обнаруживаются каких-либо проявлений кавитационных коллапсов, там может совершаться полезная работа по безэрозионной обработке твердых поверхностей.

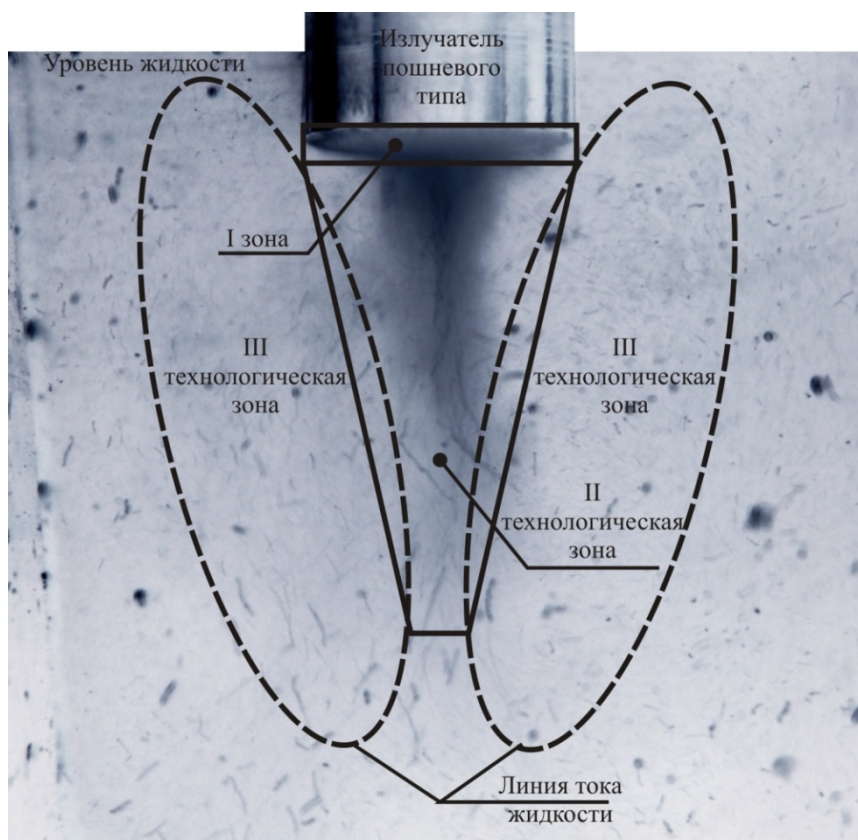


Рис. 1. Схематическое изображение технологических зон, формирующихся в ультразвуковом поле стержневого излучателя при высокоамплитудном режиме озвучивания рабочей жидкости

Эксперимент показывает, что при высокоамплитудном режиме ( $\xi_m > 12$  мкм) кавитационная область (см. рис. 1) характеризуется весьма сложной, самоорганизующейся структурой.

Выделенные технологические зоны характеризуются резко различающимися по величине индексом кавитации, эффективной сжимаемостью и локальными характеристиками гидродинамических потоков. Наибольшей величиной индекса кавитации обладает I технологическая зона ( $\sim 0,85$ ) и наименьшей – III зона ( $\sim 0,1$ ).

Целенаправленное изменение физических параметров, определяющих эффективность технологических процессов, протекающих в ультразвуковом поле рабочей жидкости, открывает возможности управления режимами обработки и оптимизации ее интенсивности. Осуществление такого подхода диктует необходимость создания физической модели поведения кавитационных областей.

#### Взаимосвязь физических явлений в технологических зонах

Кавитационные пузырьки, возникающие на интенсивно колеблющейся излучающей по-

верхности, подхватываются нормальным к ней гидродинамическим потоком. Многочисленные эксперименты свидетельствуют, что первоначально отполированная излучающая поверхность концентратора практически сразу подвергается эрозии. В результате поверхность теряет зеркальный блеск, а образующиеся шероховатости становятся эффективным источником зарождения кавитационных пузырьков.

Проходя зону I, они, пульсируя в акустическом поле, начинают также активно осциллировать. Часть пузырьков, попадающих затем в зону II в фазе минимальных значений колебательной скорости, приобретает, пульсируя, присоединенную массу жидкости и, соответственно, способна накапливать энергию. Под действием выпрямленной диффузии в мощном акустическом поле эти пузырьки достигают резонансного размера и коллапсируют по классической схеме с выделением ударных волн и кумулятивных струек.

Кроме эффекта кавитации под действием высокочастотных вибраций в жидкости возникают акустические течения. Характер этих течений в основном зависит от формы излучающей поверхности, а динамика – от физи-

ческих свойств жидкости. Ламинарные потоки создают на обрабатываемой поверхности силы, удерживающие пузыри на месте, в то же время турбулентные течения стремятся снести их. Возникающие гидродинамические силы ограничивают радиус пузырей пороговым значением, соответствующим моменту начала его коллапса.

Выявлено, что срыв пузырей возможен при достижении радиуса определенного диапазона, в свою очередь, размер радиуса зависит от амплитуды колебаний  $\xi_m$ . Увеличение амплитуды приводит не только к ускорению появления зародышей и их количества, но и к срыву пузырей с большей площади за счёт возросшей энергии гидродинамического потока. Как следствие индекс кавитации в I зоне возрастает. Вектор распространения волны перпендикулярен плоскости торца излучателя, в результате отчетливо заметна граница I зоны, имеющая цилиндрическую форму и однородную по акустическим параметрам среду, состоящую из газонасыщенных пузырьков и жидкости.

Для этой зоны характерно увеличение сжимаемости по сравнению с исходным состоянием жидкости, но при этом плотность остаётся без изменения. Эта зона представляет собой стабилизирующий элемент согласующий процессы между колебательной системой и II зоной. Также I зона является по сути реактором получения пузырьков с большой запасённой энергией, из неё происходит вылет пузырьков во II зону. Объём II зоны значительно больше, но с меньшей концентрацией пузырьков. Управляя амплитудно-частотными характеристиками, формой излучателя и другими факторами, можно добиться высокой интенсивности воздействия на обрабатываемый объект или получать требуемые эффекты.

Как уже отмечалось, эффективность II зоны во многом определяется энергетикой I зоны, т.е. плотностью ультразвуковой энергии и скоростью переноса пузырьков гидродинамическими потоками.

Увеличение амплитуды  $\xi_m$  приводит к увеличению скорости потока, но при этом происходит уменьшение количества зародышей кавитации. Эти факторы ведут к повешению индекса кавитации в первой зоне, но снижают акустическую мощность во второй зоне, тем самым выравнивают характеристики системы в целом.

Рассмотрим вариант при процессах случайного уменьшения  $\xi_m$ . Очевидно, что количество зародышей пузырьков увеличится, но ско-

рость потока снизиться в I зоне. Это же приведёт к увеличению количества пузырей во II зоне с увеличением амплитуды звуковой волны. Снова наблюдается стабилизация процессов в зависимости от заданных параметров обработки. То есть происходит стабилизация работы ультразвукового инструмента, характерная для режимов ультразвуковой высокоамплитудной обработки [5].

Выход энергии из первой зоны весьма существенен. Изменения, происходящие во второй зоне, незначительно оказывают влияние на характеристики первой. Соответственно стабильность системы не изменяется при появлении во II зоне объектов обработки. Это также позволяет применять различные технологические приемы, повышающие качественные и количественные результаты обработки во второй зоне. К примеру, без повышения входной мощности можно увеличить количество зародышей введением в зону обработки жидкости с заданным газосодержанием.

### Пульсации кавитационной области

Кроме перечисленных процессов характерных для высокоамплитудной обработки экспериментально выявлено и теоретически доказано наличие низкочастотных пульсаций кавитационной области. Низкочастотная пульсация является важным вспомогательным фактором, интенсифицирующим ультразвуковую обработку в зонах, создаваемых стержневыми колебательными системами [4].

Экспериментальное подтверждение этого явления было получено с помощью высокоскоростной видеосъемки со скоростью 4000 кадров в секунду. Зафиксировано импульсное перемещение фронта пузырьков до образования устойчивого кавитационного облака. На расстоянии  $h = 10...20$  мм от поверхности излучателя (рис. 2) отмечено скачкообразное возрастание скорости распространения пузырькового фронта. Анализ видеоряда позволил определить характер и скоростной режим движения фронта пузырьков.

Во временном интервале работы колебательной системы, с момента образования устойчивого однородного кавитационного облака отмечены пульсации, отчетливо наблюдаемые в районе торца излучателя, с последующим распространением по всем технологическим зонам. Высота области первой пульсаций совпадает с размерами будущей первой технологической зоны.

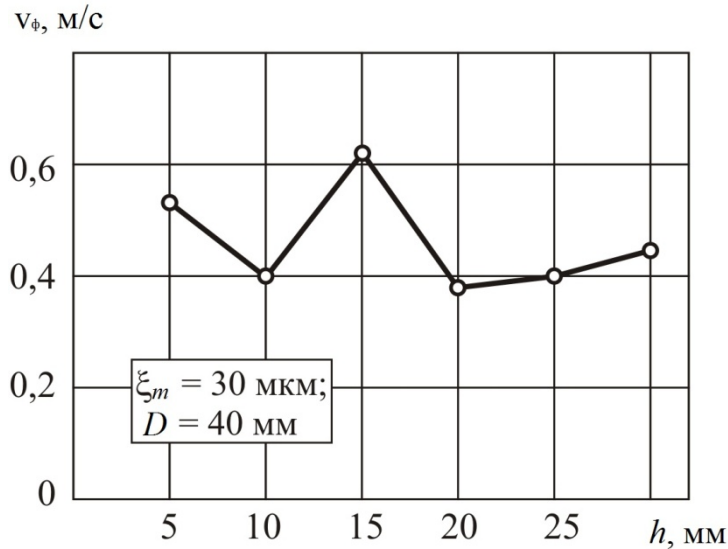


Рис. 2. Скорость распространения пузырькового фронта в кавитационной области

В начальный период времени происходит увеличение объема жидкости подсосываемый под поверхность излучателя с его боковой поверхности. В следующий момент времени происходит пережатие потока жидкости по причине образования волн крупномасштабного акустического потока. Это обуславливает падение давления внутри кавитационного облака и увеличения его сжимаемости. Повышение плотности облака, образовавшегося под излучателем, способствует ускорению прохождения волны с последующим воздействием на зону под сжатой областью. Далее кавитационная область у поверхности излучателя вновь начинает расширяться.

Пульсации оказывают влияние не только на кавитацию, но и на крупномасштабные акустические течения, изменяя их характер на импульсный. Например, пульсирующие гидродинамические потоки интенсифицируют отделение загрязнений от поверхности и способствуют выносу их из внутренних полостей при ультразвуковой очистке.

Обнаруженные пульсации, происходящие в зоне обработки, во многом определяют эффективность высокоамплитудных технологических процессов.

### Основные направления ультразвуковой жидкостной обработки

Изложенная выше физическая модель кавитационного воздействия на жидкие среды лежит в основе разработки, создания и совершенствования ряда ультразвуковых технологических процессов.

Применение ультразвуковой очистки наиболее эффективно для удаления сложных загрязнений типа нагаров и лаковых отложений. При этом в ряде случаев кроме удаления загрязнений наблюдаются ещё и изменения поверхностного слоя объектов обработки – кавитационная эрозия. Механизм эрозионного поверхностного разрушения твердых тел имеет накопительный характер. Сначала кавитационные пузыри незначительно деформируют обрабатываемую поверхность, но со временем деформации накапливаются, происходит наклёп материала и разрушение поверхности. Хрупкое разрушение имеет место на выступах и впадинах неровностей. Кроме того, на поверхности образцов замечено изменение структуры зерен, которые значительно измельчаются.

Таким образом, на основании предложенной физической модели распределения механизмов ультразвукового воздействия в различных технологических зонах, можно обеспечить безэрозионную очистку или в эрозионном режиме повысить микротвердость и создать сжимающие микронапряжения в поверхностном слое.

При обработке дисперсных систем распределение эффектов в технологическом объёме так же оказывает влияние на их основные свойства: дисперсность; однородность; стабильность; вязкость.

Для получения смазочно-охлаждающей жидкости наилучший результат достигнут при постепенной подаче эмульсола в зону развитой кавитации. Это позволяет избежать образования крупных агломератов эмульсола в во-

де. Подобные технологические приёмы позволяют эффективно проводить обработку лакокрасочных материалов с целью снижения вязкости и уменьшения размеров пигментов.

### Заключение

Ультразвуковое воздействие эффективно применяется для интенсификации таких процессов как очистка деталей, создание эмульсий, кавитационно-абразивная и кавитационно-эрозионная виды обработки, подготовка и нанесение лакокрасочных покрытий и многие другие. Результативность этих технологических процессов напрямую зависит от точного дозирования тех или иных эффектов, создаваемых ультразвуком в жидкостях.

Проведённые исследования позволили сделать вывод о наличии в звуковом поле высокоамплитудного излучения, трех различных по эффективности технологических зон, которые характеризуются резко различающимися по величине индексом кавитации, эффективной сжимаемостью и локальными характеристиками гидродинамических потоков. Целе направленное изменение физических параметров, определяющих эффективность технологических процессов, протекающих в ультразвуковом поле рабочей жидкости, открывает возможности управления режимами обработки и оптимизации ее интенсивности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С. Нанесение лакокрасочных покрытий методом пневмоультразвукового распыления // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – №4 (34). – С. 26-31

2. Кудряшов, Б.А., Ливанский, А.Н., Сенин, А.Н. Перспективы применения водно-органических эмульсий в качестве технологических моющих сред для ультразвуковой очистки // Научные технологии в машиностроении. – 2013. – №3 (21). – С. 19-22

3. Сиротюк, М. Г. Акустическая кавитация. – М.: Наука, 2008. – 271 с.

4. Приходько, В.М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте автотракторной техники. – М.: Техполиграфцентр, 2003. – 253 с.

5. Макаров, Л.О., Приходько, В.М., Фатюхин, Д.С. Взаимосвязь физических явлений, происходящих в ближней и дальней зонах ультразвуковых поршневых высокоамплитудных излучателей // Вестник МАДИ. – 2009. – №3 (18). – С. 41-45.

### REFERENCES

1. Sundukov, S.K., Fatyukhin, D.S. Application of paint and varnish coatings by pneumatic ultrasonic atomizing // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No.4 (34). – pp. 26-31.

2. Kudryashov, B.A., Livansky, A.N., Senin, A.N. Outlooks in use of water-organic emulsions as technological washing environment for ultrasonic cleaning // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2013. – No.3 (21). – pp. 19-22.

3. Sirotyuk, M.G. *Acoustic Cavitation*. – M.: Science, 2008. – pp. 271.

4. Prikhodko, V.M. *Ultrasonic Technologies in Production, Operation and Repair of Motor Car and Tractor Machinery*. – M.: Techpolygraphcenter, 2003. – pp. 253.

5. Makarov, L.O., Prikhodko, V.M., Fatyukhin, D.S. Interconnection of physical phenomena occurred in near and far areas of ultrasonic piston high-amplitude transmitters // *Bulletin of MADI*. – 2009. – No.3 (18). – pp. 41-45.

Рецензент д.т.н.  
Дмитрий Иванович Петрешин

