

УДК 534-8

DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-76-81

В.М. Приходько, В.Ф. Казанцев, В.И. Карагодин, С.К. Карцов, К.К. Иванов

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОАМПЛИТУДНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ДЕТАЛЕЙ

Приведен краткий анализ явлений, происходящих в жидкости под влиянием ультразвуковых колебаний. Представлены результаты экспериментальных исследований по формированию технологических зон при высокоамплитудном излучении. Предложен физический механизм, обеспечиваю-

щий стабилизацию работы колебательной системы в высокоамплитудном режиме.

Ключевые слова: очистка, ультразвук, кавитация, амплитуда колебаний, технологические зоны.

V.M. Prikhodko, V.F. Kazantsev, V.I. Karagodin, S.K. Kartsov, K.K. Ivanov

PECULIARITIES OF HIGH-AMPLITUDE ULTRASONIC CLEANING OF PARTS

One of the most efficient methods for parts cleaning is an ultrasonic method. During ultrasonic influence on of the most significant factors defining cleaning quality is oscillation amplitude. The paper reports the formulation of the conclusion on the pres-

ence in a sound field a high-amplitude radiation formed in liquid by a piston radiator of three (technological) cavitation areas different their effectiveness.

Key words: cleaning, ultrasound, cavitation, oscillation amplitude, technological areas.

Введение

Одним из наиболее эффективных способов очистки деталей является ультразвуковой способ, получивший широкое распространение в различных отраслях промышленности [1; 2]. Высокое качество очистки при минимальных затратах времени на процесс, замена ручного труда, возможность исключения из технологического процесса пожароопасных и токсичных растворителей - вот основные преимущества ультразвуковой очистки перед другими методами удаления загрязнений.

Особую сложность представляет очистка деталей топливной аппаратуры

двигателей внутреннего сгорания, что обусловливается наличием на деталях трудноудаляемых загрязнений типа нагаров и лаковых отложений, конструктивной сложностью очищаемых деталей и высокими требованиями к качеству очистки [3].

Эффективность ультразвуковой очистки во многом определяется амплитудой смещения излучающей поверхности. От амплитуды колебаний зависит не только излучаемая мощность, но и распределение кавитационных явлений по объему озвучиваемой жидкости.

Формирование технологических зон

При малых значениях амплитуд смещения на излучающей поверхности ξ_m в кавитацию вовлекаются различные участки объема жидкости, причем их распределение по объему озвучиваемой жидкости случайно. Визуальное наблюдение за кавитационными процессами, протекающими в ультразвуковом поле стержневых излучателей при $\xi_m \leq 12,5$

мкм, показывает, что кавитационные облака «гуляют» по поверхности излучателя. По мере дальнейшего увеличения амплитуды смещения ξ_m основная масса кавитирующих пузырьков скапливается непосредственно у поверхности излучателя. При этом они плотно покрывают всю излучающую поверхность, представляя собой как бы единое кавитацион-

ное облако. По мере увеличения подводимой мощности переход от режима излучения, при котором еще не вся поверхность закрыта кавитационными пузырьками, к режимам, соответствующим формированию у поверхности излучателя плотного кавитационного облака, носит скачкообразный характер. Этому скачку, возможно, связанному с резким перераспределением энергии, затрачиваемой на образование и поддержание кавитации, соответствуют амплитуды смещения $\xi_m = 10...12$ мкм.

Когда зона кавитационной области, обладающая повышенной эрозионной активностью, уже сформировалась у поверхности излучателя, дальнейшее увеличение амплитуды смещения не приводит к изменению ее геометрического расположения, наблюдается только постепенное уменьшение зоны в размерах за счет поджатия к поверхности излучателя [4; 5].

При $\xi_m \geq 15...20$ мкм вследствие вытеснения жидкости из-под излучателя создаются условия для захвата воздуха через образующееся пристеночное пространство между боковой поверхностью излучателя и жидкостью, непрерывно подтекающей под излучатель. Небольшое заглубление излучателя в жидкость при высоких значениях ξ_m создает условия, когда кавитация пропадает совсем. Мгновенно исчезает характерный кавитационный шум, преобразователь работает как бы вхолостую, нагоняя в жидкость большое количество пузырей размером 2...3 мм и более. Это явление названо вспениванием. Вспенивания, возникающего за счет подсоса воздуха, можно избежать, заглубляя излучатель в жидкость и увеличивая ее общий озвучиваемый объем.

Формирование сплошной кавитационной зоны у поверхности излучателя при амплитуде смещения $\xi_m > 10...12$ мкм сопровождается сильным поглощением акустической энергии, затрачиваемой на образование и поддержание кавитации, что приводит к появлению мощных гидродинамических потоков, существенно превышающих по скорости потоки, образующиеся в звуковом поле в отсутствие кавитации [6; 7].

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

Первая зона, по существу, совпадает с зоной кавитационной области, прилегающей непосредственно к поверхности излучателя, и геометрически вписывается в диск диаметром, соответствующим излучателю, и толщиной (высотой) 3...10 мм, зависящей от свойств жидкости и в незначительной степени от ξ_m . Первая зона обладает наибольшей эрозионной активностью, в ней реализуется чисто кавитационный механизм очистки (разрушение твердых тел) [8-10].

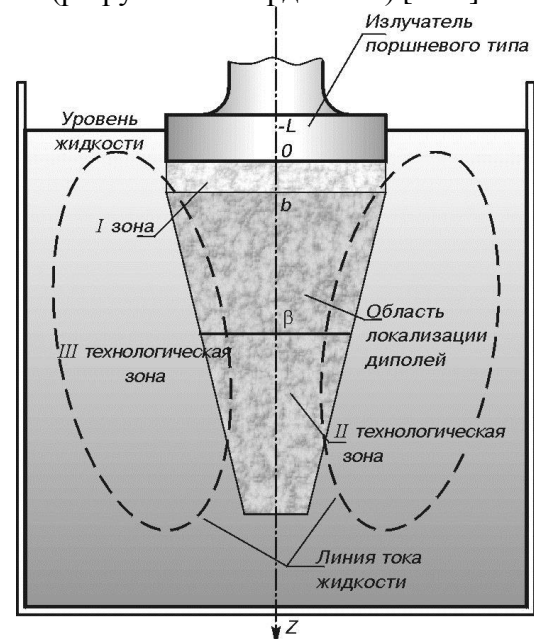


Рис. 1. Схематическое изображение технологических зон, формирующихся в ультразвуковом поле стержневого излучателя при высокоамплитудном режиме озвучивания рабочей жидкости

Вторая зона располагается за I зоной, пространственно вписывается в конусообразное усеченное тело вращения с боковой поверхностью, флуктуирующей относительно некоторого усредненного положения и представляющей собой границу между объ-

емами технологической жидкости, обладающими существенно разными по величине плотностью и сжимаемостью вследствие насыщения кавитационными пузырьками и формирования акустических потоков. Высота такого конуса характеризует глубину проникновения кавитирующего потока жидкости в озвучиваемый технологический объем. II зона, по существу, является наиболее эффективной и управляемой по эрозионной активности кавитационной зоной.

Третья зона обладает наименьшей эффективностью, находится вне пределов зон I и II; ее топография проявляется минимальным воздействием на тест-объекты кавитации и акустических потоков от ослабленного звука, прошедшего через зоны I и II. Полезная технологическая эффективность зоны III на практике реализуется в массопереносе отслоившихся загрязнений.

Анализ условий формирования у поверхности излучателя зоны кавитационной области, обладающей повышенной эрозионной активностью, позволяет отметить весьма важное феноменологическое явление, сопровождающее переходный режим в работе ультразвуковой колебательной системы (УКС), соответствующий амплитуде колебательных смещений излучателя 10...12 мкм.

Скачкообразный с точки зрения реакции нагрузки переход при работе УКС

на жидкость характеризуется резким перераспределением зон озвучиваемой жидкости, обладающих существенно разным индексом кавитации, представляющим собой объемную долю всех кавитационных пузырьков в фазе их наибольшего расширения в некотором выделенном объеме жидкости.

Эксперимент показывает, что при высокоамплитудном режиме ($\xi_m > 12$ мкм) кавитационная область (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 (~0,85), наименьшей (~0,1) - III зона. 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

Основным источником появления кавитационных пузырьков в технологических зонах I и II является их образование и срыв с поверхности излучателя 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.

На эти пузырьки действуют силы притяжения (адгезии) со стороны металла и срывающие их гидродинамические силы, обусловленные потоком жидкости в плоскости излучателя. Радиус пузырьков ограничен

сверху критическим значением, соответствующим моменту начала его коллапса. Скорость потока в плоскости излучателя падает по мере приближения к его центру. Вследствие этого оказывается, что при заданной амплитуде колебаний концентратора ξ_m условия срыва выполняются лишь в кольце внутреннего радиуса R_v . Чем выше амплитуда, тем быстрее во времени происходит рост зародышей и тем с большей площади осуществляется их срыв гидродинамическим потоком. Оба фактора приводят к увеличению индекса кавитации в зоне I. При этом необходимо отметить, что скорость потока в зоне I имеет преимущественно радиальную составляющую, что способствует образованию вполне наблюдаемого диска с четко определенными границами и относительно однородной по своим акустическим параметрам

рам заполняющей его жидкостью. Наличие пузырьков в зоне I не приводит к существенным изменениям плотности, однако сопровождается значительным увеличением (по сравнению с неозвученной жидкостью) сжимаемости. Это, в свою очередь, вызывает образование своеобразного согласующего элемента, стабилизирующего работу колебательной системы и позволяющего проводить эффективное озвучивание зоны II. В данную зону происходит активная инжекция пузырьков, накапливающихся в I зоне. Совокупность этих двух обстоятельств обуславливает как высокую интенсивность процессов очистки во второй зоне, так и возможность управления ими путем изменения параметров зоны I варьированием амплитудой или иными воздействиями.

Производительность процессов очистки во второй зоне зависит от плотности ультразвуковой энергии, количества пузырьков, инжектируемых в нее из первой зоны, а также скорости гидродинамических потоков.

Современные представления позволяют обосновать существование внутренне присущего режимам ультразвуковой высокоамплитудной очистки механизма стабилизации работы ультразвукового инструмента. Действительно, случайное увеличение амплитуды колебательной системы ξ_m приводит к увеличению скорости потока жидкости и уменьшению постоянной времени роста зародышей кавитации. Последние два фактора сразу вызывают увеличе-

ние индекса кавитации в первой зоне, т.е. уменьшение w , и, следовательно, снижение прошедшей во вторую зону акустической мощности и восстановление исходных параметров выбранного рабочего режима. Аналогичный процесс имеет место при случайном уменьшении ξ_m . В этом случае нетрудно видеть, что вызванное этим обстоятельством уменьшение скорости потока приводит к росту w , а значит, к увеличению амплитуды звуковой волны во второй зоне.

Необходимо отметить, что данный механизм стабилизации слабо чувствителен к изменению распределения поля скоростей вне первой зоны, т.е. стабильность системы не нарушается как при внесении очищаемого объекта во вторую технологическую зону, так и при возвратно-поступательном движении колебательной системы.

Таким образом, в результате самосогласованных взаимодействий в озвучиваемой жидкости образуется квазиупругий элемент, работающий в режиме согласующей нагрузки. Его наличие не только стабилизирует процесс очистки, но и открывает широкие возможности управления процессом как посредством задания определенной амплитуды колебаний, так и путем воздействия на материальные константы первой зоны, например посредством инжекции в нее жидкости заданного газосодержания.

Пульсации кавитационной области

Важным фактором дополнительной интенсификации ультразвуковой жидкостной обработки при высоких амплитудах являются экспериментально установленные и теоретически подтвержденные низкочастотные пульсации кавитационной области, формирующейся в поле стержневого излучателя.

Киносъёмка кавитационной области со скоростью 4000 кадров в секунду позволила зафиксировать неравномерность в скорости движения пузырькового фронта в начальный период образования кавитационного облака. Прежде всего необходимо отметить резкое возрастание скорости перемещения пузырькового фронта в интервале расстояний $h = 10...20$ мм от поверх-

ности излучателя (рис. 2). Покадровый просмотр киноплёнки с фиксацией внешнего вида кавитационной области во всех точках, используемых для оценки скоростного режима движения фронта пузырьков, позволил представить механизм этого явления.

Пульсации кавитационной области, четко регистрируемые в ближней к излучателю зоне, являются следствием формирования во времени с момента включения звука у поверхности излучателя плотного кавитационного облака, совпадающего с первой технологической зоной.

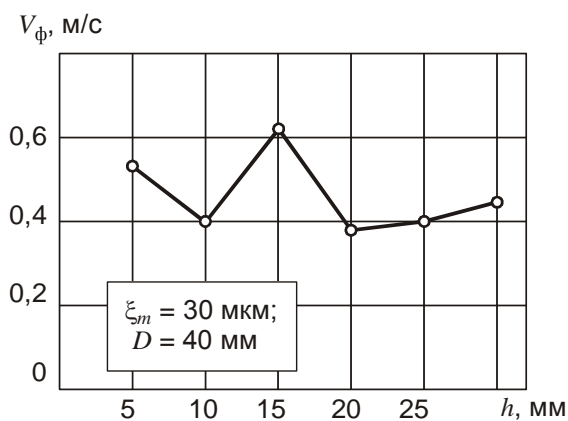


Рис. 2. Скорость распространения пузырькового фронта в кавитационной области

Первоначальное увеличение объема жидкости, вовлекаемого в кавитационный процесс в непосредственной близости к поверхности излучателя, в дальнейшем сменяется уменьшением вследствие пережатия I технологической зоны жидкостью, устремляющейся под излучатель по причине формирования крупномасштабного акустического потока от излучателя к периферии, падения давления внутри кавитационного облака и увеличения его сжимаемости. Вновь поступившая под излучатель жидкость, частично пережимая кави-

Заключение

В итоге вскрыт физический механизм, обеспечивающий стабилизацию работы колебательной системы в высокоамплитудном режиме. Доказано, что стабилизация внутренне присуща данному процессу и слабо зависит от геометрии очищаемых объектов, места их локализации во второй технологической зоне, а также от возвратно-поступательных движений

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С. Инновационные технологии ультразвуковой обработки // Научно-технические технологии в машиностроении. 2014. № 7 (37). С. 15-20.
2. Приходько В.М., Казанцев В.Ф., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С. Научно-технические технологии в машиностроении с применением ультразвука // Научно-технические технологии в машиностроении. 2011. № 1. С. 29-38.
3. Fatyukhin D.S. Ultrasonic cleaning equipment for automobile components // Russian Engineering Research. 2012. Т. 32, № 3. Р. 305-307.
4. Чудина О.В., Фатюхин Д.С., Хачатурян В.А. Кавитационное воздействие на поверхность

тационную зону у его поверхности, тем самым улучшает условия прохождения звука в озвучиваемый объем жидкости, и кавитационная область у поверхности излучателя вновь начинает расширяться. Этот самонастраивающийся процесс продолжается снова и снова, инициируя устойчивые по форме и частоте пульсации кавитационной области в целом. Частота пульсаций составляет несколько десятков герц и зависит от размеров излучателя, его формы и свойств жидкости.

Экспериментально установленный факт пульсации кавитационной области при высоких амплитудах колебательных смещений источника звука является чрезвычайно важным для анализа факторов, определяющих эффективность ультразвуковой высокоамплитудной очистки.

Пульсации кавитационной области, в свою очередь, порождают пульсации крупномасштабного акустического течения, приобретающего импульсный характер пульсирующего гидродинамического потока. Известно, что эффективность пульсирующего потока в процессе удаления загрязнений значительно выше, чем эффективность равномерного течения жидкости.

колебательной системы в целом. При этом показано, что целенаправленное воздействие на параметры среды в первой зоне кавитации посредством изменения амплитуды колебательной системы или подачи в эту область жидкости заданного газосодержания позволяет в широких пределах управлять акустическими процессами во второй технологической зоне.

5. Казанцев В.Ф., Фатюхин Д.С. О механизме дегазации при высокоамплитудной ультразвуковой жидкостной обработке // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2013. № 3 (34). С. 37а-42.
6. Нигметзянов Р.И., Казанцев В.Ф., Приходько В.М., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Повышение эффективности ультразвуковой жидкостной об-

- работки путем активации энергии кавитационных кластеров // СТИН. 2019. № 3. С. 19-23.
7. Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Совершенствование технологии ультразвуковой очистки рабочих поверхностей деталей машин на основе феноменологического исследования кавитационных образований // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 1 (67). С. 16-21.
 8. Чудина О.В., Александров В.А., Фатюхин Д.С. Влияние ультразвуковой кавитации на состояние поверхности конструкционных сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 2 (74). С. 3-6.
 9. Александров В.А., Фатюхин Д.С. Изучение влияния кавитационной эрозии на деформацию и разрушение изделий из стали 45 // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 10. С. 38-40.
 10. Фатюхин Д.С. Изменение шероховатости поверхностей деталей машин под действием ультразвуковой жидкостной обработки // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2010. № 4 (23). С. 30а-35.
 1. Prikhodko V.M., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Innovation technologies of ultrasonic treatment // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2014. No.7 (37). pp. 15-20.
 2. Prikhodko V.M., Kazantsev V.F., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Science intensive technologies in mechanical engineering using ultrasound // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2011. No.1. pp. 29-38.
 3. Fatyukhin D.S. Ultrasonic cleaning equipment for automobile components // *Russian Engineering Research*. 2012. T. 32, № 3. P. 305-307.
 4. Chudina O.V., Fatyukhin D.S., Khachatryan V.A. Cavitation impact upon structural steel surface under conditions of parts cleaning of transport engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2015. No.11 (53). pp. 43-47.
 5. Kazantsev V.F., Fatyukhin D.S. On degassing mechanism at high-amplitude ultrasonic liquid treatment // *Bulletin of Moscow Motor-Car Road State Technical University (MADI)*. 2013. No.3 (34). pp. 37a-42.
 6. Nigmatzyanov R.I., Kazantsev V.F., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Effectiveness increase of ultrasonic liquid treatment by activation of cavitation cluster power // *STIN*. 2019. No.3. pp. 19-23.
 7. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Technology improvement of machinery working surface ultrasonic cleaning based on phenomenological investigation of cavitation formations // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2017. No.1 (67). pp. 16-21.
 8. Chudina O.V., Alexandrov V.A., Fatyukhin D.S. Ultrasonic cavitation impact upon state of structural steel surface // *Strengthening Technologies and Surfaces*. 2011. No.2 (74). pp. 3-6.
 9. Alexandrov V.A., Fatyukhin D.S. Analysis of cavitation erosion impact upon deformation and destruction of products made of steel 45 // *Deformation and Destruction of Materials*. 2012. No.10. pp. 38-40.
 10. Fatyukhin D.S. Machinery surface roughness changes under impact of ultrasonic liquid treatment // *Bulletin of Moscow Motor-Car Road State Technical University (MADI)*. 2010. No.4 (23). pp. 30a-35.

Ссылка для цитирования:

Приходько В.М., Казанцев В.Ф., Карагодин В.И., Карцов С.К., Иванов К.К. Особенности высокоамплитудной ультразвуковой очистки деталей // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 12. С. 76–81. DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-76-81.

Статья поступила в редакцию 27.11.19.

Рецензент: д.т.н., профессор Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)

Петрова Л.Г.

Статья принята к публикации 29. 11. 19.

Сведения об авторах:

Приходько Вячеслав Михайлович, д.т.н., профессор, e-mail: prikhodko@madi.ru.

Казанцев Всеволод Феодосьевич, д.т.н., профессор МАДИ, e-mail: vfkaz@yandex.ru.

Карагодин Виктор Иванович, д.т.н., профессор МАДИ, e-mail: mitriy@newmail.ru.

Prikhodko Vyacheslav Mikhailovich, Dr. Sc. Tech., Prof., e-mail: prikhodko@madi.ru.

Kazantsev Vsevolod Feodosievich, Dr. Sc. Tech., Prof., MADI, e-mail: vfkaz@yandex.ru.

Karagodin Victor Ivanovich, Dr. Sc. Tech., Prof., MADI, e-mail: mitriy@newmail.ru.

Карцов Сергей Константинович, д.т.н., доцент МАДИ, e-mail: sergey-lefmo@yandex.ru.

Иванов Кирилл Константинович, магистрант, e-mail: kirill-iv97@mail.ru.

Kartsov Sergey Konstantinovich, Dr. Sc. Tech., Assistant Prof., MADI, e-mail: sergey-lefmo@yandex.ru.

Ivanov Kirill Konstantinovich, Master degree student, e-mail: kirill-iv97@mail.ru.