

УДК 621.9.047/048

DOI: 10.12737/article\_5a313b64c3ad20.78558022

**А.М. Сарсенгалиев**, аспирант,

**Н.В. Бекренёв**, д.т.н.

(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
г. Саратов, ул. Политехническая, д.77)

E-mail: Ajdo5@mail.ru, nikolaj.bekrenev@yandex.ru

## **Научная технология с использованием ультразвука при очистке труднодоступных поверхностей деталей сложной формы\***

*Проанализирована техническая проблема обеспечения ресурса деталей топливной аппаратуры и систем транспортировки природного газа с учетом их загрязнения в процессе изготовления и эксплуатации. Показана перспективность удаления загрязнений методом ультразвуковой очистки. Предложен и экспериментально подтвержден метод повышения эффективности ультразвуковой очистки указанных поверхностей до 10 раз путем сообщения изделию ультразвуковых колебаний непосредственно в зоне локализации загрязнений.*

**Ключевые слова:** ультразвук; производительность очистки; кавитация; загрязнения; контакт; циклическое нагружение.

**A.M. Sarsengaliyev**, Post graduate student,

**N.V. Bekrenyov**, D. Eng.

(Gagarin State Technical University of Saratov 77, Polytechnicheskaya Str., Saratov)

## **Science intensive technology with ultrasound use at hard-to-reach surface refinement in complex parts**

*A technical problem in assurance of life in parts of fuel equipment and a system of natural gas transportation is analyzed taking into account their pollution in the course of manufacturing and operation. An outlook in decontamination by a method of ultrasonic refinement is shown.*

*There is offered and proved experimentally a method for ultrasonic refinement efficiency increase up to 10 times for the surfaces mentioned above by means of imparting ultrasonic oscillations to a product directly in the area of pollution detections.*

**Keywords:** ultrasound; refinement productivity; cavitation; pollutions; contact; cyclic loading.

Современное транспортное и энергетическое машиностроение характеризуется применением в перспективных двигателях, топливно-распределительных системах и устройствах транспортировки энергоносителей (например – природного газа) изделий, обладаю-

щих сложной конструкцией. Например, в распылителях топлива сопряжение «игла – корпус» имеются зазоры не более нескольких микрометров, изменение которых приводит к нарушению нормальной работы по впрыску топлива. В процессе функционирования в отверстиях и зазорах скапливается нагар, что приводит к разрегулировке системы. Вследствие высокой трудоемкости изготовления подобных изделий, замена загрязненных распылителей новыми сопряжена с большими затратами труда и денежных средств.

Транспортировка природного газа обеспе-

\* Исследования выполнялись при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (контракт №0015494 «Разработка ультразвуковой технологии восстановления работоспособности горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов»).

чивается газоперекачивающими агрегатами (ГПА). В настоящее время используются два типа ГПА: с насосами с электроприводом и с насосами, в качестве привода которых используются конверсионные газотурбинные двигатели.

Одними из основных элементов газотурбинных установок ГПА являются камеры сгорания. Паспортными данными регламентируются определенная мощность, частота вращения ротора турбин высокого и низкого давления, а также выбросы в окружающую среду соединений классов COx и NOx. Опыт эксплуатации горелочных устройств на компрессорных станциях выявил некоторые особенности применения данных систем.

Горелочные устройства имеют до 140 рабочих разнонаправленных отверстий малого диаметра (0,8...1,0 мм). В процессе эксплуатации происходит отложение соединений сопутствующих горючему газу элементов на стенках каналов и отверстий. Это вызывает повышенное газодинамическое сопротивление, что приводит к снижению фактической мощности ГПА, а также повышенному содержанию соединений COx и NOx, что сказывается отрицательно на экологических показателях агрегата.

Отмеченные нарушения проявляются задолго до выработки горелочным устройством паспортного ресурса, что вызывает необходимость замены комплекта этих устройств на новый и дополнительные финансовые расходы для компрессорной станции, что в конечном итоге увеличивает оплату услуг по транспортировке газа для потребителей.

Решить указанные проблемы можно путем восстановления загрязненных изделий методами очистки.

В различных отраслях машино- и приборостроения, начиная с середины XX в., успешно применяется метод ультразвуковой очистки, который является наиболее эффективным и качественным среди других методов (химического, механического, плазменного и др.). Научные аспекты ультразвуковой кавитации и ее применения при обработке в жидких средах изучены Б.А. Агранатом, Ф.Ф. Брониним, Е.С. Киселевым, М.А. Маргулисом, М.А. Промтовым, В.М. Приходько, М.Г. Руденко, И.А. Сироткиным, В.Н. Хмелевым и др.

Разработана теория ультразвуковой кавитации при различных температурных условиях, плотностях моющих сред, интенсивности ультразвука и его частоты. Исследовано и доказано положительное влияние частотной мо-

дуляции ультразвуковых колебаний на эффективность ультразвуковой обработки и очистки. Разработаны и выпускаются серийно ультразвуковые ванны различной мощности и вместимости, а также автоматизированные моечно-очистные комплексы, в том числе использующие многочастотное ультразвуковое воздействие и «качение» частоты вблизи среднего заданного уровня [1].

Однако результаты данных исследований применимы в основном для очистки внешних поверхностей или относительно «открытых» внутренних полостей. Процессы развития кавитации в малогабаритных «скрытых» внутри корпуса полостях и разнонаправленных каналах малого диаметра малоинтенсивны и не позволяют эффективно удалять загрязнения, альтернативные ультразвуковые методы очистки таких поверхностей изучены недостаточно. Также не рассмотрены вопросы сохранения целостности тонкостенного собранного при помощи сварки изделия при воздействии на него мощного ультразвука, интенсивностью, достаточной для очистки «скрытых» каналов.

Авторами выполнены теоретические и экспериментальные исследования, позволившие обосновать новую технологическую схему ультразвуковой очистки, сочетающую объемную кавитационную очистку с локализованным в месте залегания загрязнений контактным воздействием ультразвука [2 – 7].

Целью исследования явилось повышение эффективности и качества ультразвуковой очистки закрытых полостей и каналов малого диаметра в деталях машиностроения сложной формы типа горелочных устройств и распылителей топлива на основе обоснования технологии, включающей сочетание общего кавитационного и локализованного в загрязненной зоне контактного вибровоздействия с учетом собственных резонансных частот изделия.

Для достижения поставленной цели предложен следующий подход:

- изучение химического состава загрязнений с целью определения основного метода их разрушения и удаления;
- изучение распределения загрязнений по поверхности каналов и отверстий; изучение форм собственных колебаний изделия при различных частотах и выявление частот, генерирующих такое распределение деформаций поверхности изделия, при котором пучности оказываются в наиболее загрязненных зонах;
- введение изделия в контакт с ультразвуковым преобразователем с определенным

усилием и сообщением колебаний изделию на установленной на основе моделирования частоте с одновременной кавитацией объема жидкости и ее прокачкой через каналы для эффективного вымывания отслоившихся загрязнений.

Исследования проводили следующим образом. Сначала разработали феноменологическую модель, позволяющую по заданной величине изгибных напряжений в корпусе изделия, превышающей адгезионную прочность слоя загрязнений, но меньшей, чем длительный предел выносливости материала, определять амплитуду ультразвукового воздействия. Затем выполняли компьютерное моделирование деформаций корпуса изделия на различных частотах, позволяющих выявить частоты с локализацией пучностей колебаний непосредственно в зонах наибольшей интенсивности загрязнений. Далее проводили экспериментальные исследования.

Исследования проводили на примере горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам на специально разработанной установке с электромеханическим преобразователем на основе пяти пьезокерамических излучателей, соединенных с общим ступенчатым кольцевым волноводом с питанием от генератора УЗГИ1-2.5(1)(1.5)(2) производства ООО «Ультразвук-ТЕО» (г. Саратов) мощностью 1,0 кВт и частотой 22 кГц  $\pm 7,5\%$ . Химический состав отложений в каналах исследовали методом энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа при помощи растрового электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan), оснащенного химическим анализатором INCA PentaFETx3 (Oxford).

Внешний вид поверхностей каналов и полостей оценивали при помощи компьютерного анализатора изображений АГПИМ-6М. Измерение вибрационных и шумовых характеристик изделия и торца волновода в процессе очистки проводили при помощи компьютерного виброакустического комплекса ВК-01. Фактическую частоту колебаний напряжения генератора, поступающего на излучатели измеряли частотомером ЧЗ-34. Амплитуду колебаний волновода на холостом режиме и под нагрузкой измеряли индуктивным датчиком с усилителем типа 214 по шкале с ценой деления 0,5 мкм.

Качество очистки каналов и отверстий оценивали при помощи специального стенда по скорости набора давления воздуха равного 400 Н/мм<sup>2</sup> в герметичном баллоне, куда последовательно помещали горелочные устрой-

ства после эксплуатации и после цикла очистки. Предварительно качество очистки оценивали по расходу воды (2 л), заливаемой в центральный подводящий канал горелочного устройства. Интенсивность удаления загрязнений определяли путем взвешивания образцов-имитаторов до и после цикла очистки на электронных весах RM200 с точностью 0,0001 г.

Моделирование собственных частот колебаний и напряженно-деформированного состояния обрабатываемого элемента детали в зависимости от условий обработки и выполняли методом конечных элементов в программной среде APM Winmashine (модуль Structure-3D).

Было допущено, что причиной разрушения последних являются внутренние напряжения, возникающие под действием кавитации или, соответственно, изгибных высокочастотных колебаний очищаемой поверхности. При этом считали, что условием разрушения является превышение уровня напряжений над уровнем адгезионной прочности слоя загрязнения. Получено выражение, связывающее величину напряжений с амплитудой ультразвуковых колебаний и конструктивными особенностями очищаемого объекта:

$$\sigma_{F1} = \frac{CA^{0,56}l}{0,1D^3(1-C^4)}, \quad (1)$$

где  $C$  – коэффициент динамической силы ультразвука;  $A$  – амплитуда ультразвуковых колебаний;  $l$  – длина элемента конструкции, подвергаемого воздействию;  $D$  – наружный диаметр элемента конструкции;  $C_1 = d / D$  – соотношение диаметров очищаемого канала  $d$  и наружного диаметра.

Расчетом по зависимости получен график (рис. 1), позволивший установить диапазон параметров эффективной контактной очистки с учетом адгезионной прочности загрязнений 12...15 Н/мм<sup>2</sup> (максимальные значения по априорной информации).

В программной среде APM Winmashine проведено на твердотельной 3D модели изделия определение собственных частот колебаний и выявлено положение их пучностей, установлено распределение полей деформаций и полей напряжений. По результатам анализа найдены режимы ультразвукового воздействия, при которых теоретически деформации в местах концентрации напряжений минимальны, а пучности амплитуды смещения располагаются вблизи областей максимальной загрязненности.

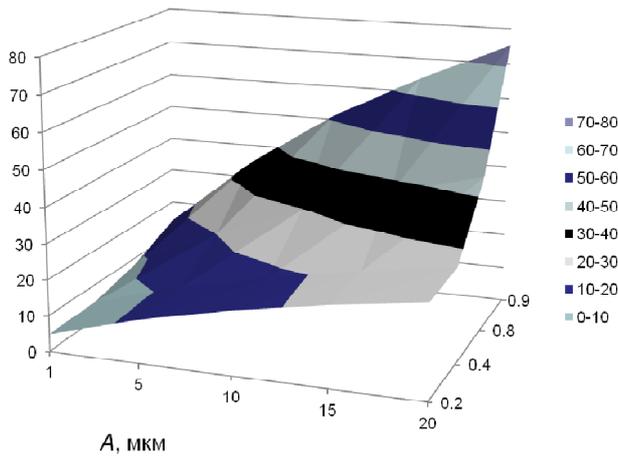


Рис. 1. Изгибные напряжения  $\sigma_F$  в трубчатой конструкции, подвергнутой воздействию ультразвука, в зависимости от амплитуды  $A$  и соотношения диаметра канала и наружного диаметра  $C_1$

Конечно-элементная сетка (сторона 3 мм) горелочного устройства в области газоотводящих трубок представлена на рис. 2, а, диаграмма напряжений деформированного состояния при различных параметрах вибрационного нагружения горелочного устройства – на рис. 2, б, принятая за оптимальную диаграмму форм собственных колебаний в ультразвуковом диапазоне частот – на рис. 3.

При частотах порядка 22 000 Гц интенсивно деформируется центральный корпус, но трубки остаются мало деформированными, т.е. очистка внутренних полостей возможна лишь частично. При 23 000...23 300 Гц происходит деформация, как центрального корпуса, так и трубок, но хвостовая часть остается мало затронутой деформациями.

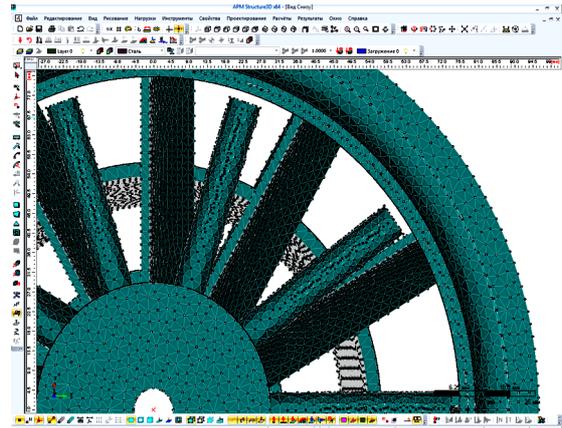
Исследовали возможности восстановления пропускной способности каналов горелочного устройства путем ультразвуковой очистки. При этом рассматривали следующие возможные схемы:

- «традиционная» очистка за счет кавитации в объеме моющей жидкости, в которую помещено горелочное устройство;
- очистка с ультразвуковым нагружением горелочного устройства, помещенного в моющую жидкость, на оптимальной для кавитации частоте ультразвука;
- очистка с ультразвуковым нагружением горелочного устройства, помещенного в моющую жидкость, на произвольной частоте ультразвука.

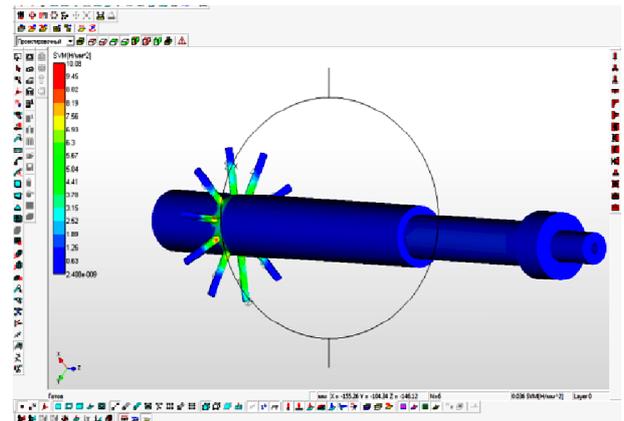
Предварительные обобщенные результаты представлены на рис. 4.

$A$  – общая очистка за счет кавитации в объеме жидкости ( $f = 22,4$  кГц);  $B$  – очистка контактным методом при максимальной интенсивности кавитации ( $f = 22,5-23,0$  кГц);  $C$  – очистка контактным методом при  $f = 21,5$  кГц.

Установлено, что наибольшая эффективность очистки наблюдается на неоптимальной для интенсивной кавитации (в данных условиях) частоте около 21,5 кГц, при  $f < 21$  кГц и  $f > 22,4$  кГц эффективность очистки резко снижается.



а)



б)

Рис. 2. Конечно-элементная сетка в области газоотводящих трубок (а) и карта деформаций в центральном теле и трубках (б)

С целью выявления механизма данного факта исследовали кинетику удаления загрязнений из «скрытых» полостей и каналов при использовании объемной кавитационной очистки и контактного воздействия ультразвукового преобразователя.

Полученные в результате обработки экспериментальных данных аппроксимирующие функции процессов имеют следующий вид:

$$\Delta Q_o = 0,0012 A^{0,731} t^{0,165} \quad (2)$$

$$\Delta Q_K = 0,015A^{1,19}t^{0,238} \quad (3)$$

где  $\Delta Q_o$  и  $\Delta Q_K$  – изменение веса образцов-имитаторов после очистки по известной схеме объемной очистки и по предлагаемой схеме соответственно;  $A$  – амплитуда колебаний торца ультразвукового преобразователя;  $t$  – время очистки.

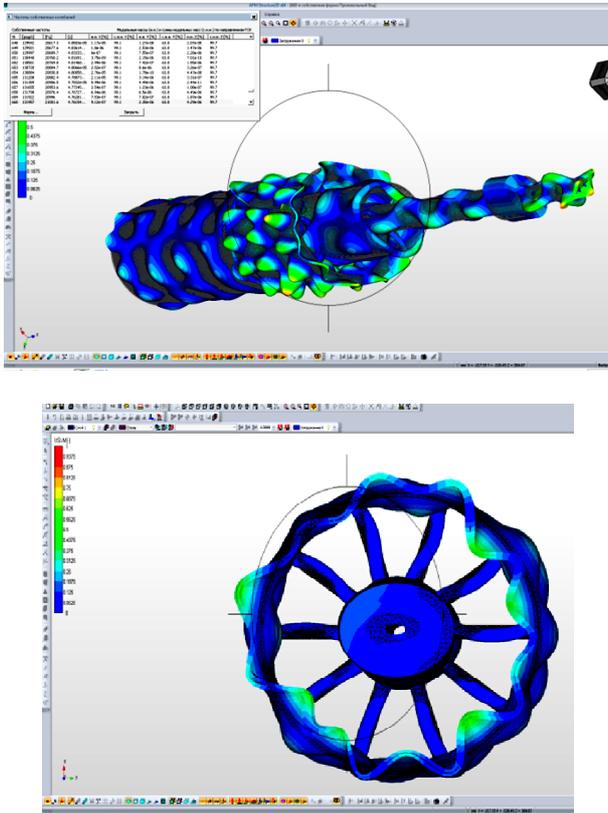


Рис. 3. Колебания элементов горелочного устройства при частоте вынуждающей силы 21 001 Гц

Снижение времени накачки баллона через горелочное устройство от исходного состояния, %

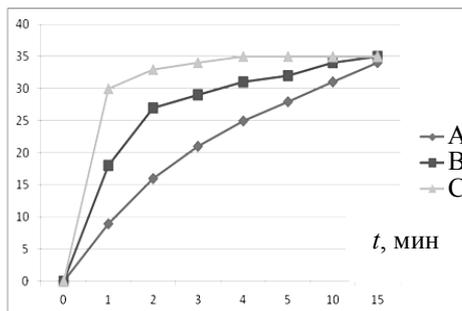


Рис. 4. Исследование кинетики ультразвуковой очистки каналов различными методами

Результаты расчетов по (2) и (3) представлены на рис. 5.

Видно, что при изменении схемы очистки сохраняется общий характер зависимостей, но при этом влияние амплитуды колебаний пре-

образователя существенно (на 62 %) выше. Объяснить данный эффект можно исходя из изменившегося механизма разрушения загрязнений.

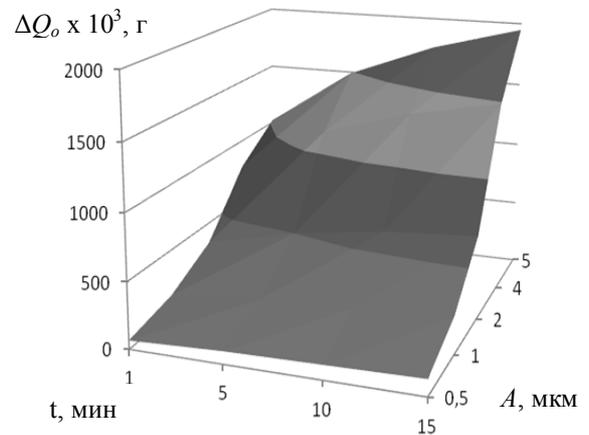
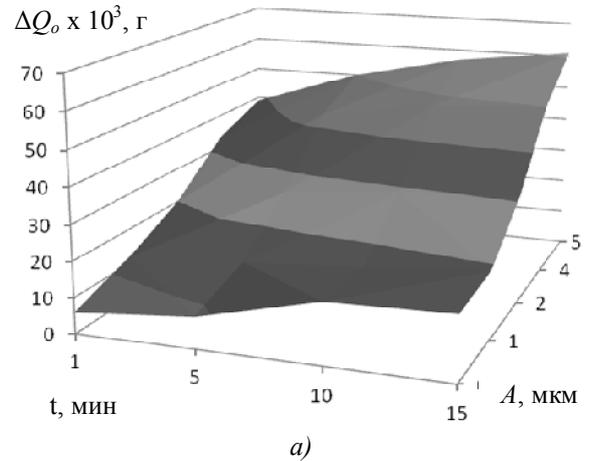


Рис. 5. Зависимость изменения веса образца от схемы и режимов ультразвуковой очистки: объемная кавитация (а), контактное воздействие (б)

При объемной очистке «работает» кавитационный механизм воздействия ударных волн и мгновенных температур схлопывающихся микропузырьков на загрязнения, что приводит к скалыванию микрочастиц загрязнений, проникновению жидкости в трещины и поры согласно эффекту Ребиндера и отслоению фрагментов.

В «скрытых» зонах, несмотря на внешнюю интенсивность ультразвука, кавитация мало интенсивна, энергия пузырьков и их количество резко падают по мере удаления от входных кромок отверстий и каналов. Это приводит к снижению эффективности разрушения агломератов и слоев загрязнений.

При контактной схеме непосредственно поверхность изделия, покрытая загрязнениями, испытывает высокочастотные волновые де-

формации, что способствует возникновению внутренних напряжений и усталостных трещин в агломератах и слоях загрязнений. В результате происходит резкое снижение адгезивно-когезионной прочности загрязнений и разрушение достаточно крупных их фрагментов, сопровождающееся уже упомянутым выше эффектом Ребиндера. Таким образом, в единицу времени происходит удаление больших масс материала.

В ходе экспериментальных исследований по отработке комбинированной технологии очистки определен рациональный диапазон частот механических колебаний волновода по критериям максимального значения виброускорения и минимального уровня звукового давления (рис. 6).

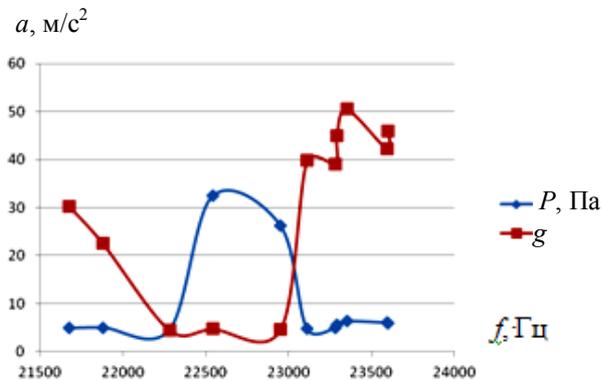


Рис. 6. Изменение значений виброускорения  $a$  звукового давления  $p$  на расстоянии 0,5 м от ультразвуковой ванны в зависимости от частоты подаваемого на преобразователь напряжения (нагрузка 120 Н)

Видно, что наибольшие значения виброускорений соответствуют частоте около 23 300 Гц. При этом кавитационные эффекты менее заметны, чем на частотах 22 500...23 000 Гц. В тоже время параметры звукового давления минимальны. В области частот кавитации наблюдается возрастание звукового давления почти в 3,5 – 4 раза. Фактические максимальные значения давления составляют 9,0...9,5 Па, что примерно соответствует значениям 100...105 дБ, являющимся предельно допустимыми в третьоктавных полосах при частотах 20...25 кГц. На частоте порядка 21 500 Гц наблюдается второй пик виброускорения при минимальном звуковом давлении. Аналогичные результаты получены при нагрузке 85 Н.

Отличие состоит в смещении области высокого звукового давления в диапазон более высоких частот. Таким образом, подтверждается целесообразность использования полу-

ченной при моделировании и теоретическом расчете частоты колебаний преобразователя 21,0...21,5 кГц. Этим же объясняется большая эффективность очистки в некавитационном режиме (см. рис. 4). Колебания активной накладки, разработанной авторами колебательной системы, сообщаются пятью пьезокерамическими излучателями. С целью расширения номенклатуры очищаемых изделий стакан выполнен волновой длины с отверстием, диаметр которого ступенчато уменьшается от выходного торца к входному, с расположением ступени на расстоянии  $1/2\lambda$  от выходного торца. Наружная поверхность стакана также ступенчатая с расположением ступени на расстоянии  $1/4\lambda$  от выходного торца.

Такая конструкция обеспечивает высокую интенсивность колебаний, приводящую даже к образованию поверхностных волн (рис. 7). С целью снижения нагрузки на активную накладку объем жидкости рекомендуется таким, чтобы выходной торец накладки был покрыт слоем 10...15 мм.

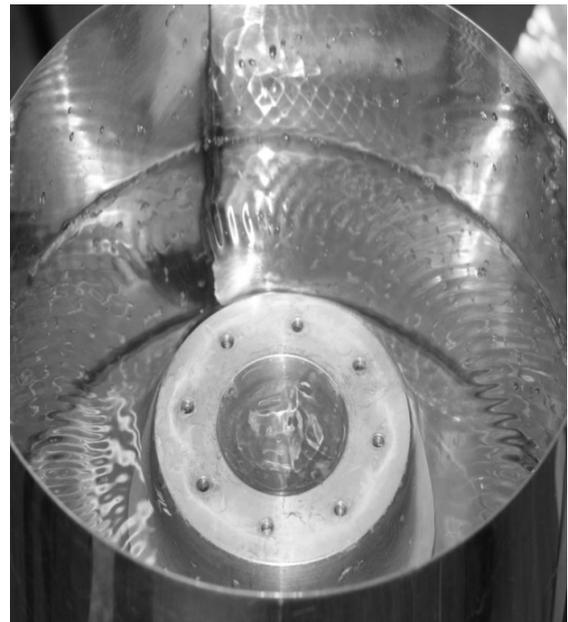


Рис. 7. Акустические волны на поверхности жидкости над волноводом при рациональной интенсивности ультразвука

Особенностью разработанной установки (рис. 8) является применение автоматизированного цикла очистки по контролю текущего расхода моющей жидкости через очищаемое горелочное устройство при помощи ультразвукового расходомера с микроконтроллером, обеспечивающим погрешность измерений не более 1 %, шкафа для размещения ультразвуковой ванны на виброопорах с эффективной

шумоизоляции на основе базальтовых нитей, использование специальной активной накладки преобразователя в виде ступенчатого стержня волновой длины.



Рис. 8. Автоматизированная установка комбинированной очистки (шумоизолированный шкаф с ультразвуковым устройством открыт)

Таким образом, в результате исследования получены теоретические зависимости, позволяющие определить амплитуду колебаний ультразвукового преобразователя, обеспечивающую изгибные напряжения в конструкции изделия, превышающие адгезионную прочность слоя загрязнений и обоснованы технологические режимы ультразвуковой комбинированной очистки горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам: частота ультразвука 21,0...21,5 кГц при выходном токе генератора 1,0...1,2 А; расход моющей жидкости 1,4...1,5 м<sup>3</sup>/ч; температура моющей жидкости 40...55 °С; усилие прижатия изделия к торцу активной накладки ультразвукового преобразователя 80...120 Н, позволившие восстановить пропускную способность изделий на 97...98 % и обеспечить их повторное использование.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бржозовский, Б.М. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. – 348 с.
2. Сарсенгалиев, А.М. Новая ультразвуковая технология восстановления работоспособности горелочных уст-

ройств газоперекачивающих агрегатов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 2(56). – С. 39–43.

3. Сарсенгалиев, А.М. Оптимизация технологии и разработка установки комбинированной ультразвуковой очистки горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам на основе компьютерного моделирования звуковых полей и полей напряжений // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2013. – № 13-1 (59). – С. 89–92.

4. Сарсенгалиев, А.М. Новая ультразвуковая технология восстановления работоспособности горелочных устройств // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2014. № 11 (70). С. 6-12.

5. Сарсенгалиев, А.М. Исследование ультразвуковой очистки внутренних полостей и каналов в изделиях транспортного и энергетического машиностроения контактным методом // Вопросы электротехнологии. – 2016. – № 1 (10). – С. 35–42.

6. Сарсенгалиев, А.М. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов в процессе ультразвуковой контактной очистки / Информационно-коммуникационные технологии в науке, производстве, образовании (ICIT-2016) // Сб. материал. Междунар. научно-техн. конф., СГТУ им. Гагарина Ю.А., ООО Издательство «Научная книга (Воронеж)», – 2016.

7. Сарсенгалиев, А.М. Обоснование контактного метода ультразвуковой очистки труднодоступных внутренних полостей и каналов в изделиях транспортного и энергетического машиностроения // Вопросы электротехнологии. – 2017. – № 1 (15). – С.13–17.

## REFERENCES

1. Brzhozovsky, B.M. *Ultrasonic Engineering Processes and Equipment in Mechanical Engineering and Instrument Making Industry*: manual. Saratov: Saratov State Technical University, 2009. – pp. 348.

2. Sarsengaliev, A.M. New ultrasonic technology for burner device working capacity restoration of gas-compressor units // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.2(56). – pp. 39-49.

3. Sarsengaliev, A.M. Technology optimization and development of plant for combined ultrasonic cleaning of burner devices to gas-compressor units based on computer simulation of sound and stress fields // *Mathematical Methods in Engineering and Technologies*. – ММТТ. – 2013. – No.12-1 (59). – pp. 89-92.

4. Sarsengaliev, A.M. New ultrasonic technology for working capacity restoration of burner units // *Mathematical Methods in Engineering and Technologies* – ММТТ. 2014. No.11 (70). – pp. 6-12.

5. Sarsengaliev, A.M. Investigation of ultrasonic cleaning of inner cavities and channels by contact method of transport and power engineering products // *Problems of Electrotechnology*. – 2016. – No.1 (10). – pp. 35-42.

6. Sarsengaliev, A.M. Computer simulation of stress-strain state of burner units in gas-compressor units during ultrasonic contact cleaning / Information-communication Technologies in Science, Production, Education (ICIT-2016) // *Proceedings of the Inter. Scientific. Tech. Conf., Gagarin STU of Saratov*, “Scientific Book” Publishing House (Voronezh), - 2016.

7. Sarsengaliev, A.M. Substantiation of contact method for ultrasonic cleaning of hard-to-reach inner cavities and channels in products of transport and power engineering // *Problems of Electrotechnics*. – 2017. – No.1 (15). – pp. 13-17.

Рецензент д.т.н. Д.С. Фатюхин