

УДК 655.11

**С. А. Бутько, М. С. Шмаков**

Белорусский государственный технологический университет

**УДАЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ АНИЛОКСОВЫХ ВАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ В ПРИСУТСТВИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ**

В статье приводится анализ физических процессов, протекающих при ультразвуковой очистке (УЗО) анилоксных валов в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ). Проанализирован процесс выбора аппаратуры и моющих средств для УЗО в зависимости от вида удаляемых загрязнений. Приведена разработанная классификация загрязнений анилоксных валов в зависимости от их стойкости к воздействию поверхностно-активных веществ в ультразвуковом поле.

Рассмотрены особенности процессов очистки микрорельефных поверхностей при ультразвуковой очистке в присутствии ПАВ с учетом факта возникновения вследствие воздействия ультразвукового поля явлений кавитации и акустических течений.

Разработана и проанализирована физическая модель воздействия энергии ультразвукового поля на жидкие среды. Рассмотрено дифференциальное уравнение колебаний в плоской УЗ-волне и его решение. Характер и величина микропотоков, возникающих вокруг кавитационной полости оценены при помощи формулы Ниборга. Рассмотрено влияние различных факторов (физико-химические свойства жидкости, внешние условия, параметры ультразвукового поля, физические и химические свойства вещества загрязнения) на механизмы УЗО. Выделены определяющие среди рассмотренных факторов, в значительной степени влияющие на качество ультразвуковой очистки анилоксных валов.

Приведены выводы проанализированной информации.

**Ключевые слова:** ультразвук, кавитация, очистка, загрязнение, анилоксный вал.

**S. A. Butsko, M. S. Smakov**

Belarusian State Technological University

**REMOVAL OF CONTAMINATED ANILOX ROLLS ULTRASONIC METHODS IN THE PRESENCE OF SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES**

The article gives an analysis of the physical processes of anilox rolls in the presence of surface-active substances (SAS) during ultrasonic cleaning (UCL). The process of selection of equipment and detergents for SAS is analyzed depending on the type of waste to be removed. The developed classification of the impurities of anilox rolls is given depending on their resistance to the action of liquid media in an ultrasonic field.

The features of the processes of cleaning the microrelief surfaces during ultrasonic cleaning in the presence of surfactants are considered, taking into account the fact that phenomena of cavitation and acoustic currents arise as a result of the ultrasonic field.

A physical model of the effect of ultrasonic field energy on liquid media has been developed and analyzed. The differential equation of oscillations in a plane ultrasonic wave and its solution are considered. The nature and magnitude of the microflows that arise around the cavitation cavity are estimated using the Nyborg formula. The influence of various factors (physical and chemical properties of a liquid, external conditions, parameters of an ultrasonic field) on mechanisms of SAS is considered. Identified among the factors considered, which significantly affect the quality of ultrasonic cleaning of anilox rolls.

The conclusions of the analyzed information are given.

**Key words:** ultrasound, cavitation, clean, pollution, anilox roller.

**Введение.** Чистота анилоксных валов во флексографии – один из ключей к качественной печати. Без ее поддержания невозможно решить ряд серьезных вопросов обеспечения качественного краскопереноса. Необходимы эффективные способы удаления нежелательных остатков, позволяющие восстановить прежний объем ячеек.

Существуют четыре основных способа очистки анилоксных валов: химическая, струйная,

ультразвуковая и лазерная. Химические методы очистки небезопасны для персонала, сложно контролируемы и имеют высокую коррозионную активность. Струйные методы либо не дают необходимого качества очистки, либо обладают высокой стоимостью. Лазерная очистка наиболее качественна, но подразумевает высокие энергетические затраты, а также достаточно дорога, поэтому доступна только крупным компаниям.

Поэтому актуальна проблема создания новых безопасных моющих композиций, технологических процессов и оборудования для очистки изделий. Предпочтение отдается моющим композициям на основе экологически безопасных органических растворителей и водных растворов ПАВ, способных очищать микрорельефные поверхности от загрязнений [1].

Альтернативой органическим растворителям и хладагентам является УЗ-очистка в водных растворах ПАВ. Воздействие УЗ-полей на жидкие среды вызывает в них процессы кавитации, а также макро- и микропотоки в объеме жидкости, прилегающей к излучаемой поверхности ванны. Захлопывание кавитационных газовых полостей сопровождается образованием ударных микроволн. Такие микроудары разрушают не только оксидные пленки и загрязнения на обрабатываемой поверхности изделий, но и в определенной степени изменяют морфологию поверхности [2]. Возникающие микро- и макропотоки способствуют удалению загрязнений и ускорению процесса очистки микрорельефной поверхности. Обусловленные кавитацией динамические и тепловые эффекты, возникновение микро- и макропотоков, определяют интенсификацию процесса удаления загрязнений со сложно профилированных поверхностей изделий под действием УЗ-поля. Использование рабочих частот в диапазоне 80–120 кГц обеспечивает неразрушающую очистку и удаление загрязнений размером до 1 мкм с микрорельефных поверхностей [3].

Среди процессов, протекающих под действием ультразвука в жидких средах, очистка изделий от различных загрязнений получила наибольшее применение в промышленности. Высокое качество очистки, замена ручного труда, исключение пожароопасных, токсичных растворителей являются главными преимуществами УЗО перед всеми известными методами удаления загрязнений [4].

**Основная часть.** Выбор аппаратуры и моющих сред для УЗО зависит прежде всего от вида удаляемых загрязнений. В УЗ-поле происходит механическое разрушение пленки загрязнений под действием кавитации и одновременно ускоряется процесс химического взаимодействия моющей жидкости с загрязнением под действием акустических течений. Классификацию загрязнений проводят по трем основным признакам [5]: по способности противостоять воздействию микроударных нагрузок; прочности связи пленки загрязнений с очищаемой поверхностью; характеру химического взаимодействия с моющей жидкостью.

По первому признаку загрязнения подразделяются на кавитационно стойкие и кавита-

ционно не стойкие, по второму – на прочно и слабо связанные с очищаемой поверхностью, по третьему – на химически взаимодействующие и не взаимодействующие с моющей жидкостью. Следует отметить, что классификация загрязнений по характеру взаимодействия с моющей жидкостью достаточно условна, так как всегда можно подобрать химический состав жидкости таким, что загрязнение будет вступать с ней в химическую реакцию. Поэтому под средой, химически взаимодействующей с загрязнением, понимают такую жидкость, которая, удаляя загрязнение с поверхности, не вступает в химическую реакцию с материалом очищаемого изделия. Если такое взаимодействие наблюдается, то оно протекает гораздо медленнее, чем процесс удаления пленки загрязнений, и не сопровождается повреждением детали и изменением физико-механических свойств материала.

Любое загрязнение можно охарактеризовать совокупностью вышеперечисленных признаков в различных сочетаниях. Например, тонкие жировые пленки на металлической поверхности, когда их очистка производится в воде, относятся к числу кавитационно стойких, слабо связанных с очищаемой поверхностью, химически не взаимодействующих с моющей жидкостью. Поэтому УЗО таких пленок в воде неэффективна и для обеспечения высококачественной очистки необходимо применять химически активную моющую жидкость, а параметры УЗ-поля подбирать такие, которые обеспечивали бы образование интенсивных акустических течений.

Классификация загрязнений позволяет определить области применения УЗО. Если загрязнение прочно связано с очищаемой поверхностью, химически не взаимодействует с моющей жидкостью и его кавитационная стойкость равна или превосходит кавитационную стойкость материала детали, например пригары формовочной земли на поверхности литых алюминиевых деталей, то для удаления таких загрязнений нельзя рекомендовать применение УЗО. Перечень наиболее распространенных загрязнений и их классификация по характерным признакам приведены в таблице ниже.

С поверхности анилоксидных валов главным образом подлежат удалению два основных вида загрязнений: лаковые пленки, краски и пыль. Пыль чаще всего механически связана с керамической поверхностью и удаляется в моющих растворах при воздействии ультразвука. Для определения состава загрязнений необходимо было провести спектральный анализ образцов прополимеризованной ультрафиолетовой краски.

## Классификация и свойства загрязнений

Виды загрязнений		Свойства загрязнений
Кавитационно стойкие	Пыль, шлам после печати	Слабо связаны с поверхностью, химически не взаимодействуют с моющей жидкостью
	Неполярные загрязнения в виде масел	Прочно связаны с очищаемой поверхностью, химически не взаимодействуют с моющими жидкостями
	Лаковые пленки, краски	Прочно связаны с поверхностью, химически взаимодействуют с моющей жидкостью
	Продукты коррозии, полярные загрязнения в виде остатков флюсов	Связаны с поверхностью, химически взаимодействуют с агрессивными жидкостями
Не стойкие	Жировые пленки, отпечатки пальцев	Прочно связаны с поверхностью, химически взаимодействуют с моющей жидкостью

Характер взаимодействия лаковых пленок с керамической поверхностью анилоксового вала сложный. Он включает простое механическое сцепление, межмолекулярное и химическое взаимодействие, вследствие чего удаление отпечатков пальцев требует разработки специальных моющих растворов.

Разрушение поверхностных пленок в жидкости под действием ультразвука происходит благодаря кавитации и акустическим течениям. В некоторых случаях, при очистке контактным методом, когда УЗ-колебания (УЗК) возбуждаются в самом изделии, определенную роль могут играть знакопеременные напряжения, возникающие в пленке загрязнений при изгибных колебаниях и способствующие отслаиванию пленки, если ее усталостная прочность незначительна.

Интенсивность кавитации, скорость и характер акустических течений, величина радиационного давления и амплитуда колебаний изделий зависят от частоты и интенсивности УЗ-поля, физических свойств жидкости и в особенности – от ее температуры. Разрушение, отделение и растворение пленки загрязнений при УЗО происходит благодаря совместному действию химически активной среды и факторов, возникающих в жидкости в УЗ-поле [5, 6].

Выбор моющих сред определяется видом загрязнения, материалом, из которого изготовлена очищаемая деталь, ее конструктивными особенностями, а также оптимальными условиями формирования кавитационной области с регулируемой эрозионной активностью.

При очистке в органических растворителях, как правило, не требуется подвергать детали защите от коррозии, облегчается сушка изделий после очистки. Однако органические растворители не следует применять для удаления пленок, имеющих высокую кавитационную стойкость, химически не взаимодействующих с моющей жидкостью. Для очистки от подобных загрязнений выгоднее использовать водные щелочные или нейтральные растворы с добав-

кой поверхностно активных веществ, так как в этих растворах при одинаковой акустической энергии формируется кавитационная область с более высокой эрозионной активностью, чем в органических растворителях, и разрушение пленки загрязнений протекает в водных растворах более эффективно.

Продолжительность УЗО колеблется от нескольких секунд до 15 мин при мощности 250 Вт и зависит от вида загрязнения и количества загрязнений на единице площади поверхности, подвергаемой очистке [7]. Если количество загрязнений на поверхности изделия превышает 200 мг/м<sup>2</sup>, то УЗО целесообразно сочетать с химическими методами обезжиривания [8], используя очистку в УЗ-поле на конечной стадии удаления пленки загрязнений для получения высокого качества очистки поверхности при плотности мощности до 10 Вт/л объема.

При пульсациях кавитационных пузырьков на пленку загрязнений воздействуют динамические нагрузки. Кавитационные пузырьки производят микроударное разрушение поверхностной пленки. Микроударные нагрузки характеризуются резким возрастанием давлений до значительной величины, за которым следует столь же быстрое уменьшение нагрузки. Распределение напряжений, вызванных такими нагрузками, отличается локальностью и сильной неравномерностью, что приводит к появлению в пленке загрязнений трещин, а также следов эрозии, которые наблюдаются на поверхности пленки в виде точечных кратеров. Захлопывающиеся кавитационные полости могут создавать локальные давления до 50 МПа и тепловые поля до 6000 К [9–11].

По критерию технологических возможностей удаления загрязнений кавитационные полости предложено классифицировать на захлопывающиеся и пульсирующие [12].

Повышать эрозионную активность моющей жидкости следует лишь в тех случаях, если необходимо удалять пленки с высокой кавитационной стойкостью, прочно связанные с очи-

щаемой поверхностью и химически не взаимодействующие с моющей жидкостью. Однако необходимо учитывать, что микроударному разрушению может подвергнуться не только пленка загрязнений, но и очищаемый материал. Установлено, что кавитационные пузырьки могут пульсировать на очень близких расстояниях от поверхности, примерно до десятков нанометров [13]. Поэтому при удалении загрязнений, прочно связанных с очищаемой поверхностью, в ряде случаев проводят очистку в несколько этапов, снижая интенсивность кавитации по мере разрушения пленки загрязнений. Пульсирующие пузырьки в основном не создают на границе жидкость – твердое тело значительных микроударных нагрузок [14].

Известны три возможных механизма разрушения поверхностных пленок пульсирующими кавитационными пузырьками: отслоение, струйная очистка, эмульгирование [15]. Характер этих процессов во многом зависит от критических размеров кавитационных пузырьков [16]. Отслоение пленок пульсирующими пузырьками подробно изучено с помощью высокоскоростной киносъемки. Объектом исследования были стеклянные пластинки с нанесенным на их поверхность слоем канифоли с добавкой сажи. Полученные кинофрагменты позволили установить следующий механизм разрушения пленок: пульсирующий пузырек «прилипает» к поверхности пластинки и к внутренней поверхности отслоившейся пленки, как это схематично показано на рис. 1, а. При интенсивных колебаниях пузырька на пленку начинают действовать силы, отрывающие ее от поверхности пластинки. Если силы сцепления пленки с поверхностью превосходят прочность самой пленки, то свободный кусочек ее отрывается и уносится микропотоками вблизи межфазной границы раздела сред (рис. 1, б). Если же прочность пленки превосходит силы сцепления, то пленка отслаивается с поверхности. Некоторые пузырьки после многократных пульсаций захлопываются с большой скоростью, и в этом случае пленка загрязнений разрушается аналогично случаю, рассмотренному для кавитирующего пузырька.

Иной механизм разрушения под действием пульсирующих пузырьков при удалении тонких пленок со слабой адгезией к поверхности, например слоя туши на пластинке из органического стекла. Пульсирующий пузырек, перемещаясь по очищаемой поверхности, оставляет в пленке загрязнений «расчищенные дорожки», направление которых совпадает с траекторией движения пузырька. В этом случае разрушающее действие кавитационных пузырьков можно объяснить ударами струек жидкости о поверх-

ность образца при делении крупных неустойчивых пузырьков на более мелкие. Пульсирующие пузырьки, разрушая пленки со слабой адгезией к поверхности, почти не оказывают воздействия на пленки, прочно связанные с очищаемой поверхностью [17].

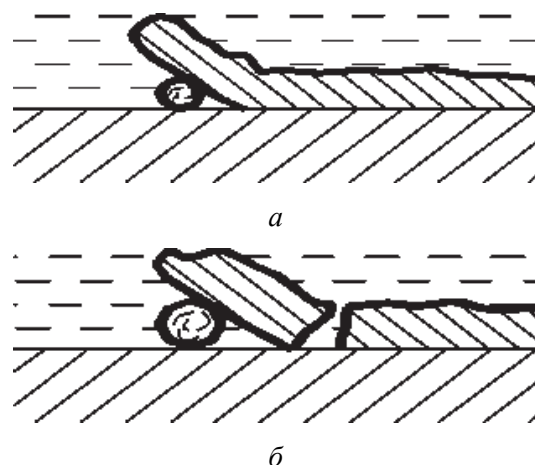


Рис. 1. Схема отслоения пленки кавитационным пузырьком:   
 а – «прилипание» пузырька к пленке;   
 б – разрыв пленки на куски

При удалении нерастворимых загрязнений в химически нейтральных растворах скорость очистки зависит от интенсивности УЗ-кавитации. При удалении растворимых загрязнений существенную роль играют акустические течения, в особенности вихревые микропотоки, возникающие в пограничном слое, которые интенсифицируют поступление свежих порций растворителя к поверхности твердого тела [18, 19]. Уменьшение толщины ламинарного слоя у границы с твердым телом является главным отличием перемешивания жидкости в звуковом поле от любых методов механического перемешивания. Этим можно объяснить эффективное удаление растворимых загрязнений на высоких частотах, когда интенсивность УЗ-может быть ниже пороговой и кавитация в жидкости не наблюдается [20].

Для удаления загрязнений субмикронных размеров (менее 100 нм) с поверхности анилокосовых валов используют интенсивные микропотоки, создаваемые в жидких средах на частотах порядка 1 МГц источниками УЗ-мощностью 100 Вт. Гиперзвуковые колебания эффективно удаляют как органические, так и неорганические частицы с микрорельефных поверхностей, не повреждая их [21, 22]. Высокочастотный ультразвук эффективен в жидких средах по следующим причинам: длина волны сравнима с размерами частиц, вязкий поверхностный слой тонкий, силы радиационного давления превы-

шают типичные значения сил адгезии частиц к поверхности [23, 24].

Одновременное применение импульсного модулирования УЗ-поля, дегазации и охлаждения жидкости, повышения статического давления намного превосходит сумму результатов, достигаемых каждым из методов в отдельности, т. е. имеет место существенное неаддитивное сложение эффектов. В результате достигнуто более чем 200-кратное увеличение интенсивности кавитации по сравнению с непрерывным режимом при нормальных условиях. Переход к импульсному режиму вызывает такие качественные изменения как увеличение статического давления, максимальной энергии импульсов и относительной доли высокоэнергетических импульсов [25].

Для обеспечения качественной очистки поверхности анилоксовых валов с наличием на них микрорельефа необходима высокая равномерность УЗ-поля. Обеспечить равномерное воздействие УЗ-поля в жидкости возможно в основном двумя способами. Первый состоит в разработке УЗ-ванн с равномерным полем излучения, создаваемым изгибно-колеблющейся диафрагмой, возбуждаемой системой распределенных магнитоотрицательных преобразователей, закрепленных попарно в пучностях изгибных колебаний пластины или пьезокерамических преобразователей, укрепленных на стенках тонкостенной ванны в определенном порядке [26]. Второй заключается в разработке специальных устройств, обеспечивающих равномерную очистку с неравномерным полем за счет электрического или механического сканирования поля по поверхности изделий.

Разрушение поверхностных пленок в жидкости под действием ультразвука происходит в результате кавитации и акустических течений, причем основной вклад дает кавитация. В связи с этим обоснована необходимость равномерности кавитационной области. Однако распределение кавитационных пузырьков в кавитационной области в большинстве случаев далеко от равномерного. В жидкой среде количество кавитационных пузырьков существенно превышает число их зародышей. Вокруг захлопывающегося пузырька идет процесс размножения зародышей, в результате чего появляются скопления пузырьков той или иной формы. Наличие таких скоплений существенно нарушает равномерность распределения пузырьков: в скоплениях число их велико, а в пространстве между скоплениями мало или даже равно нулю. Как правило, скопления возникают на границе раздела жидкость – твердое тело, где всегда в достаточном количестве присутствуют кавитационные зародыши. Часто можно наблюдать скопления

кавитационных пузырьков, имеющих форму тяжелой, которые исходят из одной точки. Причины образования скоплений такой формы пока не ясны, однако конфигурация тяжелой существенно меняется при незначительном изменении рабочей частоты. Отсюда можно предположить, что тяжести связаны с интерференционной структурой ближнего поля излучателя – единственным фактором, сильно реагирующим на незначительные изменения частоты.

**Физические модели воздействия энергии ультразвукового поля на жидкие среды.** Влияние ультразвука на процесс очистки основано, главным образом, на действии переменных давлений, которые возникают в жидкой среде при воздействии УЗК и которые проявляются как непосредственно, так и косвенно [4, 8], а также на действии кавитационных процессов в жидкой среде [25, 27]. Необходимо определить основные закономерности распределения переменных давлений в жидкости, заполняющей ванны, и их влияние на процесс УЗО.

В том случае если источником колебаний служит плоская поршневая диафрагма, распределение переменных давлений и скоростей в ванне зависит от трех координат и имеет весьма сложный характер. При работе плоского источника колебаний, встроенного в дно ванны, в колебаниях принимают участие и стенки: при повышении давления они несколько расходятся, а при понижении – сходятся, следовательно, прилегающие слои жидкости колеблются не только в вертикальной, но и горизонтальной плоскости. У стенок ванн всегда имеется градиент скоростей, так как слои жидкости вследствие трения о твердые тела движутся с меньшими скоростями.

Считая стенки достаточно массивными и пренебрегая их колебаниями, а также градиентом скоростей, для середины достаточно большой ванны можно принять УЗ-поле плоскопараллельным при относительно малых удельных интенсивностях. Необходимо также учитывать искажение плоскопараллельного поля вследствие кавитации. Математические трудности, связанные с изучением УЗ-поля при кавитации, до настоящего времени еще не преодолены, поэтому представляется возможным только приближенное математическое решение задачи.

Усредняя локальные искажения, вызванные кавитацией, можно рассматривать УЗ-поле как плоскопараллельное, а наличие кавитации учитывать с помощью коэффициента потерь в жидкости. Потери, характеризующиеся углом сдвига фаз между переменным давлением и скоростью в волне, вводятся в расчеты посредством комплексного коэффициента объемной упругости жидкости. До возникновения кавитации значение  $s$  со-

ставляет тысячные доли процента, при возникновении кавитации возрастает до 0,05–0,25% [26].

С учетом потерь в жидкости дифференциальное уравнение колебаний в плоской УЗ-волне определяется по формуле (1):

$$\frac{\partial^2 v}{x^2} + \frac{kv}{1 + j\varepsilon} = 0, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость частицы в волне;  $x$  – координата, отсчитанная в направлении нормали к поверхности источника колебаний;  $k = \omega / c$  – волновой коэффициент;  $c = \sqrt{E / \rho}$  – скорость распространения колебаний.

Решение уравнения (1), полученное Коганом, с подстановкой граничных условий дает комплексные выражения для скорости колебаний  $v_x$ , переменного давления  $P_x$ , потока энергии  $\bar{P}_x$  и удельного механического сопротивления  $Z_x$  на расстоянии  $x$  от источника колебаний в момент времени  $\tau$ :

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_{m0} \frac{\cos[k(1 - j\varepsilon/2)(l - x) + \sigma]}{\cos[k(1 - j\varepsilon/2)l + \sigma]} e^{j\omega\tau}; \\ P_x &= j\varepsilon_{m0} Z_c \frac{\sin[k(1 - j\varepsilon/2)(l - x) + \sigma]}{\cos[k(1 - j\varepsilon/2)l + \sigma]} e^{j\omega\tau}, \quad (2) \\ \bar{P}_x &= \frac{P_x^* v_x + P_x v_x^*}{4}; \\ \bar{Z}_x &= jz_c \operatorname{tg}[k(1 - j\varepsilon/2)(l - x) + \sigma], \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_{m0}$  – амплитуда скорости колебания вблизи источника колебаний;  $l$  – расстояние от источника колебаний до свободной поверхности жидкости;  $P_x^*$  и  $v_x^*$  – комплексно-сопряженные величины. Если сопротивление нагрузки равно нулю, что приближенно выполняется на границе раздела жидкости с воздухом, т. е.  $x = l$ , то система уравнений (2) приобретает вид (3):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{mx} &= \varepsilon_{m0} \left[ \frac{ch\varepsilon k(l - x) + \cos 2k(l - x)}{ch\varepsilon l + \cos 2kl} \right]^{1/2}; \\ P_{mx} &= \varepsilon_{m0} \rho c \left[ \frac{ch\varepsilon k(l - x) - \cos 2k(l - x)}{ch\varepsilon kl + \cos 2kl} \right]^{1/2}; \quad (3) \\ \bar{P}_x &= \frac{1}{2} \varepsilon_{m0}^2 \rho \frac{ch\varepsilon k(l - x) - 0,5\varepsilon \cos 2k(l - x)}{ch\varepsilon kl \cos 2kl}. \end{aligned}$$

В реальных жидкостях, имеющих определенные значения вязкости, мощность УЗ-колебаний затухает по мере удаления от источника колебаний. Изменение мощности вдоль направления распространения колебаний происходит по синусоидальному закону, при этом пики мощности наблюдаются в узлах колебаний волны. Характеристики переменного давления УЗ-

поля построены с помощью MathCAD с учетом затухания ультразвуковых колебаний в реальных жидкостях.

При погружении в жидкость твердого тела конфигурация УЗ-поля меняется. Чтобы найти новое распределение амплитуд, давлений и скоростей, необходимо решить систему дифференциальных уравнений, описывающих колебания отдельно в каждой среде: жидкой и твердой. Задача теоретического определения характеристик такого поля достаточно сложна, так как решение зависит от многих трудно учитываемых факторов. Для упрощения твердое тело принимается достаточно тонким по сравнению с длиной волны. Обычно его толщина равна 3–7 мм, поэтому такое допущение при длине волны 60–80 мм вполне возможно.

Когда твердое тело находится в пучности давления (и, следовательно, в узле скоростей), то УЗ-поле в жидкости не изменяется, так как тело остается все время неподвижным и испытывает только одинаковые переменные растягивающие и сжимающие усилия с двух сторон. Если твердое тело помещается в узел давлений (пучность скоростей), то перепад давлений вызывает колебание всего тела, что вносит большие изменения в распределение УЗ-поля. В целях интенсификации технологических процессов очищаемые детали и модули целесообразно размещать в пучности давлений, где они испытывают максимальные переменные давления, ускоряющие технологический процесс очистки. Кроме того, всякое тело, будучи помещенным в УЗ-поле, становится центром стационарных вихревых потоков.

Всякая частица в среде или выступ облучаемой поверхности становятся источником образования микропотоков в непосредственной близости от них. По мере удаления от места образования они быстро гаснут, а в непосредственной близости создают своеобразные условия. Облучаемая поверхность, как правило, покрывается не исчезающими длительное время пузырьками, которые являются источниками микропотоков. Характерной особенностью этого процесса является то, что излучаемая пузырьком волна давления в 5–30 раз превосходит давление в возбуждающей его колебание звуковой волне [28, 29]. Кроме того, динамика захлопывания кавитационных полостей в жидких средах зависит не только от величины давления УЗ-волны, но и от вязкости жидкой среды [30].

Характер и величина микропотоков, возникающих вокруг пузырька, зависят в основном от трех факторов: вязкости среды, интенсивности звука и вида поверхностных колебаний. Оценить величину этих потоков можно с помощью формулы (4), впервые предложенной Ниборгом:

$$U_{\max} = \frac{U_a^2 R^4}{\omega x}, \quad (4)$$

где  $U_a$  – амплитудное значение скорости частицы на поверхности пузырька;  $R$  – эффективный радиус пузырька, который обычно равен половине его максимального значения.

Расчеты по формуле (4) дают величину скорости порядка 2 м/с, однако следует считать, что эти значения не являются пределом, особенно при работе в режимах кавитации. На основании изложенного можно сделать вывод, что теория процессов, протекающих при распространении УЗ-колебаний в жидкой среде, достаточна сложна и требует учета многих фактов.

В процессах УЗ-активации жидких сред важно формировать направления как микро-, так и макропотоков, чтобы они ускоряли протекание химических реакций взаимодействия среды с поверхностью твердого тела. Направления и скорость микропотоков зависят от конструкции излучателя и амплитуды УЗК.

При анализе кавитационных процессов в жидких средах необходимо принимать во внимание, что в этом процессе участвуют не единичные пузырьки, а множество кавитационных пузырьков, имеющих начальные радиусы  $R_0$  в следующем интервале:

$$R_{\text{кр}} < R_0 < R_{\text{рез}}. \quad (5)$$

Кавитационные пузырьки, имеющие размеры меньше  $R_{\text{кр}}$  вследствие большого поверхностного натяжения не участвуют в кавитационном процессе при данном УЗ-давлении, определяемом по формуле (6):

$$R_{\text{кр}} = 4\sigma [3 \cdot (0,7P_A + P_{\text{П}} - P_0)]. \quad (6)$$

Резонансный размер кавитационных пузырьков обратно пропорционален частоте колебаний и определяется по формуле (7):

$$R_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho}}. \quad (7)$$

В УЗ-поле в жидкости также возникает однонаправленное движение, вызываемое давлением УЗ-поля. Оно возникает в результате потери импульса звуковой волны при встрече с препятствием, так как в силу закона сохранения импульса эта потеря компенсируется однонаправленным движением среды. Величина давления УЗ-поля определяется по формуле (8):

$$P_r = \frac{kI}{c}, \quad (8)$$

где  $k = 1$ , когда звуковая волна полностью поглощается средой;  $k = 2$ , когда звуковая волна полностью отражается от препятствия.

Влияние различных факторов на механизмы УЗО можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 2. Направление стрелок показывает, каким образом воздействует каждый фактор на процесс разрушения поверхностных пленок. Анализ влияния различных факторов показывает, что определяющими среди них являются нелинейные эффекты: кавитация и микропотоки, которые в значительной степени интенсифицируют процесс УЗ-очистки.



Рис. 2. Факторы, определяющие характер удаления загрязнений в УЗ-поле

**Заключение.** Таким образом, необходима разработка УЗ-ванн с распределенными по площади малогабаритными преобразователями, обеспечивающими высокую равномерность УЗ-поля.

Проведенный анализ возможных механизмов разрушения и удаления поверхностных пленок и слоев загрязнений в УЗ-поле показал, что основную роль при этом играют нелинейные явления в жидких средах при воздействии УЗК: кавитация и микропотоки

вблизи межфазных границ раздела сред. Кавитационные явления в жидких средах имеют сложный характер и характеризуются не только силовым воздействием на обрабатываемую поверхность твердого тела, но и высокими локальными температурами и электрическими разрядами, возникающими при захлопывании кавитационных полостей. Эти факторы необходимо учитывать при исследованиях процессов УЗО сложно профилированных поверхностей.

### Литература

1. Ивахненко В. Н., Касинский Н. К., Томаль В. С. Формирование вакуумными методами на дисковых поверхностях равномерных по толщине тонких пленок // Вакуумная техника и технология. 2003. Т. 13, № 3. С. 127–133.
2. Fuchs F. J. The Key to Ultrasonics-Cavitation and Implosion // Precision Cleaning. 1995. No. 3 (10). P. 13–17.
3. Аксельруд Г. А., Молчанов А. Д. Растворение твердых веществ. М.: Химия, 1977. 268 с.
4. Прохоренко П. П., Дежкунов Н. В., Коновалов Г. Е. Ультразвуковой капиллярный эффект. Минск: Наука и техника, 1981. 135 с.
5. Бреславец А. В., Хуторненко В. Д. Ультразвуковая очистка радиоаппаратуры. М.: Сов. радио, 1973. 80 с.
6. Murray J. Ultrasonic Clearing: What's The Buzz? // Circuits Manuf. 1990. Vol. 30, no. 1. P. 72–74.
7. Ultrasonic Clearing gets a big Boost // Electron. Packaging and Prod. 1990. Vol. 30, no. 5. P. 22.
8. Основы физики и техники ультразвука / Б. А. Агранат [и др.] М.: Высш. шк., 1987. 352 с.
9. Абрамов О. В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. М.: Наука, 2000. 312 с.
10. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. 726 с.
11. Матаушек И. Ультразвуковая техника. М.: Metallurgizdat, 1962. 511 с.
12. Тявловский М. Д. Классификация ультразвуковых кавитационных полостей по критерию их технологических возможностей // Докл. АН БССР. 1990. Т. 34, № 10. С. 901–903.
13. Maisonhaute E., Prado C. Surface acoustic cavitation understood via nanosecond electrochemistry // Ultrasonics Sonochemistry. 2002. No. 9 (6). P. 297–303.
14. Марков А. И. Применение ультразвука в промышленности. М.: Машиностроение; София: Техника, 1975. 240 с.
15. Агранат Б. А. Ультразвуковая технология. М.: Metallurgia, 1984. 503 с.
16. Ktefting D. R. High-speed observation of acoustic cavitation erosion in multibubble systems // Ultrasonics Sonochemistry. 2004. No. 11 (3–4). P. 119–123.
17. Stereoscopic high-speed recording of bubble filaments / J. Appel [et al.] // Ultrasonic Sonochemistry. 2003. No. 11. P. 39–43.
18. Кувшинов Г. И., Прохоренко П. П. Акустическая кавитация у твердых поверхностей. Минск: Наука и техника, 1990. 112 с.
19. McDonald D. J. Ultrasonics, what they can do // Wire Industry. 1988. No. 55 (650). P. 78–80.
20. Красовская А. К., Беспалов С. В. Очистка ГИС от канифольно-содержащих флюсов с помощью высокочастотной ультразвуковой обработки // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1985. Вып. 6 (378). С. 59–62.
21. Kim N., Kim S. Application of megasonic cleaner to sub-micron particles of SIL optical flying head // Microsystem Technologies. 2003. No. 9 (4). P. 225–231.
22. Hatano H. High-frequency ultrasonic cleaning tank utilizing oblique incidence // IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1996. No. 43 (4). P. 531–535.
23. Hey D. Streaming cleans SMT assemblies // Electronic Production. 1989. No. 18 (2). P. 23.
24. Qi Q., Brenton G. J. Mechanism of removal of micron-sized particles by high-frequency ultrasonic waves // IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1995. Vol. 42, no. 4. P. 619–629.
25. Методы повышения активности кавитации / Н. В. Дежкунов [и др.] // Ультразвуковые технологические процессы – 2000: тез. докл. Междунар. конф., Архангельск, 27–30 сент., 2000 г. Севродвинск, 2000. С. 64–65.



26. Коган М. Г. Ультразвуковые поля в технологических устройствах с применением жидких сред // Применение ультразвука в технологии машиностроения. 1960. № 2. С. 31–36.
27. Флинн Г., Мэзон У. Физика акустической кавитации в жидкостях // Методы и приборы ультразвуковых исследований. М., 1967. С. 7–186.
28. Розенберг Л. Д. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 2. Мощные УЗ-поля. М.: Наука, 1968. 266 с.
29. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та. 1980. 280 с.
30. Румак Н. В., Ланин В. Л., Бондарик В. М. Динамика захлопывания кавитационных полостей в жидкостях и расплавах // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1996. № 1. С. 115–118.

### References

1. Ivakhnenko V. N., Kasinskiy N. K., Tomal' V. S. Formation by vacuum methods on disk surfaces of thin films uniform in thickness. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya* [Vacuum Technology and Technology], 2003, vol. 13, no. 3, pp. 127–133 (In Russian).
2. Fuchs F. J. The Key to Ultrasonics-Cavitation and Implosion. *Precision Cleaning*, 1995, no. 3 (10), pp. 13–17.
3. Akselrud G. A., Molchanov A. D. *Rastvorenie tverdykh veshchestv* [Dissolution of solids]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 268 p.
4. Prokhorenko P. P., Dezhkunov N. V., Konovalov G. E. *Ultrazvukovoy kapillyarnyy effekt* [Ultrasonic capillary effect]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1981. 135 p.
5. Breslavets A. V., Hutornenko V. D. *Ultrazvukovaya ochistka radioapparatury* [Ultrasonic cleaning of radio equipment]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1973. 80 p.
6. Murray J. Ultrasonic Clearing: What's The Buzz? *Circuits Manuf.*, 1990, vol. 30, no. 1, pp. 72–74.
7. Ultrasonic Clearing gets a big Boost. *Electron. Packaging and Prod.*, 1990, vol. 30, no. 5, p. 22.
8. Agranat B. A., Dubrovin M. N., Havskiy N. N., Eskin G. I. *Osnovy fiziki i tekhniki ultrazvuka* [Basics of ultrasound physics and engineering]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 352 p.
9. Abramov O. V. *Vozdeystvie moshchnogo ultrazvuka na zhidkie i tverдые metally* [Effects of powerful ultrasound on liquid and solid metals]. Moscow, Nauka Publ., 2000. 312 p.
10. Bergman L. *Ultrazvuk i ego primenenie v nauke i tekhnike* [Ultrasound and its application in science and technology]. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoy literatury Publ., 1957. 726 p.
11. Mataushek I. *Ultrazvukovaya tekhnika* [Ultrasound technology]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962. 511 p.
12. Tyavlovskiy M. D. Classification of ultrasonic cavitation cavities by the criterion of their technological capabilities. *Doklady AN BSSR* [Reports of the AN BSSR], 1990, vol. 34, no. 10, pp. 901–903 (In Russian).
13. Maisonhaute E., Prado C. Surface acoustic cavitation understood via nanosecond electrochemistry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2002, no. 9 (6), pp. 297–303.
14. Markov A. I. *Primenenie ultrazvuka v promyshlennosti* [Application of ultrasound in industry]. Moscow, Mashinostroenie Publ.; Sofiya, Tekhnika Publ., 1975. 240 p.
15. Agranat B. A. *Ultrazvukovaya tehnologiya* [Ultrasound technology]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 503 p.
16. Ktefting D. R. High-speed observation of acoustic cavitation erosion in multibubble systems. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2004, no. 11 (3–4), pp. 119–123.
17. Appel J., Koch P., Krefting D., Lauterborn W. Stereoscopic high-speed recording of bubble filaments. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2003, no. 11, pp. 39–43.
18. Kuvshinov G. I., Prohorenko P. P. *Akusticheskaya kavitatsiya u tverdykh poverkhnostey* [Acoustic cavitation at hard surfaces]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1990. 112 p.
19. McDonald D. J. Ultrasonics, what they can do. *Wire Industry*, 1988, no. 55 (650), pp. 78–80.
20. Krasovskaya A. K., Bepalov S. V. Purification of GIS from rosin-containing fluxes using high-frequency ultrasonic treatment. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektronika* [Electronic equipment. Series Electronics], 1985, issue 6 (378), pp. 59–62 (In Russian).
21. Kim N., Kim S. Application of megasonic cleaner to sub-micron particles of SIL optical flying head. *Microsystem Technologies*, 2003, no. 9 (4), pp. 225–231.
22. Hatano H. High-frequency ultrasonic cleaning tank utilizing oblique incidence. *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1996, no. 43 (4), pp. 531–535.
23. Hey D. Streaming cleans SMT assemblies. *Electronic Production*, 1989, no. 18 (2), pp. 23.

24. Qi Q., Brenton G. J. Mechanism of removal of micron-sized particles by highfrequency ultrasonic waves. *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1995, vol. 42, no. 4, pp. 619–629.

25. Dezhkunov N. V., Francheskutto A., Mezzon T., Chuti P. Methods to increase the activity of cavitation. *Tezisy докладov Mezhdunarodnoy konferentsii "Ul'trazvukovye tekhnologicheskie protsessy – 2000"* [Abstracts of the International conference "Ultrasonic technological processes – 2000"], Severodvinsk, 2000, pp. 64–65 (In Russian).

26. Kogan M. G. Ultrasonic fields in technological devices with the use of liquid media. *Primenenie ultrazvuka v tekhnologii mashinostroeniya* [Application of ultrasound in engineering technology], 1960, no. 2, pp. 31–36 (In Russian).

27. Flinn G., Mezon U. Physics of acoustic cavitation in liquids. *Metody i pribory ul'trazvukovykh issledovaniy* [Methods and devices of ultrasonic research]. Moscow, 1967, pp. 7–186 (In Russian).

28. Rozenberg L. D. *Fizika i tehnika moshchnogo ultrazvuka. Kn. 2: Moshchnye UZ-polya* [Physics and technology of powerful ultrasound. Book 2: Powerful ultrasonic fields]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 266 p.

29. Shutilov V. A. *Osnovy fiziki ultrazvuka* [Fundamentals of ultrasound physics]. Leningrad, Izdatelstvo Leningradskogo universiteta Publ., 1980. 280 p.

30. Rumak N. V., Lanin V. L., Bondarik V. M. Dynamics of slamming cavitation cavities in liquids and melts. *Vesti AN Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. nauk* [News of the Academy of Sciences of Belarus. Ser. physical and technical sciences], 1996, no. 1, pp. 115–118 (In Russian).

#### Информация об авторах

**Буцько Сергей Александрович** – аспирант кафедры полиграфического оборудования и систем обработки информации. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shehran35@gmail.com

**Шмаков Михаил Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой полиграфического оборудования и систем обработки информации. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: contr7@tut.by

#### Information about the authors

**Butsko Siarhei Alyksandravich** – PhD student, the Department of Printing Equipment and Information Processing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shehran35@gmail.com

**Shmakov Mikhail Sergeevich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Printing Equipment and Information Processing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: contr7@tut.by

Поступила 30.01.2018