

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени
Гагарина Ю.А.»**



На правах рукописи

Сарсенгалиев Айдос Миргенгалиевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
УДАЛЕНИЯ ОКСИДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ С
ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ДЕТАЛЯХ СЛОЖНОЙ
КОНСТРУКЦИИ СОЧЕТАНИЕМ КАВИТАЦИИ
И КОНТАКТНОГО ВИБРОВОЗДЕЙСТВИЯ**

Специальность: 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Бекренев Николай Валерьевич

Саратов 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ГЛАВА. АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ СЛОЖНЫХ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	12
1.1 Проблема удаления технологических и эксплуатационных загрязнений с поверхностей деталей машиностроительных изделий.....	12
1.2 Методы и технологии удаления загрязнений.....	15
1.3 Физическая сущность процесса ультразвуковой очистки.....	18
1.4 Известные схемы ультразвуковой очистки. Результаты научных исследований.....	24
1.5 Технические средства ультразвуковой очистки. Преимущества и недостатки	30
1.6 Предлагаемое техническое решение. Постановка задач исследований.....	40
1.7 Выводы.....	43
2 ГЛАВА. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА КОМБИНИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО УДАЛЕНИЯ ОКСИДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ПОЛОСТЕЙ И КАНАЛОВ	44
2.1 Модель разрушения оксидных слоев при местном контактном ультразвуковом воздействии...44	
2.2 Определение рациональных частот колебаний горелочного устройства на основе компьютерного моделирования.....	49
2.3 Модель напряженно-деформированного состояния горелочного устройства в процессе ультразвукового удаления оксидного поверхностного слоя.....	62
2.4 Выводы.....	64
3 ГЛАВА. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ	66
3.1 Методы и средства исследования.....	66
3.2 Исследование состава поверхностного оксидного слоя.....	69
3.3 Физическое моделирование процесса контактного ультразвукового удаления оксидного поверхностного слоя.....	74
3.4 Исследование кинетики ультразвуковой обработки горелочных устройств различными методами	76
3.5 Выводы.....	82
4 ГЛАВА. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ И ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ОБОРУДОВАНИЮ	83
4.1 Обоснование технологических режимов и способа ультразвуковой комбинированной обработки.....	83

4.2 Технические предложения по созданию специального ультразвукового оборудования.....	87
4.3 Выводы.....	94
5 ГЛАВА. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	95
5.1 Автоматизированная установка комбинированной ультразвуковой обработки горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов	95
5.2 Производственные испытания технологии и установки.....	100
5.3 Оценка технико-экономической эффективности технологии и установки.....	105
5.4 Выводы.....	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	113
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	124
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	125
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	126
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	128
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	129
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	130
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Современное транспортное и энергетическое машиностроение характеризуется применением в перспективных двигателях, топливно-распределительных системах и устройствах транспортировки энергоносителей (например, природного газа) изделий, обладающих сложным конструктивом.

Транспортировка природного газа обеспечивается газоперекачивающими агрегатами (ГПА). В настоящее время используется 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 CO_x и NO_x . 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 уменьшение проходного сечения отверстий и каналов вследствие образования оксидного поверхностного слоя и отложения 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 CO_x и NO_x , 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 вызывает рост оплаты услуг по транспортировке газа для потребителей.

Решить указанные проблемы можно путем восстановления диаметра проходного сечения отверстий и каналов изделий путем удаления оксидного поверхностного слоя.

В различных отраслях машино- и приборостроения, начиная с середины XX века, успешно применяется для разрушения тонких поверхностных слоев и загрязнений метод ультразвуковой очистки, который является наиболее эффективным и качественным среди других методов (химического, механического, плазменного и др.) поверхностной обработки путем создания условий для кавитации в технологической жидкости. Научные аспекты ультразвуковой кавитации и ее применения при обработке в жидких средах изучены Б.А. Агранатом, Ф.Ф. Брониным, В.М. Приходько, В.Н. Хмелевым, Е.С. Киселевым, М.А. Промтовым, Д.С. Фатюхиным, М.Г. Руденко, И.А. Сироткиным, и др.. Разработана теория ультразвуковой кавитации при различных температурных условиях, плотностях технологических сред, интенсивности ультразвука и его частоты. Исследовано и доказано положительное влияния частотной модуляции 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 «качание» частоты вблизи среднего заданного уровня. Однако, результаты данных исследований применимы в основном только 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 поверхностный слой и связанные с ним 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 поверхностной обработки

«скрытых» каналов. Изложенное позволяет считать тему данного диссертационного исследования актуальной.

Тема диссертационного исследования поддержана Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (контракт №0015494 «Разработка ультразвуковой технологии восстановления работоспособности горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов»).

Цель работы: повышение эффективности процесса увеличения проходного сечения отверстий и каналов путем ультразвукового разрушения оксидных слоев и их удаления с поверхности закрытых полостей и каналов малого диаметра в деталях машиностроения сложной формы типа горелочных устройств на основе обоснования и разработки технологии обработки, включающей сочетание локализованного контактного вибровоздействия в рабочей зоне и кавитации с учетом собственных резонансных частот изделия.

Задачи работы:

1. Определение оптимальной схемы и закономерностей процесса ультразвукового удаления оксидных поверхностных слоев в отверстиях и каналах малого диаметра, расположенных внутри корпуса изделия, обоснование рациональных технологических режимов;
2. Разработка технологии комбинированной ультразвуковой обработки, обеспечивающей эффективное удаление оксидных поверхностных слоев одновременного воздействия на них вибрационных деформаций и кавитации технологической жидкости;
3. Оценка собственных частот колебаний типовых изделий и выявление распределения пучностей деформаций и звукового давления по корпусу на основе компьютерного моделирования;
4. Изучение влияния сообщаемых изделию ультразвуковых колебаний на величину деформаций и внутренних напряжений в элементах конструкции изделия и их сравнение с допускаемыми значениями;
5. Анализ химического состава поверхностного слоя и его распределения по каналам и полостям изделия и подбор технологических жидкостей;

6. Разработка предложений по созданию специальной установки комбинированной ультразвуковой поверхностной обработки внутренних полостей и каналов изделий машиностроения.

Объект исследований: детали машиностроения типа горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов с разнонаправленными внутренними полостями и каналами малого диаметра.

Предмет исследований: технологический процесс ультразвуковой поверхностной обработки полостей и каналов малого диаметра, закономерности разрушения и удаления оксидных слоев в результате сочетания эффекта ультразвуковой кавитации и локализованного контактного вибровоздействия.

Методы и средства исследований. Исследования проводили на примере горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам на специально разработанной установке 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 поверхностного слоя 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 АГПМ-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. Эффективность процесса оценивали по расходу воды объемом 2 л, заливаемой в центральный подводящий канал горелочного устройства. Интенсивность удаления оксидного слоя определяли путем взвешивания образцов-имитаторов до и после цикла очистки на электронных весах RM200 с точностью 0,0001 г.

Моделирование собственных частот колебаний изделия, полей внутренних напряжений и величин деформаций выделенного элемента изделия в зависимости от условий обработки выполняли методом конечных элементов в программной среде APM Winmashine (модуль Structure-3D).

Научная новизна:

1. Теоретически и экспериментально обоснован способ ультразвуковой поверхностной обработки труднодоступных полостей и каналов путем возбуждения ультразвуковых колебаний в корпусе изделия на частотах, обеспечивающих генерацию максимальных волновых деформаций в области локализации оксидных слоев, в сочетании с общим кавитационным воздействием и с прокачкой через газоподводящие каналы и отверстия технологической жидкости.

2. Обоснованы модели полей напряженного состояния и амплитудно-частотных характеристик вибраций, возникающих в изделии в процессе контактного вибровоздействия, позволяющие установить рациональный частотный диапазон и безопасные для соединений элементов изделия параметры динамических нагрузок, обеспечивающие высокоинтенсивное удаление оксидного слоя.

3. Установлены виброакустические параметры воздействия ультразвука на изделие сложной многоэлементной конструкции, позволяющие определить рациональные технологические режимы.

4. Изучена кинетика удаления оксидных слоев с поверхности скрытых полостей и каналов при внешнем контактном воздействии ультразвукового излучателя, позволившая обосновать рациональную схему оборудования.

Практическая ценность

1. Разработан технологический процесс увеличения проходного сечения отверстий деталей типа горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов, обеспечивающий до 97-98% эталонной пропускной способности за счет применения общего кавитационного и локализованного контактного

вибровоздействия на резонансных для изделия частотах с прокачкой технологической жидкости через каналы.

2. Разработана конструкция устройства для ультразвуковой обработки на двух резонансных частотах, защищенная патентом RU № 2548344 (опубл. 20.04.2015 г.) и позволяющая практически реализовать технологическую схему с обеспечением максимальной интенсивности ультразвука в различных «скрытых» зонах изделия сложной формы.

3. Разработана принципиальная схема и технические предложения по конструкции специальной ультразвуковой установки с активным контролем изменения проходного сечения отверстий и каналов по расходу технологической жидкости, на основе которых изготовлен и внедрен опытный образец. На способ обработки и реализующую его установку получен патент RU № 2625465 (опубл. 14.07.2017 г.).

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности 05.02.07.

п. 2 Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий.

п. 3 Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки.

п. 6 Новые технологические процессы механической и физико-технической обработки и создание оборудования и инструментов для их реализации.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Способ комбинированной ультразвуковой поверхностной обработки внутренних полостей и каналов диаметром 1 мм и менее в изделиях сложной

формы на частотах, определяемых на основе анализа виброакустических характеристик детали с учетом требуемого положения пучности колебаний.

2. Результаты экспериментальных исследований процесса комбинированной ультразвуковой поверхностной обработки внутренних полостей и каналов малого диаметра и полученные на их основе закономерности, устанавливающие связь амплитудно-частотных параметров ультразвука, собственной частоты колебаний изделия, времени обработки и значений увеличения пропускной способности каналов и отверстий.

3. Результаты внедрения: технологические режимы комбинированной ультразвуковой обработки – частота ультразвука 21,0-21,5 кГц при выходном токе генератора 1,0-1,2 мА, расход технологической жидкости 1,4-1,5 м³/ч, температура моющей жидкости 40-55 °С, позволившие обеспечить пропускную способность изделий до 97-98% эталонной и продлить их срок эксплуатации. Годовой экономический эффект из расчета на один комплект горелочных устройств составляет 162,7 тыс. руб.

Реализация результатов работы осуществлена путем применения обоснованной схемы и технологических режимов при проектировании в ОАО «НИТИ-Тесар» (г. Саратов) опытного образца автоматизированной установки комбинированной ультразвуковой обработки «Резонанс» (ХД № 568 15ед 223 от 27.03.2015 г.) и путем внедрения технологии в РММ Петровского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Саратов» в рамках ХД №370/683 от 11.09.2014 г.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на шести международных и всероссийских научно-технических конференциях, а также научных семинарах Института электронной техники и машиностроения СГТУ имени Гагарина Ю.А. .

Экспериментальный образец установки для комбинированной ультразвуковой обработки горелочных устройств и технологический процесс экспонировались на 15-й Юбилейной выставке оборудования, технологий и услуг в области энергетики «ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. 2013» (24-26 апреля 2013 г., г. Саратов) и на VIII Саратовском салоне изобретений, инноваций

и инвестиций (19-20 сентября 2013 г., г. Саратов), по итогам которого были награждены дипломом II степени и серебряной медалью.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 12 научных работ, в том числе 3 работы в журналах из списка, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ, а также 2 патента на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 134 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 109 наименований и 6 приложений, содержит 57 рисунков и 5 таблиц.

1 ГЛАВА. АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ СЛОЖНЫХ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

1.1 Проблема удаления технологических и эксплуатационных загрязнений с поверхностей деталей машиностроительных изделий

К загрязнениям относятся любые вещества, имеющие химический состав, отличающийся от химического состава материала детали. При этом загрязнения можно разделить на две группы:

1) технологические, возникающие в процессе изготовления и сборки изделия и представляющие собой частицы стружки, остатки технологических смазочно-охлаждающих жидкостей, частицы протирочного материала, остатки доводочно-полировальных паст и т.п.;

2) эксплуатационные, представляющие собой продукты абразивного, адгезионного, коррозионного и других видов износа поверхностей деталей, а также вещества, поступившие из внешней среды.

По способу связи с материалом детали поверхностные загрязнения можно разделить на две основные группы.

К первой относятся загрязнения, механически приставшие к поверхности детали. Эти загрязнения находятся на поверхности, но не образуют с материалом детали химических соединений. Загрязнения первой группы обычно представляют собой следы жиров и масел, остатки шлифовальных и полировочных паст, пыль, копоть, частицы абразивных материалов, следы от прикосновения рук и т.д.

Ко второй группе относятся загрязнения, образовавшиеся в результате химического взаимодействия материала поверхности детали с окружающей средой. Эти загрязнения представляют собой оксидные пленки, сернистые соединения на поверхности металла, следы выщелачивания стекла и т.д.

Загрязнения приводят к повышенному браку на отдельных технологических операциях, уменьшению срока службы, снижению надежности и т.д.

Наиболее сложные по составу и структуре, а также физико-механическим свойствам эксплуатационные загрязнения образуются на поверхности изделий, функционирующих в химически активных средах при повышенной температуре. При этом загрязнения могут образовываться как на внешней поверхности изделия, так и во внутренних полостях и каналах, форма и размеры которых определяются конструктивными особенностями изделия и его служебным назначением.

Типовыми представителями изделий сложной формы, работающими в температурно напряженных условиях в многокомпонентных средах являются горелочные устройства газоперекачивающих агрегатов, использующихся в системах магистральной транспортировки природного газа, а также детали топливно-распределительной аппаратуры и агрегатов управления в двигательной системе транспортных и технологических машин.

В настоящее время эксплуатируются два типа газоперекачивающих агрегатов: с электроприводом насоса и с приводом на основе конверсионных газотурбинных авиационных двигателей, турбина которых приводится во вращение скоростным потоком горящего газа, сжигаемого в специальных горелочных устройствах.

В комплект горелочных устройств входит 1 центральная горелка (дежурная) и 6 периферийных (рис. 1.1).

Центральная и периферийные горелки представляют собой весьма сложные сварные конструкции, основной особенностью которых являются отверстия малого диаметра (сопла выхода газа). Диаметр отверстий составляет 0,8-1,0 мм. Отверстия расположены в 10 пилонх (радиальных трубках) во взаимно перпендикулярных плоскостях (на каждой трубке 4 отверстия в вертикальной плоскости и 8 – в горизонтальной, а также в центральном корпусе горелки (2 – в осевом и 14 - в радиальном направлении). Пилоны закрыты сдвоенным кольцевым кожухом, в котором расположены лопатки-завихрители потока воздуха, поступающего в камеру сгорания за счет эжекции [20].

Из опыта эксплуатации горелочных устройств, а также по параметрическим экологическим замерам ГПА, следует, что горелочные устройства показывают не полное соответствие их паспортным данным в части обеспечения заявленного уровня выбросов на назначенный период эксплуатации. Кроме этого наблюдается снижение развиваемой мощности ГПА в целом, что негативно сказывается на обеспечении заданного режима транспорта газа [27].



Рисунок 1.1. Комплект горелочных устройств

Отмеченные нарушения проявляются задолго до выработки горелкой паспортного ресурса.

Предположительно, причиной увеличения содержания выбросов относительно установленных паспортными данными может быть неполное сгорание газа, вызванное уменьшением поступления кислорода из воздуха в камеру сгорания. Поскольку поступление воздуха обеспечивается эжекцией через завихрители, то уменьшение количества воздуха определяется снижением скорости потока газа через отверстия в корпусе горелочного устройства, которое может быть вызвано увеличением сопротивления потоку вследствие уменьшения проходного сечения каналов и отверстий. Причина уменьшения проходного сечения вызывается, скорее всего, постепенным скоплением на стенках каналов и

кромках отверстия загрязнений, поступающих с потоком газа из магистрального трубопровода через коллектор. Также возможно, но маловероятно, смешивание какой-то части газа с кислородом воздуха вне камеры сгорания и частичное сгорание с образованием указанных выше соединений.

Таким образом, очистив каналы и отверстия от загрязнений, возможно довести проходное сечение до исходного значения и, соответственно восстановить первоначальные расход и скорость газа, а следовательно, и поступающий вследствие эжекции кислород воздуха. В результате сгорание газа будет восстановлено, и выбросы NO_x и CO снизятся. Одновременно будут восстановлены обороты турбины и развиваемая компрессором мощность, что обеспечит требуемую производительность транспортировки газа через магистраль.

Решить указанные проблемы можно путем очистки загрязненных поверхностей горелочных устройств и подобных изделий. Однако, решение данной задачи осложняется труднодоступностью загрязненных участков, закрытых внешними кожухами и представляющими собой узкие кольцевые каналы или отверстия малого диаметра.

1.2 Методы и технологии удаления загрязнений

Как известно, очистка поверхностей деталей от загрязнений может производиться несколькими методами: механическими; химическими; электрофизическими.[15].

К *механическим методам* относятся прокачка через отверстия воздушно-абразивной или водно-абразивной струи; обработка вращающимися капроновыми, медными или стальными проволочными щетками; притирка абразивными пастами с последующей промывкой. Все указанные механические методы неприменимы для решения поставленной задачи по причине малого размера отверстий и трудному доступу к ним (очистка щетками и притирка) и,

основное, по причине изменения размера отверстия под влиянием силового царапающего действия не только на загрязнения, но и на стенки отверстия.

К химическим методам относится применение химических соединений, растворяющих загрязнения и отделяющих их от основы. Химическая очистка обычно состоит из двух стадий: обезжиривания и травления.

Под *обезжириванием* подразумевают удаление загрязнений, химически не связанных с материалом детали (то есть загрязнений первой группы). При обезжиривании структура поверхности детали не нарушается. Операции обезжиривания обычно проводят либо в щелочных составах, либо в органических растворителях. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки.

Травление – это способ удаления загрязнений, химически связанных с материалом детали, и создание шероховатой или гладкой структуры поверхности. При травлении нарушается структура и вместе с загрязнениями удаляются поверхностные слои материала детали. Если после очистки получается гладкая зеркальная поверхность, то операция травления называется *химическим полированием*.

Травление и полирование производят в кислотных, щелочных растворах или расплавах. Качественное и быстрое выполнение операций травления или полирования возможно только после предварительного обезжиривания деталей. Иначе жировые загрязнения будут препятствовать непосредственному контакту между травящим раствором и поверхностью детали.

Однако эти методы применяются чаще для удаления жировых и других биологических пленок и наслоений и малоэффективны в случае наличия твердых, сплавленных с основой загрязнений, которые наиболее ожидаемы для горелок, работающих в условиях высоких температур. Также немаловажным фактором является экологическая опасность большинства растворителей, применение которых вызовет дополнительные затраты на нейтрализацию отработанных растворов и охрану труда.

Основными *электрофизическими методами* очистки являются обработка в вакууме газоразрядной плазмой и ультразвуковая очистка в воде и моющих

средах на водной основе. Использование газоразрядной плазмы характерно для производства изделий микроэлектроники и электровакуумных приборов. Данный метод осуществляется в вакууме и обеспечивает эффективное удаление пленок всех типов толщиной не более десятков микрон [3]. Очевидно, в отверстиях горелок возникают отложения значительно большей толщины, поскольку указанные выше пленки не оказывали бы влияния на расход и горение газовой смеси. К тому же использование сложных вакуумных установок требует специального помещения, обученного персонала и наличия больших вакуумных камер для размещения очищаемых горелок. Это существенно удлиняет цикл обработки и приведет к неоправданным экономическим затратам.

В авиационном приборо- и агрегатостроении, а также в производстве топливной аппаратуры (распылители дизельного топлива) и других машиностроительных производствах широко применяются методы ультразвуковой очистки, позволяющие эффективно удалять загрязнения средней степени твердости и прочности сцепления с основой без нарушения ее поверхности. Для очистки отверстий используются специальные системы в виде трубчатых (игольчатых) излучателей с прокачкой жидкости через канал. Такие установки были разработаны и внедрены на ряде предприятий в 70-х – 90-х годах XX века в Научно-исследовательском технологическом институте (в настоящее время ОАО «НИТИ-Тесар» г. Саратов).

Однако для их применения с целью очистки каналов в горелочных устройствах необходимо решить несколько сложных технических задач, связанных с введением трубчатых излучателей в большое количество каналов, что сложно автоматизировать по причине малой точности взаимного расположения каналов в корпусе горелки и их труднодоступности.

Использование ручных систем, применяемых в авиационной промышленности, нецелесообразно по причине высокой трудоемкости раздельной очистки большого количества отверстий. Также следует учитывать технические трудности прокачки моющей среды через игольчатые излучатели

очень малого диаметра, поскольку диаметры отверстий в горелках, как указывалось выше, имеют размер 1,0 мм.

Тем не менее анализ технической литературы [12, 13, 15, 17, 19, 28, 31, 41, 42, 43, 44, 48, 58, 59, 64, 89, 96, 99] и производственного опыта показывает, что ультразвуковая промывка и очистка является наиболее универсальным и эффективным методом для удаления загрязнений с поверхности различных изделий машино- и приборостроения, в частности карбюраторов, инжекторов, топливных форсунок и т.п.

Количество загрязнений, остающихся на поверхности материала после очистки, зависит от метода очистки следующим образом [15]:

- струйная очистка, промывка, ополаскивание – 85%;
- очистка в бензине – 70%;
- очистка в парах хлорированных растворителей – 65%;
- вибрационная очистка – 56%;
- кипячение в воде – 45%;
- ручная очистка металлическими щетками – 10%;
- ультразвуковая очистка – менее 2%.

Это позволяет считать данный метод с учетом проведения необходимых исследований и опытно-конструкторских работ перспективным для увеличения проходного сечения отверстий и каналов за счет удаления образовавшихся оксидных поверхностных слоев.

1.3 Физическая сущность процесса ультразвуковой очистки

Принцип ультразвуковой очистки основан на механическом действии ультразвуковых волн на загрязнения, находящиеся на поверхности деталей.

Любое колеблющееся тело (например, периодически сжимающаяся и разжимающаяся до прежнего состояния твердая пластина) заставляет колебаться в такт со своими колебаниями воздушную, жидкую или другую среду,

окружающую данное тело. Упругие механические колебания среды выражаются в том, что прилегающие к твердому телу слои воздуха или жидкости периодически поочередно сжимаются и разрежаются (разжимаются). Каждое колебание среды, состоящее из одного сжатия и разрежения, называется волной. Энергия, которую получают прилегающие к твердому телу слои воздуха или жидкости (и в результате которой они колеблются), передается соседним слоям, соответственно вызывая их колебания; другими словами, волны распространяются в среде, окружающей колеблющееся тело.

При распространении ультразвуковых волн в полупериод растяжения колеблющегося тела в водном растворе происходит возникновение пузырьков, заполненных парами жидкости и растворенными в ней воздухом и другими газами, а в последующий полупериод сжатия колеблющегося тела – их захлопывание. Явление образования и захлопывания пузырьков в жидкости, сопровождающееся сильными гидравлическими ударами в местах захлопывания пузырьков, называется *кавитацией*. Ударная волна передается жидкости (на микроучастке захлопывания пузырька) огромное ускорение. Чем больше ускорение приобретает жидкость, тем большей силой, способной совершать работу, обладает масса этой жидкости. Механические усилия, развивающиеся при возникновении кавитации, не только удаляют с поверхности жировые загрязнения, но могут разрушать также оксидные пленки.[6, 7, 8, 30, 36, 37, 38, 40, 47, 54, 55, 60, 62, 76, 83].

Загрязнения полностью удаляются с детали, когда захлопывание пузырьков происходит на поверхности детали или вблизи ее. В процессе кавитации интенсивно колеблющиеся пузырьки стремятся преимущественно скапливаться на участках поверхности детали, где сплошная пленка загрязнений уже частично разрушена и раздроблена при захлопывании предыдущих пузырьков. Они проникают под край остатков пленки загрязнения, при этом загрязнения подвергаются давлению изнутри и растяжению снаружи, разность между которыми достигает очень больших значений. Это еще больше

способствует отслоению загрязнений и отрыву их от очищаемой поверхности [18].

По общепринятой терминологии, существуют два типа активности пузырьков: стабильная кавитация и коллапсирующая, или нестационарная, кавитация, хотя граница между ними не всегда четко очерчена. Стабильные полости пульсируют под воздействием давления ультразвукового поля. Радиус пузырька колеблется около равновесного значения, полость существует в течение значительного числа периодов звукового поля. С активностью такой стабильной кавитации может быть связано возникновение акустических микропотоков и высоких сдвиговых напряжений. Коллапсирующие или нестационарные полости осциллируют неустойчиво около своих равновесных размеров, вырастают в несколько раз и энергично схлопываются. Схлопыванием таких пузырьков могут быть обусловлены высокие температуры и давления. Малые пузырьки могут расти вследствие процесса, называемого выпрямленной, или направленной, диффузией. Объяснение этого явления состоит в том, что за период акустического поля газ поочередно диффундирует в пузырек во время фазы разрежения и из пузырька во время фазы сжатия.

Рассмотрим эффекты, возникающие в жидкостях при прохождении ультразвуковых волн.[4, 33, 35, 48, 62, 63, 75, 78, 81, 85, 86, 92, 95, 99, 104, 105]

При интенсивности ультразвука более $0,3 \text{ Вт/см}^2$ в жидкой среде возникают следующие явления:

1) Генерирование и передача тепла, возникающие вследствие потерь энергии, неизбежных при распространении ультразвуковых колебательных процессов.

2) Кавитация, обуславливающая эрозию материалов, диспергирование, гомогенизацию, эмульгирование, ускорение диффузионных процессов.

3) Акустические течения – стационарные вихревые микро- и макропотоки жидкости, возникающие в ультразвуковом поле при колебаниях воздушного пузырька вблизи поверхности твёрдого тела.

4) Химические эффекты – ускорение различных химических реакций, деполимеризации, электрохимических процессов.

5) Диффузионные эффекты – интенсификация процессов проникновения молекул и атомов через стенки клеток, пористые мембраны и фильтры, уменьшение толщины пограничного слоя на поверхности раздела «жидкость – твёрдое тело».

6) Механические эффекты, заключающиеся прежде всего в эрозии поверхности материалов, помещённых в озвучиваемую жидкость. Эрозия возникает вследствие действия давлений, создаваемых при захлопывании кавитационных микропузырьков. Эти эффекты используются для удаления различных загрязнений, диспергирования и гомогенизации.

7) Эффект вакуума – в фазе разряжения колеблющейся среды снижается температура кипения жидкости, что ускоряет сушку порошкообразных и пористых материалов при пониженной температуре.

8) Капиллярные эффекты – под воздействием ультразвука значительно повышается скорость и уровень подъёма жидкости в капиллярах, облегчается её проникновение в пористые и другие неоднородные материалы.

Кавитация возникает в жидкости там, где происходят местные понижения давления, следствием чего являются локальные разрывы на расстояниях несколько микрометров. При акустической кавитации причиной местных разрывов жидкости служат гармонически меняющиеся давления, возникающие при распространении ультразвуковых волн.

При низких интенсивностях ультразвукового поля ($0,3 \text{ Вт/см}^2$) образуются мелкие пузырьки диаметром до 0,1 мм, скапливающиеся в узлах стоячей волны и сохраняющиеся здесь некоторое время. Первопричиной их являются выделившиеся газы, которые коагулировали в пузырьки. Под действием периодически меняющегося давления пузырьки пульсируют и изменяют свой объём в соответствии с частотой изменения звукового давления. При повышении интенсивности ультразвука часть растворившихся газов начинает выделяться, сливаясь в крупные пузырьки, поднимающиеся к поверхности. Происходит

дегазация. Описанный процесс называется газовой или псевдокавитацией. В дегазированной жидкости происходит истинная кавитация.[62,81,85]

При захлопывании кавитационного пузырька возникает местное повышение давления. Поскольку таких пузырьков образуется до нескольких миллионов в секунду, образуется кавитационная область, где действие указанных факторов весьма значительно. Захлопывание кавитационных пузырьков вызывает образование ударных волн, которые создают в ближайшей зоне давления, в 100 раз превышающие первичное давление акустического поля.

Динамика кавитационной области описывается дифференциальным уравнением Непайреса-Нолтинга [108]:

$$2\rho R^2 \frac{d^2 R}{dt^2} + 3\rho R \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + 4\sigma = 2R \left[P \sin(2\pi f t) - P_0 + \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \frac{R_0^3}{R^3} \right] \quad (1.1)$$

где R_0 – начальный радиус пузырька в момент времени $t=0$; P – амплитуда давления звуковой волны; f – частота колебаний; P_0 – гидростатическое давление; ρ – плотность жидкости; σ – поверхностное натяжение; R – текущий радиус пузырька.

Начальный радиус пузырька может быть определён по формуле Минаэрта-Смита [43, 44]:

$$f = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right)} \cdot \sqrt{\frac{3\chi}{\rho}}, \quad (1.2)$$

где χ – отношение теплоемкостей газа в пузырьке (для воды $\chi=1,4$).

Обычно последним слагаемым в формуле (1.2) пренебрегают и она выглядит следующим образом [61, 62, 63]:

$$f = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\chi P_0}{\rho}} \quad (1.3)$$

Согласно Рэлею, максимальное давление в жидкости на расстоянии $1,587R$ от центра пузырька равно:[61, 62, 63]:

$$P = P_0 \frac{R_0^3}{4^{4/3} R^3} \quad (1.4)$$

Давление на фронте кавитационной ударной волны может также определяться следующим образом [108]:

$$P_{\max} = \frac{P_0 \delta}{Z^4}, \quad (1.5)$$

где $Z = R_{\min} / R_{\max}$ – безразмерный минимальный радиус пузырька; $\delta = P_n / P_0$ – параметр, характеризующий содержание воздуха в полости; $P_n = P_d + P_e$ – давление внутри пузырька при его максимальном радиусе; P_d и P_e – парциальные давления насыщенного пара и воздуха.

Если пузырёк уменьшается от исходного радиуса R_0 до радиуса R , то создаётся давление

$$P = \sqrt{\left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1\right) \frac{2P_0}{3\beta}}, \quad (1.6)$$

где β – сжимаемость жидкости, равная для воды $50 \cdot 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$.

Полное смыкание пузырька при данном гидростатическом давлении происходит за время: [61,62,63]

$$t = 0,915 R_0 \sqrt{\frac{\rho}{P_0}} \quad (1.7)$$

Из выражения (1.7) следует, что увеличение частоты колебаний сопровождается уменьшением размеров полостей из-за сокращения времени цикла расширения и захлопывания. Число полостей поддерживается в равновесии в зависимости от акустического давления. Также с увеличением частоты колебаний увеличивается порог кавитации.

При распространении ультразвуковых колебаний в различных жидких средах происходят необратимые потери энергии, обусловленные внутренним трением. [4,47] Следует учитывать, что при распространении УЗ колебаний от излучающей поверхности, в обрабатываемой среде возникает распределенное в пространстве поле звуковых давлений. При этом в структуре поля, создаваемого гармоническим излучателем, различают три области: дальнее ультразвуковое

поле; область расстояний, сравнимых с размерами излучающей поверхности и длиной волны; область ближнего поля.

Сравнимость геометрических размеров излучающего рабочего элемента и объема технологического аппарата с длиной УЗ колебаний в среде обуславливает ряд интерференционных явлений в среде.

Ультразвуковое поле в области расстояний, сравнимых с длиной волны характеризуется рядом максимумов и минимумов, расположенных на различных расстояниях от излучающей поверхности. Количество интерференционных максимумов и минимумов уменьшается с уменьшением диаметра излучающей поверхности. Если диаметр излучающей поверхности становится меньше половины длины волны УЗ колебаний, то неоднородность поля исчезает и излучатель ведет себя как сферический излучатель нулевого порядка.[24, 63, 77, 82]

Рассеяние и отражение УЗ волн от изменяющейся в пространстве и времени кавитационной области приводит к усреднению акустического поля, интерференционная картина сглаживается и поле приобретает ярко выраженный мелкомасштабный диффузионный характер.

1.4 Известные схемы ультразвуковой очистки. Результаты научных исследований

В настоящее время распространены несколько схем ультразвуковой очистки [58, 87, 89, 90, 93], которые можно разделить по следующим признакам:

- по расположению излучателей в ванне (донное, боковое, комбинированное);
- по связи излучателей с корпусом ванны (встроенные и погружные);
- по конструкции активной накладки-волновода (с общим волноводом и с индивидуальными волноводами);

- по распределению интенсивности ультразвука в объеме ванны (с равномерным ультразвуковым полем и с полем убывающей с расстоянием от излучателя интенсивности);
- по частоте ультразвука (низкочастотные, высокочастотные, многочастотные, с модулированной частотой, с пульсацией частоты);
- по мощности (малой, средней, большой мощности);
- по качеству очистки (грубой высокопроизводительной очистки, тонкой и прецизионной очистки);
- по степени автоматизации (неавтоматизированные, с управлением по таймеру, автоматизированные, с цифровым управлением);
- по типу ультразвукового преобразователя (магнитострикционные и пьезокерамические);
- универсальные, специальные, линии комплексной очистки.

Как правило, в процессе очистки изделие помещают в ванну в подвешенном состоянии (например, в корзине) в области максимальной кавитации при воздействии ультразвука фиксированной частоты. Процесс разрушения загрязнений по данной схеме достаточно хорошо изучен благодаря работам отечественных и зарубежных исследователей [1, 3, 15, 45, 59, 62, 92, 94, 95, 101, 105, 107, 108, 109]. На базе многолетних исследований разработано и производится большое количество моделей ультразвуковых установок для очистки, краткий обзор которых приведен ниже.

Установлено, что эффективность ультразвуковой очистки зависит от частоты ультразвука, его интенсивности, температуры моющей жидкости и времени озвучивания [15, 95]. Эффективность очистки выше при использовании меньших частот преобразователя и расположении деталей в пучностях волн. Так, при использовании частот порядка 20 кГц через 60 с в пучности колебаний остается только 0,1% загрязнений, а в узле – 10%. При использовании частот порядка 400 кГц через 180 с в пучности колебаний остается 75% загрязнений, а в узле – 98%. Только в отдельных случаях, когда требования к качеству поверхности высоки, применяются большие частоты колебаний, т.к. интенсивная

кавитация на малых частотах может повредить поверхность деталей. Время очистки и обезжиривания обратно пропорционально интенсивности ультразвука, но с увеличением интенсивности более 1 Вт/см^2 время обработки снижается незначительно. Поэтому в технологии очистки рекомендуют для водных растворов выбирать интенсивность колебаний $1,5\text{-}2 \text{ Вт/см}^2$, а для органических растворителей, имеющих более низкий порог кавитации, - $1 - 1,5 \text{ Вт/см}^2$. Применение высоких интенсивностей ультразвука помимо неоправданных энергозатрат плохо тем, что вблизи поверхности преобразователя образуется кавитационная подушка, уменьшающая эффективность очистки при увеличении расстояния от него. Оптимальная температура моющего раствора составляет по литературным данным $55\text{-}70^\circ \text{C}$ [15, 45, 59, 62, 92].

Определенный эффект дает оптимальное сочетание амплитудно частотных характеристик ультразвуковой обработки [10], в последнее время в связи с развитием элементной базы, позволившей создать новые схемы ультразвуковых генераторов, и компьютерных систем управления и контроля разработаны принципиально новые методы и схемы ультразвуковой очистки, которые невозможно было реализовать в прошлом. Одной из причин разработки новых схем очистки явилось развитие приборостроения с системами на новых физических принципах, элементы которых изготовлены из твердых и хрупких материалов (кварц, ситалл, керамика), что потребовало разделения процесса в цикле на предварительную и прецизионную очистку, не нарушающую качество поверхности. Другой причиной стало повышение требований к качеству крупногабаритных изделий двигателестроения и энергетики, размеры которых захватывали несколько зон пучностей и узлов ультразвукового поля, что приводило к неравномерности удаления загрязнений.

Решить перечисленные проблемы позволяют схемы с равномерным распределением поля и с пульсацией («качанием») частоты [99, 101].

Функция *Sweep* вызывает непрерывную переменную звуковых максимумов, что обеспечивает равномерное распределение звукового поля по всему объёму ванны. Эта функция реализуется с преобразователями, которые установлены на

противоположных сторонах ванны, генератор управляет областью кавитации. При этом создается движущаяся волна, которая непрерывно перемещается через ванну таким образом, чтобы усредненная по времени сила ультразвука была одинаковой по всей ванне. Постоянные звуковые максимумы и минимумы исключаются. Таким образом, кавитация не наносит повреждений при мойке, и нет т.н. «поверхностного затемнения», что делает мойку более качественной и бережной.

Многочастотная технология предусматривает использование двух ультразвуковых частот в одной ванне. Более низкая частота используется для удаления грубых и стойких загрязнений. Более высокая частота прекрасно подходит для поверхностей, к качеству которых выдвигаются высокие требования и не допускается повреждение при очистке. Очистка ультразвуком осуществляется аккуратно и эффективно, обеспечивая очистку даже самых маленьких углублений и отверстий.

Преимущества многочастотной системы очистки состоят в том, что в объеме моющей среды не образуется «мертвых» зон в узлах интерференции. Поэтому многочастотное УЗ-облучение позволяет располагать объект очистки практически в любой зоне УЗ-ванны [89, 93, 102, 103].

Определенная комбинация одновременно используемых ультразвуковых частот, позволяет существенно повысить эффективность и качество удаления частиц с обрабатываемой поверхности объекта, и ускорить сам процесс [106]. Механизм повышения эффективности связан с одновременной реализацией кавитационных процессов на различных частотах, т.е. с формированием и захлопыванием кавитационных парогазовых пузырей различного размера, создающих различные по мощности и размерам ударные волны и кумулятивные струи. Развитие многочастотного направления ультразвуковой техники началось в 50-х годах 20 века. Оно обуславливалось необходимостью снижения негативных эффектов от формирования стоячих (стационарных) волн в резервуарах, стремлением увеличить диапазон размеров частиц, удаляемых ультразвуком, в

случае ультразвуковой очистки, а так же желанием повысить интенсивность проводимых процессов.

Другим приемом избавления от «мертвых» зон является использование генератора с качающейся частотой (рис. 1.2).

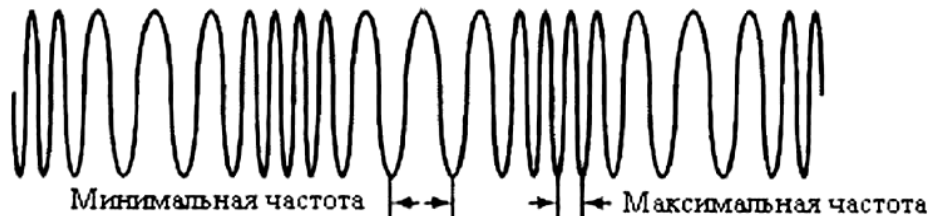


Рисунок 1.2. Режим с «качающейся» частотой

В этом случае узлы и пучности интерференционного поля перемещаются на различные точки очищающей системы, не оставляя без облучения какие-либо участки для очистки. Но КПД таких генераторов относительно низкий.

Режим *Pulse* можно включить, если необходимо кратковременно увеличить ультразвуковую мощность. В этом режиме быстрые частотные изменения создают высокую пиковую мощность. Это позволяет быстро удалять самые стойкие загрязнения, не воздействуя длительно на поверхность изделия.

Свежеприготовленные моющие жидкости насыщены воздухом. Очистка ультразвуком наиболее эффективна в дегазованных жидкостях. Быстрая дегазация свежеприготовленной моющей жидкости обеспечивается при работе мойки в режиме *Degas*. Регулярные паузы импульса выводят макроскопические газовые пузырьки на поверхность. Кавитация, которая является основным фактором очистки, достигает максимального эффекта только в дегазованной ванне. Цифровая техника генерации ультразвука предпочтительнее, поскольку на выходе получают прямоугольные импульсы чередующейся полярности (рис. 1.3). КПД таких генераторов близок к 100%, что позволяет решить проблему энергоемкости процесса. Использование сигнала прямоугольной

формы приводит к акустическому излучению богатому гармониками, что облегчает получение описанных выше режимов.

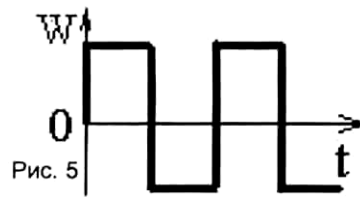


Рисунок 1.3. Импульсы цифрового генератора

В литературе [106] приводятся следующие возможные схемы реализации многочастотной обработки в жидких средах и, в частности, очистки.

На практике возможна практическая реализация многочастотного ультразвукового воздействия двумя основными видами многочастотных ультразвуковых аппаратов. Первый из используемых аппаратов подразумевает одновременное применение нескольких ультразвуковых колебательных систем, каждая из которых работает на своей рабочей частоте и подключен к собственному электронному генератору.

Возможно использование аддитивного эффекта, когда все ультразвуковые колебательные системы работают одновременно. К основным недостаткам такого варианта реализации УЗ аппарата следует отнести менее устойчивый процесс кавитации, в сравнении с одночастотными системами той же суммарной мощности, по причине возникновения эффекта интерференции ультразвуковых колебаний различных частот. Кроме того, практическая реализация обуславливает необходимость оборудовать каждую колебательную систему отдельным, согласованным с ней, генератором. Это приводит к значительному увеличению издержек на производство, что негативно сказывается на себестоимости. К преимуществам следует отнести конструктивную простоту исполнения, надежность. Выход из строя одного из комплектов – генератора и ультразвуковой колебательной системы – в данном случае не подразумевает прекращение работы всей установки, а лишь означает

некоторое снижение эффективности ее работы. Второй вариант исполнения подразумевает под собой конструкцию аппарата, ультразвуковая колебательная система которого является универсальной, и способна работать в определенном частотном диапазоне, а электронный генератор, в свою очередь, может быть, либо, так же универсальным, либо состоять из нескольких генераторов, имеющих на выходе свою фиксированную частоту.

Несмотря на отмеченные преимущества новых методов и схем ультразвуковой очистки, касающихся повышения равномерности воздействия ультразвукового поля и импульсного повышения его интенсивности для очистки «сложных» загрязнений, они не позволяют гарантированно решить поставленную задачу вследствие затухания ультразвуковых волн и, как следствие, кавитационных процессов во внутренних полостях и каналах изделий сложной формы типа горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов вследствие экранирующего эффекта многослойных внешних кожухов и других подобных конструктивных элементов.

1.5 Технические средства ультразвуковой очистки. Преимущества и недостатки

Применение ультразвука для очистки деталей различного назначения является сегодня наиболее широкой областью применения ультразвуковых технологий. Очистка осуществляется в ваннах, представляющих собой емкость (обычно из нержавеющей стали), в которую помещается моющая жидкость и кассеты с деталями [15]. Колебания в моющей жидкости генерируются излучателями, закрепленными на дне или стенках ванны (в этом случае акустическая и моющая системы выполнены в виде отдельного блока) или погружными излучателями (в этом случае очистка может осуществляться в любой емкости подходящего размера). Малые ванны с объемом моечной камеры до 35 литров применяются в приборостроении, медицине (стоматологии, хирургии), оптике, лабораториях. Они оснащены

пьезокерамическими преобразователями, встроенным генератором мощностью до 1000 Вт, автоматическим устройством для подогрева моющей жидкости, таймером (ванна УЗВ-1/100 выполнена без таймера и нагрева), обладают высокой надёжностью и пониженным уровнем шума. Ванны объёмом от 50 литров и более оснащены магнитострикционными преобразователями, полупроводниковым генератором, могут оборудоваться системами электрического или водного нагрева, водного охлаждения рабочего раствора и применяются в основном в машиностроении.

Некоторые характеристики ультразвуковых ванн традиционной схемы приведены ниже.

Установка ультразвуковая «Кристалл-15» с объёмом ванны 15 л. для предстерилизационной очистки медицинских изделий в растворах моющих средств, для предстерилизационной очистки медицинского инструмента, а также для удаления различных загрязнений, очистки и обезжиривания в водных растворах изделий и деталей приборо- и агрегатостроения. Установка имеет рабочую частоту 44,4 кГц, выходную ультразвуковую мощность не менее 500 Вт, ёмкость 18 л. Ёмкость ванны представляется достаточной для размещения в ней проблемных зон горелочного устройства, однако, установка не позволяет генерировать интенсивные ультразвуковые волны во внутренних зонах изделий.

Погружной ультразвуковой модуль фирмы «Александра-плюс» для промывки крупногабаритных изделий предназначен для оснащения моечных ванн, в которых происходит очистка крупногабаритных изделий и деталей. Модуль хорошо зарекомендовал себя для очистки судовых водо- и маслоохладителей от закоксовавшихся нефтепродуктов, нагара, накипи и других загрязнений. Размер деталей – 2×2×4 м. Ультразвуковой модуль представляет собой герметичную конструкцию, выполненную из нержавеющей стали. Дно корпуса модуля состоит из сегментов, сваренных под углом. Излучатели, вмонтированные в дно такой конструкции, обеспечивают наибольшую интенсивность очистки в пространстве под излучателями на

глубину 500–600 мм. Рабочая частота – 22 кГц, потребляемая мощность – 10 кВт. При эксплуатации ультразвуковой модуль перемещается над обрабатываемой деталью на определенной высоте в моющем растворе. Для улучшения качества очистки в корпус модуля вмонтирована трубка с форсункой для подачи моющего раствора под давлением в зону действия излучателей. Для защиты излучателей от механических повреждений на корпусе модуля установлено съемное ограждение. На крышке модуля приварены уши и рычаг для крепления модуля к механизму перемещения, а также механизм поворота модуля с фиксацией положения его на 30–60°. Потребляемая мощность модуля – не более 1,0 кВт. Габаритные размеры блока (длина×ширина) – не более 560×400 мм.

Недостатком модуля является техническая невозможность промывки и очистки внутренних полостей и каналов из-за их экранирования элементами корпуса очищаемой детали от ультразвуковой волны.

Комплект погружных ультразвуковых излучателей (рис. 1.4) позволяет осуществлять высокоэффективную очистку крупногабаритных изделий без использования специальной установки в любой емкости подходящих размеров.



Рисунок 1.4. Комплект ультразвуковых погружных излучателей

Недостатками комплекта являются техническая невозможность промывки и очистки внутренних полостей и каналов из-за их экранирования элементами корпуса очищаемой детали от ультразвуковой волны, а также большие габаритные размеры и высокая потребляемая мощность генератора и системы управления.

Установка МО-78 фирмы «Александра-плюс» предназначена для очистки изделий и деталей от технологических загрязнений в водных растворах технических моющих средств с помощью ультразвука. Установка состоит из ультразвуковой ванны в термо- и звукоизолирующем корпусе, системы рециркуляции моющего раствора, блока управления и подставки. Во время очистки моющий раствор непрерывно циркулирует, проходя через переливной карман и фильтр для удаления всплывающей масляной плёнки. Установка оснащена автоматическим подогревом моющего раствора, таймером, корзиной для очищаемых фильтров. Рабочая частота – 22 кГц, мощность шести излучателей – 600 Вт. Установка отличается высокой эффективностью, но очистка внутренних полостей и каналов невозможна из-за трудностей с подводом ультразвуковой энергии.

Установка МО-229 предназначена для очистки изделий от различных загрязнений в машиностроении, приборостроении, в ремонтном производстве и т. п. Ультразвуковая ванна представляет собой прямоугольную емкость со съёмной крышкой, выполненную из коррозионно-стойкой стали. Наружная поверхность покрыта звукоизолирующим материалом. Ванна устанавливается на виброизолирующие опоры и крепится к подставке. В дно ванны встроены шесть пьезокерамических излучателей и патрубков для слива отработанного раствора. На стенках ванны размещены ТЭНы и температурный датчик. Габаритные размеры ванны, входящей в состав установки, позволяет размещать в ней горелочные устройства, однако эффективная очистка внутренних полостей и каналов по выше названным причинам в ней практически невозможна.

Установка МО-239 предназначена для очистки крупногабаритных изделий и деталей в водных растворах технических моющих средств. Установка состоит

из ультразвуковой ванны, корзины для очищаемых деталей и шкафа управления. Ультразвуковая ванна снабжена ТЭНами, переливным карманом и системой циркуляции моющего раствора с самоочищающимся фильтром. Предусмотрен патрубок для подключения к вентиляции. Установка имеет большой объем ванны (365 л), суммарная мощность ультразвуковых излучателей, работающих на частоте 22 кГц, составляет 1600 Вт. Достоинством установки является наличие системы циркуляции и фильтрации моющей жидкости и возможность размещения в ванне нескольких горелочных устройств одновременно. Основной недостаток, как и всех существующих ультразвуковых ванн обычной схемы, состоит в малой эффективности промывки и очистки внутренних полостей и отверстий.

Комплекс сверхтонкой очистки КСО-901 (рис. 1.5) предназначен для промывки и очистки деталей и узлов точных навигационных приборов от остатков технологических загрязнений, сопутствующих сборочным операциям.

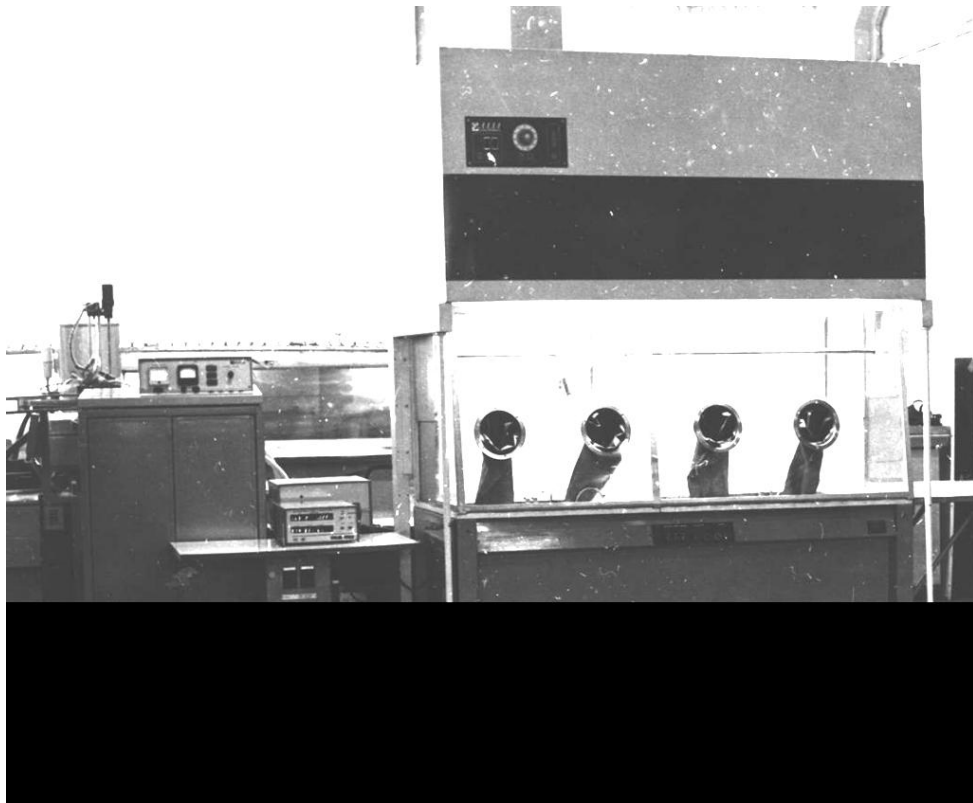


Рисунок 1.5. Комплекс сверхтонкой очистки деталей приборов КСО-901

На комплексе выполняются следующие операции:

- предварительная промывка вручную с использованием различных приспособлений (ерш, щетка и т.п.);
- промывка каналов и отверстий, в том числе резьбовых, диаметром 1-8 мм и глубиной до 130 мм с помощью шприца ШУ-901 с наложением ультразвуковых колебаний или без них;
- чистовая промывка погружением в ультразвуковую ванну;
- чистовая струйная промывка;
- обработка в парах моющей жидкости.

В качестве моющей жидкости используется хладон-113, а также пожаробезопасные смеси на его основе с этиловым спиртом или пропанолом-2. В зоне обработки обеспечивается чистота на уровне не более 4 частиц размером 0,5 мкм в 1 л воздуха.

Комплекс укомплектован ультразвуковым шприцем с питанием от генератора УЗУ-025М с регулировкой частоты. Магнитострикционный многопакетный преобразователь, смонтированный на дне ультразвуковой ванны, запитывается от генератора УЗГ-2-4М. Очистка моющей жидкости от жировых загрязнений осуществляется путем перегонки на установке для регенерации жидкостей УРЖ-903, а очистка от механических загрязнений – при помощи каскада последовательно расположенных фильтров с различной тонкостью фильтрации. Контроль запыленности воздуха в камере осуществляется прибором ПКЗВ-901. Камера в целом аналогична стандартному вытяжному шкафу типа 2Ш-НЖ. Данный комплекс широкие возможности по очистке изделий сложной формы, в частности – систему прокачки моющей жидкости, систему фильтрации, автоматическое управление циклом. Однако используемая схема очистки не позволяет эффективно удалять загрязнения с внутренних полостей сложной формы и каналов из-за экранирующего эффекта, гасящего ультразвуковые волны.

Далее приведены характеристики некоторых современных ультразвуковых ванн с функциями *Sweep*, *Pulse* и *Degas*, в том числе – многочастотных, производящихся зарубежными фирмами.

Ультразвуковые ванны *Elmasonic S* компании Elma Hans Schmidbauer GmbH & Co.KG (Германия) 13 типоразмеров с объёмом ванны от 0,8 до 90 литров оснащены микропроцессорным управлением режимом мойки с применением *Sweep* технологии, которая обеспечивает оптимальное распределение звукового поля в ванне посредством частотной модуляции. Базовая частота ультразвука 37 кГц.

Ультразвуковые мойки *Elmasonic XL* представляют собой многочастотные автономные установки для промышленной очистки деталей с управляемой областью кавитации в ванне. Установки имеют 3 типоразмера от 140 л до 300 л. Схема генерации ультразвукового поля – донная или боковая, в последнем случае излучатели могут быть установлены с двух или с трех сторон. Применено две частоты ультразвука для грубой и финишной очистки 25 или 45 кГц. Установка имеет панель управления с плоским дисплеем и лёгким управлением. Генерируется «управляемая область кавитации»: с ультразвуком с 2 сторон, обеспечиваются режим *Pulse* для увеличения ультразвуковой мощности за счет модуляции звуковой волны, режим *Sweep* для равномерного распределения ультразвуковой мощности по всей ванне, режим *Degas* для быстрой дегазации свежеприготовленных моющих растворов. По желанию заказчика выполняется откидная звукоизолирующая крышка для снижения уровня шума.

Компанией Elma Hans Schmidbauer GmbH & Co.KG выпускаются также промышленные ультразвуковые ванны 9 типоразмеров объёмом ванны от 4,7 до 20 литров для очистки твердых поверхностей из металла или стекла с возможностью переключения частоты ультразвука в диапазонах 25/45 кГц или 35/130 кГц для интенсивной или мягкой очистки. Установки имеют возможность изменения мощности от 10% до 100%, а также функцию *Degas* для быстрой и эффективной дегазации моющего раствора и функцию *Sweep* для равномерного распределения ультразвуковой мощности по всему объёму ванны.

Базовые ультразвуковые ванны *Everest Elektromekanik*, серия *CleanMax N* (Турция) – это серия промышленных установок для работы в тяжелых производственных условиях по 24 часа в сутки. Представлены стандартными

моделями объемом от 60 до 240 литров. Надежная конструкция из полированной нержавеющей стали предполагает гибкую комплектацию под самые сложные задачи. Ванны оснащаются системами фильтрации механических частиц, маслоотстойниками с предотвращением перелива, дополнительными ваннами промывки и камерами сушки горячим воздухом. Конструкция ванны *CleeanMax N* рассчитана на загрузку корзины с деталями при помощи тельфера, общей массой не более 200 кг. Рабочая частота ультразвука – 28 кГц. Установки имеют датчики уровня жидкости и таймер.

Эти, а также другие модели ультразвуковых ванн с функциями *Sweep*, *Pulse* и *Degas*, хотя и более эффективны по сравнению с установками обычной схемы, также не обеспечивают гарантированного удаления загрязнений из внутренних, экранированных от ультразвукового кавитационного поля полостей и каналов изделий сложной формы.

Ниже рассмотрены специальные установки ультразвуковой очистки, применявшиеся в авиационной промышленности и оснащенные специальным устройством для ультразвуковой промывки отверстий. [15]

Установка ультразвуковой прецизионной мойки УПМ-901 (рис. 1.6) предназначена для очистки поверхности и отверстий деталей топливной и пневмоаппаратуры от технологических загрязнений, а также тонкой очистки гидросмесей АМГ-10, ГМ50И, керосина, топлив Т1, ТС1 от механических примесей.

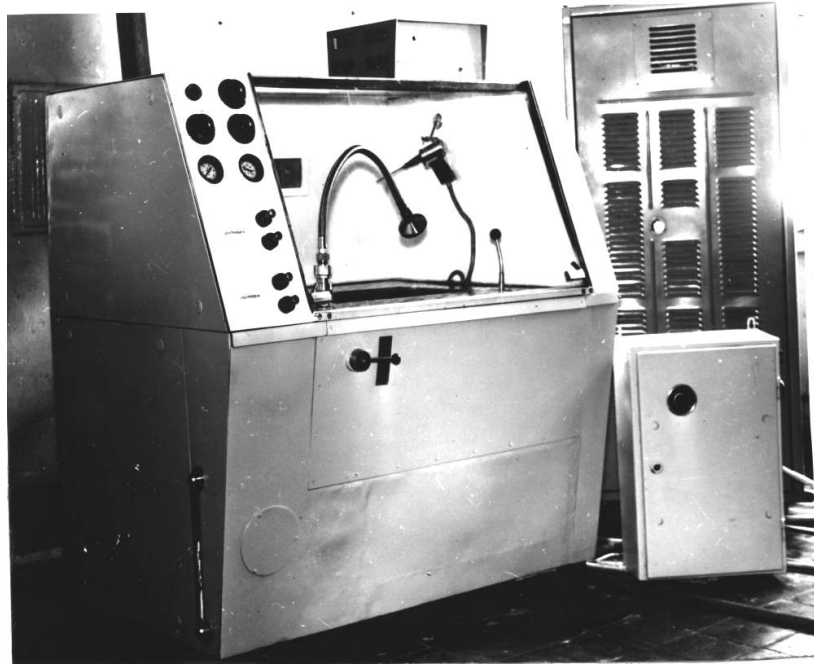


Рисунок 1.6. Установка ультразвуковой прецизионной мойки УПМ-901

Установка состоит из корпуса, камеры, ультразвукового шприца, ультразвуковой ванны с шестью преобразователями, центробежного очистителя, панели управления, ультразвукового генератора УЗУ-025М.

Работает установка следующим образом: очиститель забирает керосин из бака, очищает его от механических загрязнений и непрерывно подает в ультразвуковую щелевую ванну, слив из которой производится в ванну для замочки деталей. После заполнения ванны оператор загружает детали сначала в ванну для замочки, а затем – в ультразвуковую ванну.

При наличии в деталях отверстий диаметром 1-10 мм очистка их производится ультразвуковым шприцем во время замочки. Ультразвуковой генератор включается ножной педалью. Установка комплектуется промывочными иглами диаметром 0,8; 1,5; 2,0; 4,0; 6,0 мм из стали 12Х18Н10Т. При использовании установки для очистки жидкостей тонкость очистки составляет 2 мкм при расходе 40 л/мин.

Установка для ультразвуковой промывки отверстий УУПО-901 (рис. 1.7) предназначена для промывки сквозных, глухих, гладких, резьбовых

отверстий в деталях и узлах приборов и агрегатов от технологических загрязнений.

Установка комплектуется ультразвуковым шприцем, гидроочистителем, ультразвуковым генератором УЗУ-025. Рабочая частота установки 18 кГц, мощность ультразвукового генератора 500 Вт. Установка позволяет в течение 3-5 с промывать отверстия диаметром 1-8 мм и длиной до 180 мм.

Стенд для ультразвуковой очистки деталей СПДУ-901 (рис. 1.8) предназначен для очистки деталей и узлов прецизионных агрегатов и приборов от технологических загрязнений.

Стенд оснащен щелевой ультразвуковой ванной и улучшенной системой непрерывной циркуляции и очистки моющих сред. Стенд оснащен ультразвуковым генератором УЗГ-2-10 с потребляемой мощностью 19,5 кВт, работающим на колебательную систему из трех магнитострикционных преобразователей, работающих на общую активную накладку прямоугольной в плане формы. Тонкость очистки моющей среды центробежным очистителем составляет 1,5 мкм.



Рисунок 1.7. Установка ультразвуковой промывки отверстий УУПО-901



Рисунок 1.8. Стенд ультразвуковой очистки деталей СПДУ-901

Описанные установки, хотя и оснащены специальным устройством для промывки отверстий, не могут использоваться для решения имеющейся задачи по причине малых габаритов ванны для размещения большинства горелочных устройств и невозможности введения промывочной иглы во внутренние полости. Также из-за большого количества отверстий, требующих промывки и очистки, реализуемая в установках последовательная схема малопроизводительна.

Вышеперечисленные установки были разработаны в лаборатории электрофизических технологий ОАО «НИТИ-Тесар». Существенным вкладом коллектива в развитие технических систем ультразвуковой очистки явилась разработка методики расчета и проектирования, а также технологии сборки и регулировки многопакетных ультразвуковых преобразователей сначала магнитострикционных, а в последнее время пьезокерамических. Их особенностью является общая активная накладка-волновод, к которой присоединено требуемое количество излучателей. Такая конструкция нивелирует неизбежные расхождения в частоте и амплитуде колебаний, генерируемых каждым излучателем и позволяет создать равномерно распределенные в объеме жидкости акустические поля высокой интенсивности.

1.6 Предлагаемое техническое решение. Постановка задач исследований

Выполненный анализ технических решений по ультразвуковой очистке труднодоступных полостей и каналов в изделиях сложной формы, экранированных от ультразвукового кавитационного поля, а также методов ультразвуковой обработки материалов [1, 2, 25, 34, 35, 51, 52, 53] позволяет с учетом механики динамического разрушения и в предположении, что в отверстиях и каналах присутствуют не только загрязнения в виде покрытий различной толщины, плотности и адгезионной прочности, но и поверхностный оксидный слой, предложить следующий подход к достижению поставленной в работе цели:

– изучение химического состава поверхностного слоя с целью определения основного метода их разрушения и удаления, а также технологической жидкости;

– изучение распределения оксидного слоя и 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 проблемных зонах с минимальным проходным сечением;

– введение изделия в контакт с ультразвуковым преобразователем с определенным усилием и сообщение колебаний изделию на установленной на основе моделирования частоте с одновременной кавитацией объема жидкости и ее прокачкой через каналы для эффективного вымывания отделившихся частиц оксидного слоя.

Схема реализации данного подхода представлена на рис. 1.9 [71].

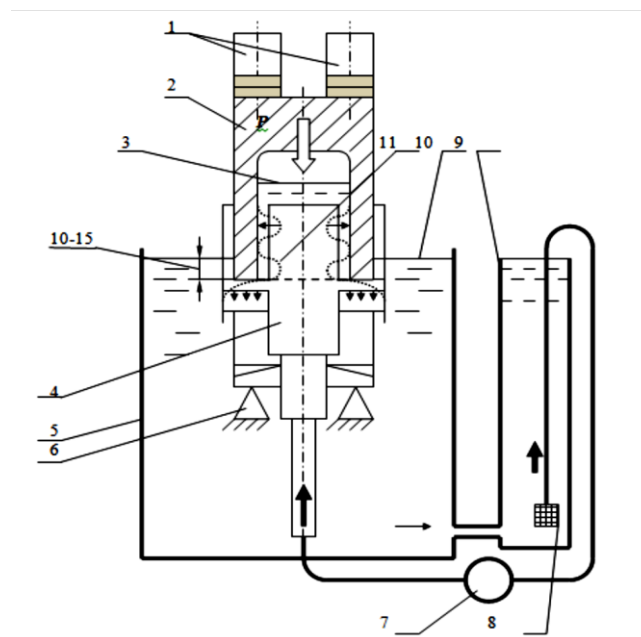


Рисунок 1.9. Предлагаемое техническое решение

1 – ультразвуковой пьезокерамический преобразователь; 2 – общий волновод;
3 – кольцевая полость волновода; 4 – обрабатываемое изделие; 5 – корпус ванны; 6 – виброизолирующие опоры; 7 – насос; 8 – система фильтрации моющей жидкости; 9 – расходная емкость; 10 – уровень жидкости в ванне; 11 – распределение пучностей и узлов колебаний в обрабатываемых элементах изделия

Предлагаемая схема осуществляется следующим образом. Определяют массу обрабатываемого изделия, с целью определения необходимого усилия прижатия к торцу концентратора. Меньшее усилие не обеспечивает передачи достаточной амплитуды колебаний изделию. Большее усилие, особенно при недостаточной жесткости конструкции, может привести при воздействии ультразвука к размерным макродеформациям, которые приведут к нарушению размерной точности. На опоры (6) устанавливают изделие (4) и присоединяют к одному из его центральных каналов трубопровод, связанный с насосом (7). Заполняют ванну технологической жидкостью до указанного уровня (10) в 10-15 мм выше торцевой поверхности, что обеспечит минимальное непроизводительное нагружение концентратора и сохранение высокой амплитуды его колебаний. Включают ультразвуковой генератор, что обеспечивают сообщение колебаний (11) обрабатываемым элементам изделия. Включают насос (7), забирающий жидкость из емкости (9) через фильтр (8). Обработку продолжают до полного разрушения и удаления оксидного слоя из каналов и полостей изделия, окончание обработки фиксируют по изменению расхода жидкости через каналы при помощи точного расходомера. Эффект обработки заключается в сочетании общего кавитационного воздействия на наружные поверхности и кромки отверстий с контактным ультразвуковым воздействием, приводящим к механическому растрескиванию, отслоению и разрушению поверхностного слоя во внутренних каналах и полостях вследствие их деформации за счет механического воздействия ультразвука.

Для обоснования предложенной схемы и разработки новой ультразвуковой технологии необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ химического состава и распределения оксидного поверхностного слоя по каналам и полостям изделия и подбор технологических жидкостей;
2. Оценка собственных частот колебаний типовых изделий и выявление распределения пучностей деформаций и звукового давления по корпусу на основе компьютерного моделирования;

3. Изучение влияния сообщаемых изделию ультразвуковых колебаний на напряженно-деформированное состояние;

4. Определение оптимальной схемы и закономерностей процесса ультразвукового удаления оксидного поверхностного слоя в отверстиях и каналах малого диаметра, расположенных внутри корпуса изделия, обоснование рациональных технологических режимов;

5. Разработка технологии комбинированной ультразвуковой обработки, обеспечивающей эффективное удаление поверхностного слоя;

6. Разработка предложений по созданию специальной установки комбинированной ультразвуковой обработки.

1.7 Выводы

1. Применение энергии ультразвука для очистки деталей различного назначения является сегодня наиболее широкой областью применения ультразвуковых технологий вследствие универсальности и эффективности.

2. Проведенный анализ известных и перспективных методов ультразвуковой очистки применительно к сложным труднодоступным поверхностям, расположенным в экранированных зонах, выявил технические трудности эффективного удаления оксидного поверхностного слоя и позволил наметить задачи исследования и определить пути их решения.

3. В данном случае для осуществления обработки поверхности внутренних полостей и каналов изделий типа горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов предложено применить контактное воздействия колеблющегося волновода с одновременной прокачкой технологической жидкости. Для ее реализации необходимо теоретически и экспериментально обосновать специальную схему воздействия ультразвука на изделие, изучить и разработать технологические режимы и спроектировать опытный образец установки.

2 ГЛАВА. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА КОМБИНИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО УДАЛЕНИЯ ОКСИДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ПОЛОСТЕЙ И КАНАЛОВ

2.1 Модель разрушения оксидных слоев при местном контактном ультразвуковом воздействии

С учетом сложности конструкции горелочного устройства, характеризующегося наличием «теневых» зон для распространения волн, изложенные особенности ультразвуковой кавитации позволяют предположить, что обычная технологическая схема даже при высокой интенсивности ультразвукового поля обеспечит удаление оксидных слоев только с внешних поверхностей деталей.

Нами предложено обеспечивать удаление поверхностного оксидного слоя путем генерации в элементах очищаемого изделия изгибных напряжений, величина которых превышает адгезионную прочность их слоя. Изгибные напряжения создаются путем формирования изгибных ультразвуковых колебаний в очищаемой области изделия. Целью исследований является повышение эффективности ультразвукового удаления оксидного поверхностного слоя в закрытых полостях и каналах малого диаметра в деталях машиностроения типа горелочных устройств на основе обоснования технологии, включающей сочетание общего кавитационного и местного контактного вибровоздействия. При контакте ультразвукового излучателя на изделие будет действовать нагрузка, складывающаяся из переменной и постоянной составляющей.

Выполнили анализ существующего метода ультразвуковой кавитационной очистки и предлагаемого метода контактной обработки в технологической жидкости с учетом скрытого характера измененного поверхностного слоя при допущении, что причиной разрушения последнего являются внутренние

напряжения, возникающие под действием кавитации или, соответственно, изгибных высокочастотных колебаний поверхности, приводящих к многоцикловому знакопеременному нагружению сложных по составу поверхностных слоев, состоящих из адгезионнопрочной оксидной пленки и аморфных внешних слоев углеродсодержащих слоев. Схема разрушения оксидного поверхностного слоя под действием изгибных колебаний представлена на рис. 2.1.

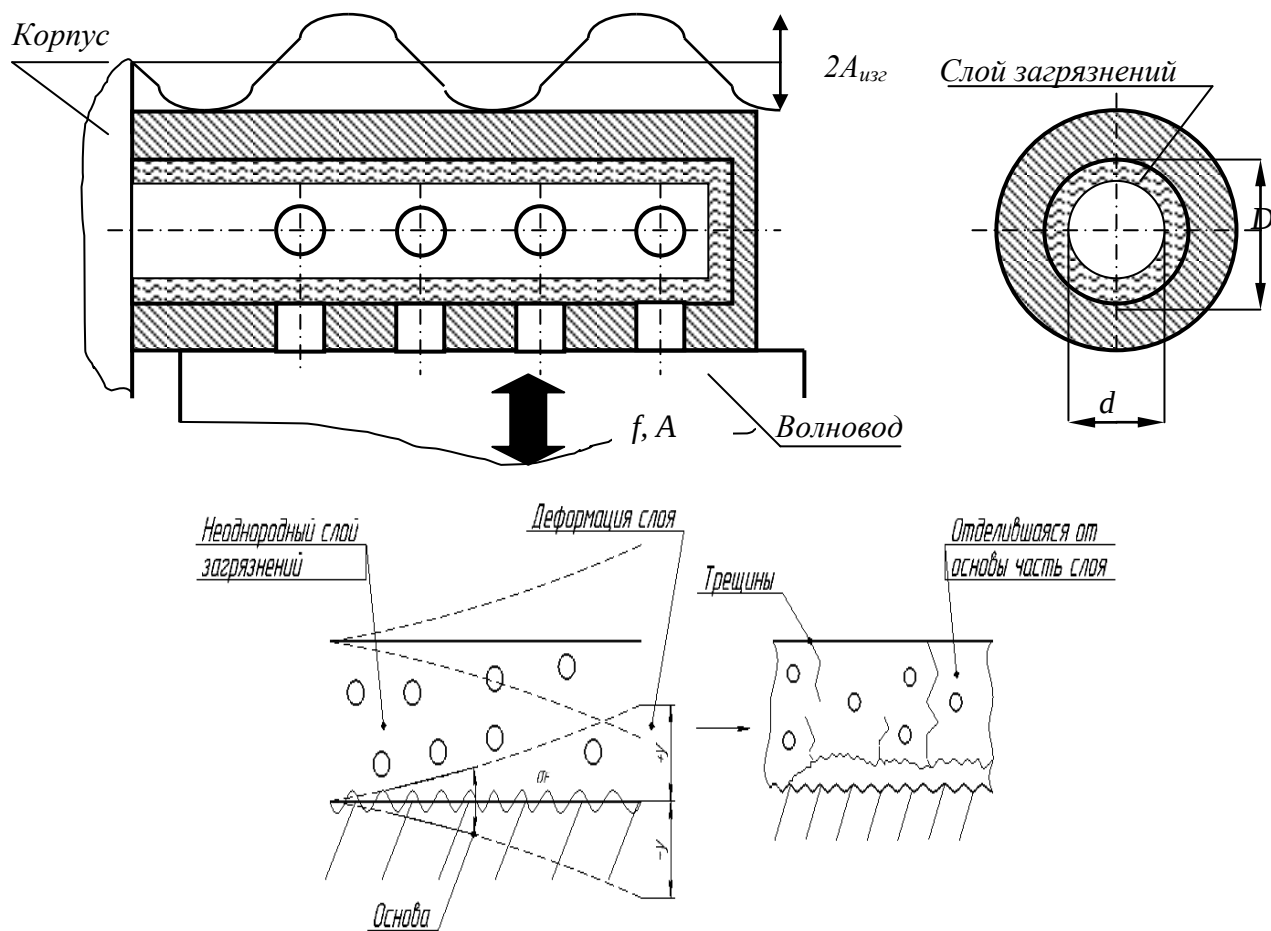


Рисунок 2.1. Схема деформаций элемента конструкции и возникновения напряжений в поверхностном слое при ультразвуковом нагружении

Условие разрушения внутреннего поверхностного слоя может быть записано следующим образом:

$$\sigma_F \geq \sigma_{адг}. \quad (2.1)$$

где σ_F – изгибные напряжения, вызванные ультразвуковыми колебаниями, $\sigma_{адг}$ – адгезионная прочность (прочность сцепления) оксидного слоя. Изгибные напряжения согласно известным выражениям сопротивления материалов [23] определяются по выражению:

$$\sigma_F = \frac{M}{W}, \quad (2.2)$$

где M – изгибающий момент, W – момент сопротивления сечения изгибающегося элемента.

Примем для поверхностного слоя форму трубки длиной, равной рассматриваемому элементу конструкции. Для кольцевого сечения слоя момент сопротивления равен [23]:

$$W = 0,1D^3(1 - c^4), \quad (2.3)$$

где D – диаметр отверстия канала в изделии, $c = d/D$, d – внутренний диаметр поверхностного слоя канала.

Изгибающий момент, вызванный динамической силой вследствие контакта элемента конструкции с колеблющимся с ультразвуковой частотой волноводом:

$$M = P_0 l = CA^{0,56}l, \quad (2.4)$$

где C – эмпирический коэффициент динамической силы ультразвука, A – амплитуда ультразвуковых колебаний, l – длина обрабатываемого элемента конструкции. В данном выражении величина P_0 – взята по зависимости, полученной А.И. Марковым [19, 45, 100].

Подставив (2.3) и (2.4) в (2.2), получим выражение для определения внутренних напряжений изгиба в оксидном слое, связывающее величину напряжений с амплитудой ультразвуковых колебаний и конструктивными особенностями изделия:

$$\sigma_F = \frac{CA^{0,56}l}{0,1D^3(1 - c^4)}. \quad (2.5)$$

С учетом многоциклового характера нагружений элемента конструкции изгибные напряжения необходимо определять с учетом эквивалентного $N_{\text{э}}$ и базового N_B циклов его нагружения по известной зависимости [23]:

$$\sigma_{F\text{э}} = \sigma_F \sqrt[m]{\frac{N_B}{N_{\text{э}}}}, \quad (2.6)$$

где $m = 8$ показатель степени, $N_B = 10^7 - 10^8$ – рекомендуемые [23] значения базового числа циклов нагружения машиностроительных конструкций, при превышении которого возможно разрушение объекта.

Примем эквивалентное число циклов нагружений равным частоте ультразвуковых колебаний вынуждающей силы, т.е. волновогода $N_{\text{э}} = f$. С учетом этого, подставив (2.5) в (2.6), можно переписать (2.1) следующим образом:

$$\frac{CA^{0,56}l}{0,1D^3(1-c^4)} \sqrt[8]{\frac{N_B}{f}} \geq \sigma_{ad\text{э}}$$

Из данного соотношения можно получить выражение для определения амплитуды и частоты ультразвуковых колебаний, сообщаемых изделию для обеспечения отделения оксидного слоя от поверхности канала.

$$A \geq \frac{\{0,1[\sigma]_{ad\text{э}} D^3(1-c^4)\}^{1,78}}{(Cl)^{1,78} \left(\frac{N_B}{f}\right)^{0,22}}. \quad (2.7)$$

По данным [94], принимая материал поверхностного слоя преимущественно хрупким, можно принять $C = 16,6$. Расчет по зависимости (2.5), принимая стандартное значение $f = 22000$ Гц, получены графики (рис. 2.2), позволившие установить диапазон параметров эффективной контактной обработки с учетом адгезионной прочности поверхностного слоя $\sigma_{адг} = 12-15$ Н/мм² (максимальные значения по априорной информации).

Анализ графика позволяет определить амплитуду колебаний в случае каналов относительно большего диаметра в 10 мкм, в случае каналов меньшего диаметра – 1-2 мкм. При этом считали толщину поверхностного слоя постоянной.

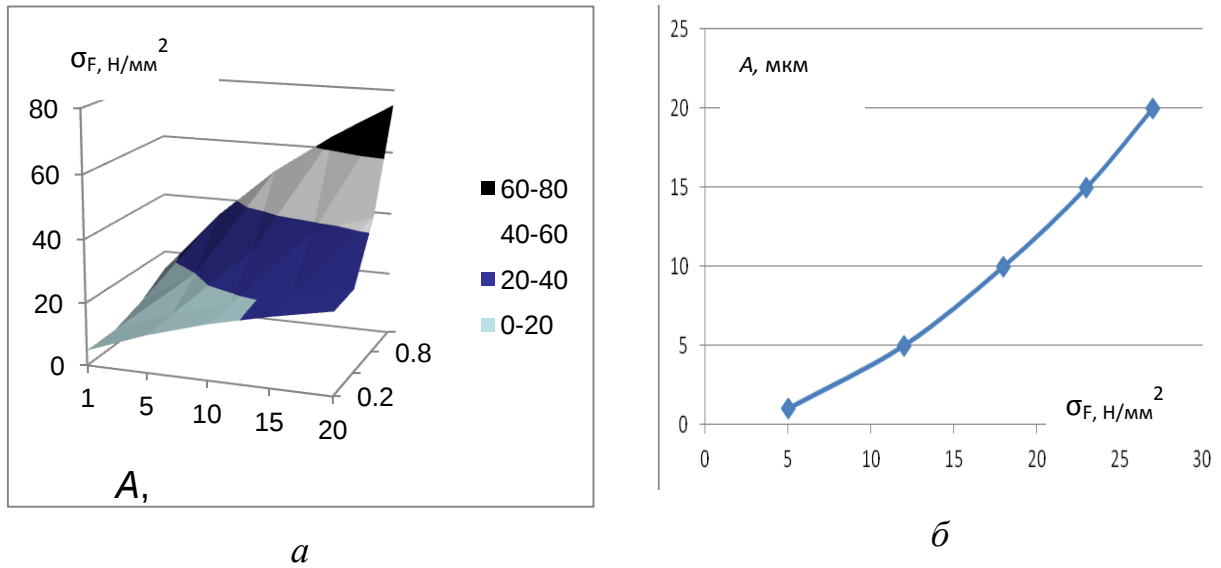


Рисунок 2.2. Изгибные напряжения σ_F (а) в трубчатой конструкции, подвергнутой воздействию ультразвука, в зависимости от амплитуды A и соотношения диаметра канала и внутреннего диаметра оксидного слоя и соответствующее напряжениям средние значения амплитуды ультразвуковых колебаний (б)

Примем величину базового цикла нагружений $N_B = 10^7$, тогда период времени до преодоления предела выносливости оксидного поверхностного слоя (величины адгезии) при стандартной частоте ультразвука будет равен $t = N_B / f = 10^7 / 22 \times 10^3 = 454,5$ с, что составляет примерно 7 минут.

В ходе проведенных экспериментальных исследований при помощи компьютерного виброакустического комплекса c и электронного частотомера ЧЗ-33 определена фактическая резонансная частота ультразвукового преобразователя, при которой обеспечивается амплитудное значение виброускорения (таблица 2.1) $f = 23350$ Гц.

Таблица 2.1. Зависимость виброускорения и частоты сигнала ультразвукового генератора

Частота f , Гц	22280	22540	22950	23110	23280	23350	23500	23750
Виброускорение a , м/с^2	420	450	460	220	320	500	400	400

С учетом фактической резонансной частоты период времени разрушения оксидного поверхностного слоя может быть равен

$$t_{min} = N_{Bmin} / f = 10^7 / 23350 = 428 \text{ с} = 7 \text{ мин}$$

$$t_{max} = N_{Bmax} / f = 10^8 / 23350 = 4282 \text{ с} = 71,4 \text{ мин}$$

В ходе экспериментальных исследований [65,66,67,69,70] нами установлено, что время увеличения проходного сечения каналов в горелочных устройствах предложенным методом составляет 6-7 минут. В ходе производственных испытаний метода на реальных горелочных устройствах при частоте и амплитуде ультразвуковых колебаний преобразователя соответственно 22,3 кГц и 9-10 мкм время восстановления пропускной способности каналов горелочных устройств в партии составило 10 – 60 минут.

Таким образом, с учетом существенного разброса в адгезионной прочности и толщине поверхностного оксидного слоя в каналах горелочных устройств фактическое время их удаления в целом совпадает со временем, установленном теоретически при определенной по полученной нами зависимости (7) амплитуде ультразвуковых колебаний. Это позволяет использовать полученную нами зависимость для предварительного расчета амплитудно-частотной характеристики ультразвукового преобразователя для обработки каналов контактным методом.

2.2 Определение рациональных частот колебаний горелочного устройства на основе компьютерного моделирования

Моделирование напряженно-деформированного состояния и собственных частот колебаний горелочного устройства проводили в несколько этапов. На первом разрабатывали 3-D чертеж горелочного устройства (Kompas-3D v.13) и

затем на его основе строили твердотельную модель для последующей оценки собственных частот и форм колебаний (смещений) под действием периодической вынуждающей силы. При этом вследствие сложности конструкции и трудоемкости расчетов проводили моделирование методом приближений: центральное тело устройства – полая конструкция с внешней оболочкой. При этом пилоны упрощенно представлялись полыми стержнями без радиальных отверстий. Также радиальные отверстия не учитывались и в модели центрального тела, как мало значащие факторы для прочности сварных швов пилонов. На втором этапе моделировали воздействие вынуждающей силы на единичный пилон с полным комплектом радиальных отверстий.

После построения твердотельных моделей проводили их разбиение на конечные элементы, была принята объемная форма элементов в виде тетраэдра со сторонами от 5 до 1 мм. Модель последнего типа оказывается максимально точной, однако, количество элементов превышает 2 миллиона, что не позволяет завершить необходимые расчеты. Модель первого типа оказывается излишне грубой. В результате последовательных итераций при расширении возможностей оперативной памяти компьютера за счет организации виртуальной вычислительной машины на базе УИТ СГТУ имени Гагарина Ю.А. была построена модель со стороной конечного элемента, равной 3 мм. Это обеспечило приемлемую точность и адекватность модели и стабильную работу вычислительной техники (среднее время вычислений одного варианта при моделировании частотных диапазонов и нагрузжений составило 1,5 часа).

Результаты разработки чертежей горелочного устройства и твердотельного моделирования представлены на рис. 2.3-2.8.

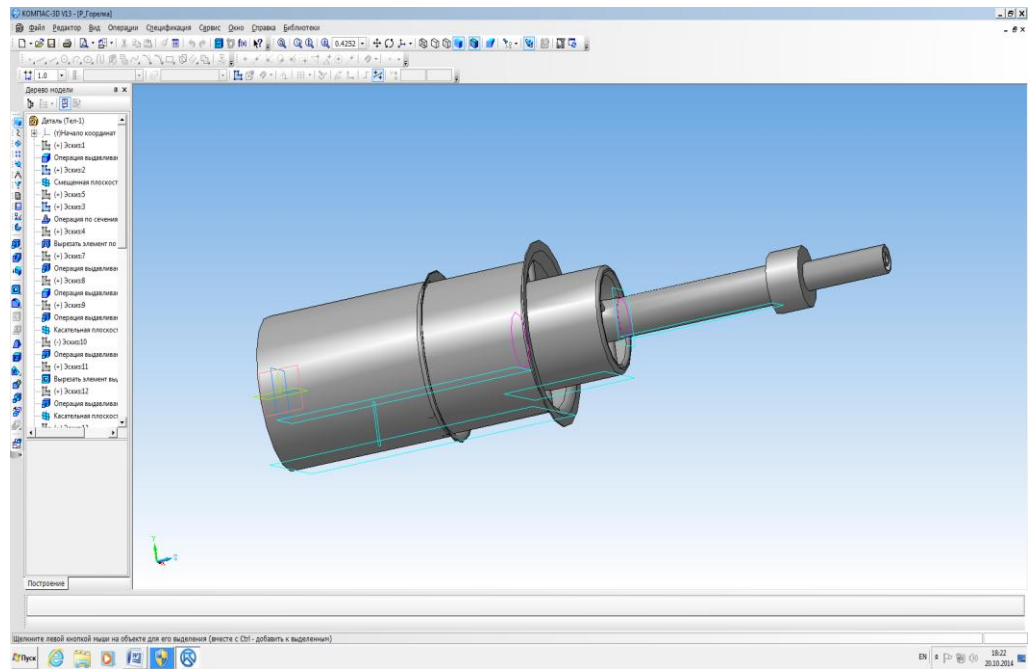


Рисунок 2.3. 3D чертеж горелочного устройства (с оболочками)

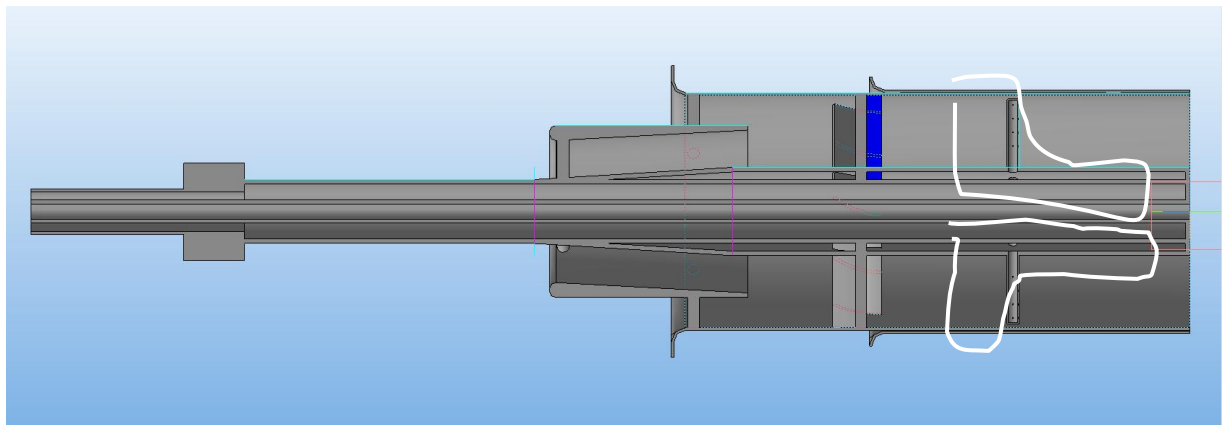


Рисунок 2.4. Осевой разрез модели горелочного устройства
с выделенными областями скопления оксидных слоев

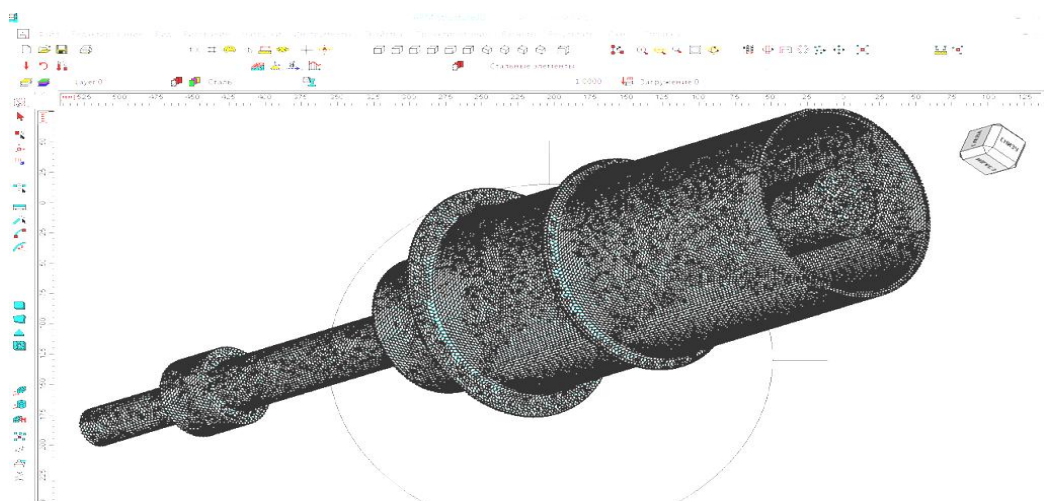


Рисунок 2.5. Твёрдотельная модель горелочного устройства

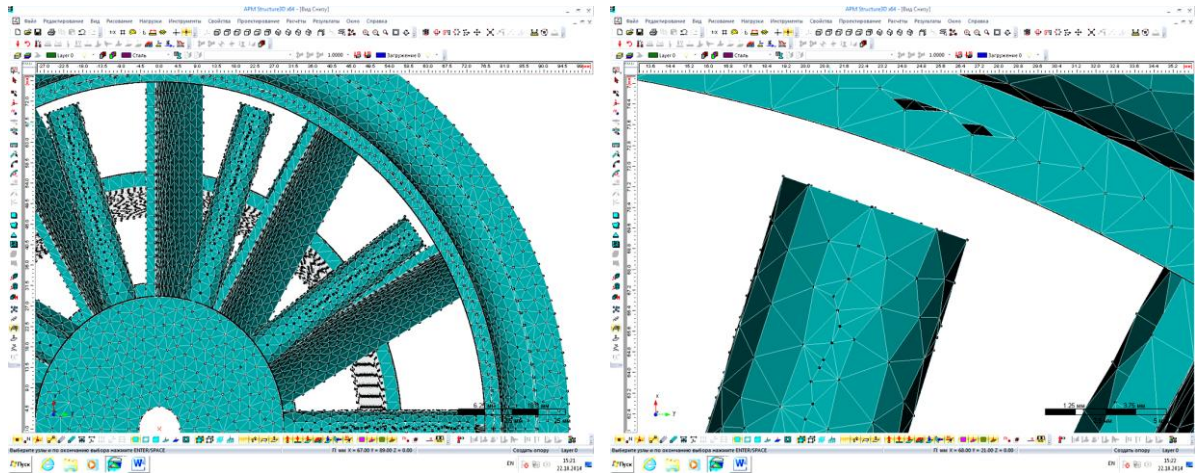


Рисунок 2.6. Вид конечно-элементной модели горелочного устройства со стороны пилонов

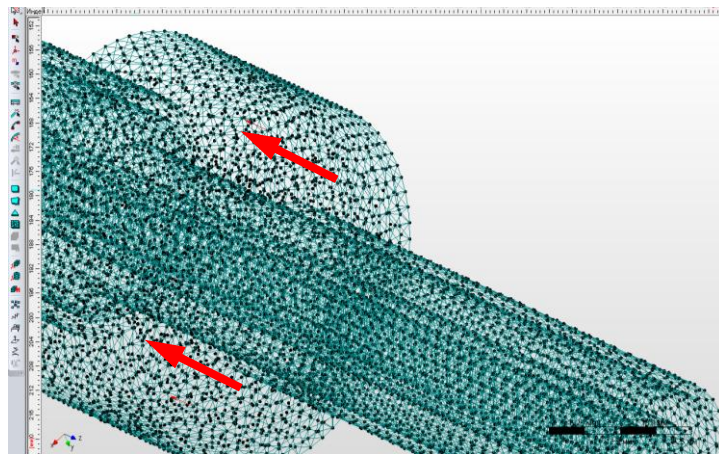


Рисунок 2.7. Приведенная к «прозрачному» виду твердотельная модель хвостовой части горелочного устройства с приложенными нагрузками

При моделировании приложенных нагрузок приняли с учетом расположения горелочного устройства во время обработки на торце ультразвукового излучателя наихудшую с точки зрения нагружения схему: опоры расположены на концах пилонов (консоль имеет максимальную длину), вес объекта приложен по его оси как статическая нагрузка, на каждый пилон действует приложенная у опоры динамическая сила, вызванная колебаниями излучателя.

В результате взвешивания определен вес горелочного устройства, равный 8,5 кг или 85 Н.

Динамическая сила согласно [15,45] при ультразвуковом нагружении определяется следующим образом:

$$P_d = 16,6 \cdot A_{np}^{0,56} \quad (2.8)$$

где A_{np} – амплитуда продольных колебаний излучателя, мкм.

График воздействия нагрузок на пилоны может быть представлен на рис. 2.8.

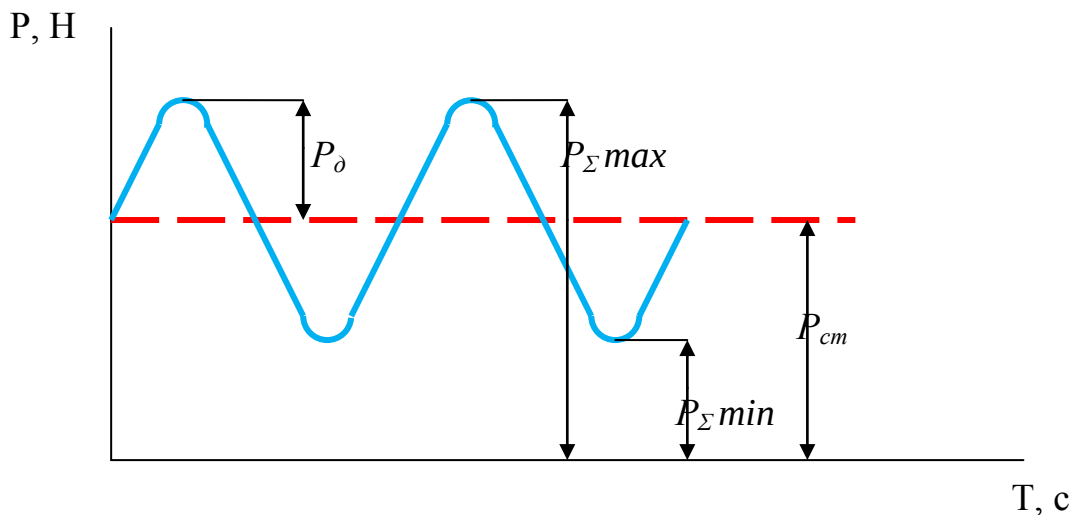


Рисунок 2.8. Нагрузки, действующие на пилоны

График учитывает одновременное действие постоянной нагрузки (веса горелочного устройства P_{cm}) и знакопеременной (динамическая сила вследствие колебаний излучателя P_d). Соответственно суммарная нагрузка за цикл колебаний (один период) будет изменяться от максимальной $P_{\Sigma \max} = P_{cm} + P_d$ до минимальной $P_{\Sigma \min} = P_{cm} - P_d$ [26]

В программной среде *APM Winmachine* проведено на твердотельной модели расчет частот колебаний сложного объекта типа горелочного устройства. Рассматривали низкочастотные колебания (до 1000 Гц), высокочастотные колебания (до 18000 Гц) и ультразвуковые колебания (свыше 18000 Гц). Всего было рассмотрено 750 гармоник. Высшие гармоники не рассматривались, поскольку в связи с принятой схемой комбинированной обработки, при которой колебания сообщаются непосредственно горелочному устройству, необходим резонанс системы, т.е. совпадение частот собственных и вынужденных

колебаний. В тоже время возможная частота сигналов ультразвукового генератора, находясь в стандартном диапазоне, не может отличаться от 22 кГц более чем на $\pm 7,5\%$.

Результаты расчетов упрощенной и полной моделей приведены в приложении. Типичные формы колебаний полной модели горелочного устройства на низких частотах представлена на рис. 2.9-2.18.

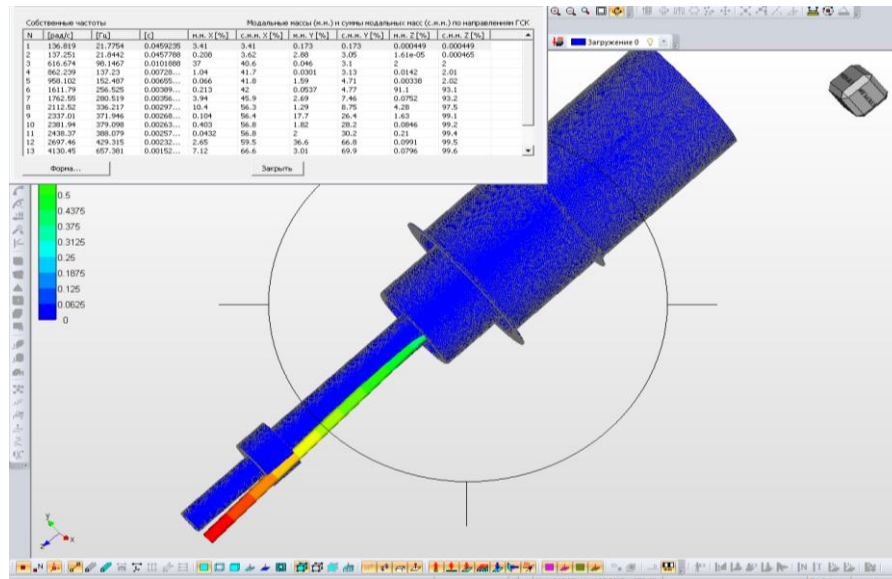


Рисунок 2.9. Колебания полной модели на частоте 21,78 Гц

Видно, что в диапазоне низких частот с увеличением частоты вынуждающей силы в упрощенной модели сначала возникают изгибные колебания центрального тела, затем они переходят в продольные (при этом пилоны изгибаются в месте соединения с центральным телом), затем форма колебаний центрального тела преобразуется в синусоиду, а пилоны остаются неподвижными. При частотах порядка 500-600 Гц возникают крутильные колебания, приводящие в интенсивному изгибу пилонов в горизонтальной плоскости. В случае колебаний модели с оболочкой движение постепенно переходит от центрального тела к оболочке. Если центральное тело колеблется изгибно, то оболочка поперечно пульсирует. При этом пилоны остаются мало деформированными практически на всех частотах.

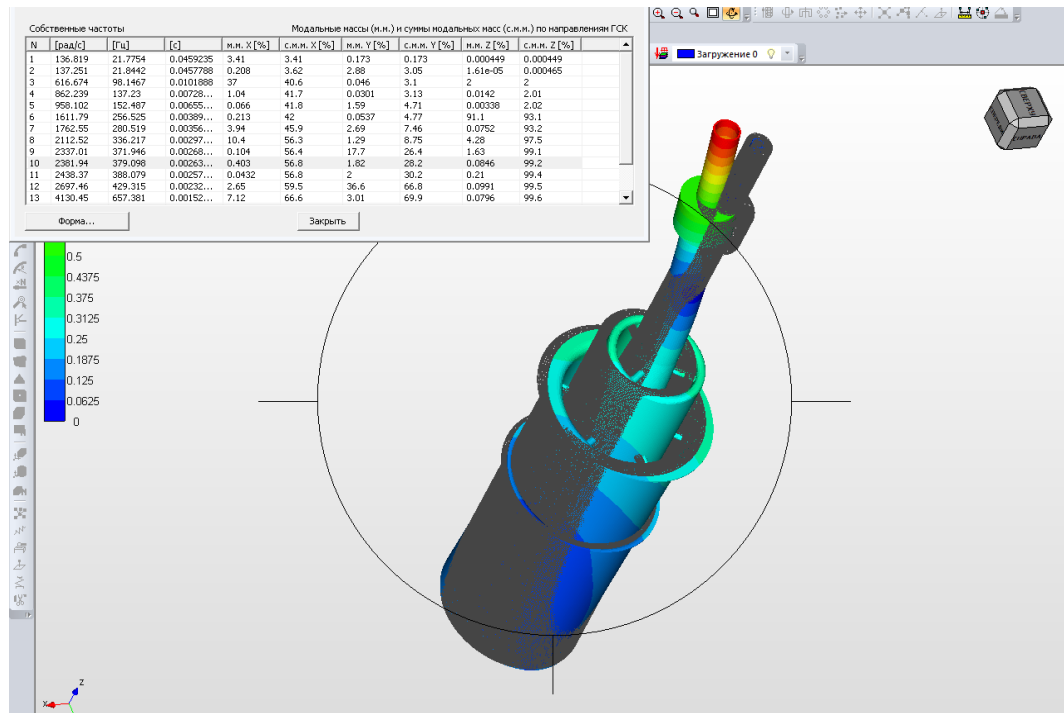


Рисунок 2.10. Колебания полной модели на частоте 379 Гц

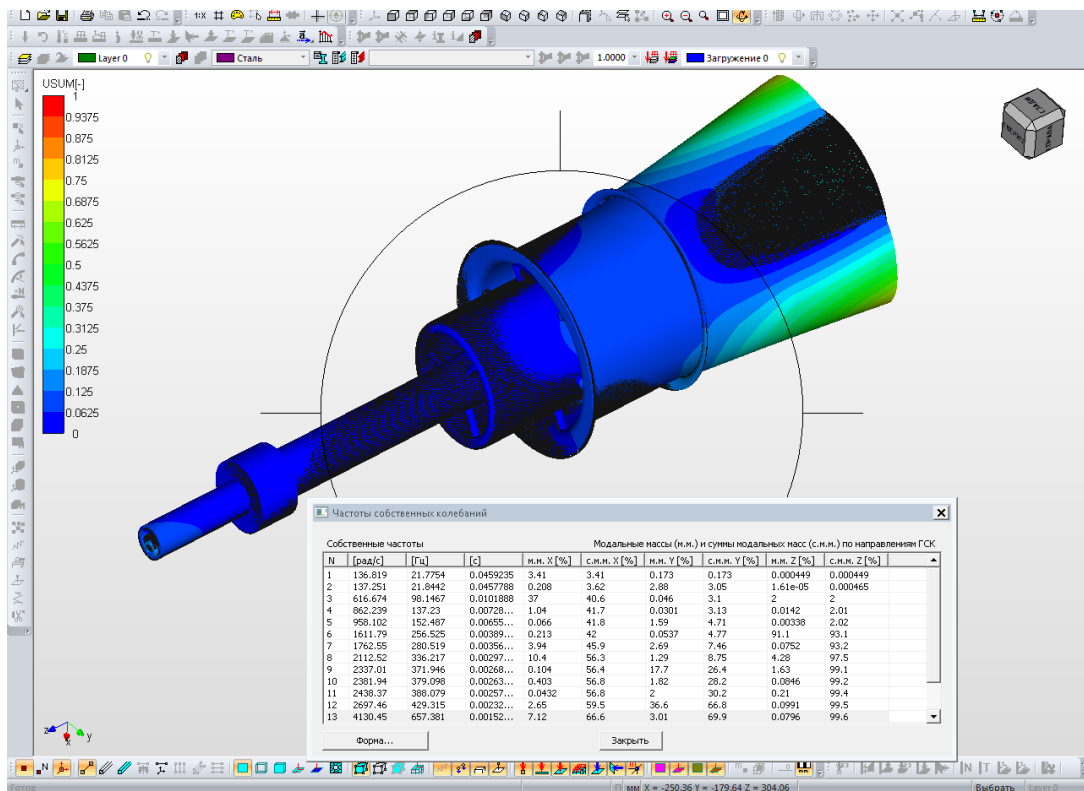


Рисунок 2.11. Колебания полной модели на частоте 657 Гц

При переходе в область ультразвуковых частот картина резко меняется. Видно, что интенсивные колебания возбуждаются во внешней оболочке. При

этом место проявления максимальных деформаций смещается по длине оболочки в зависимости от прилагаемой частоты. Следует признать, что на частоте порядка 17500 Гц наблюдается максимальная изгибная деформация пилонов в том числе в месте их стыковки с центральным телом.

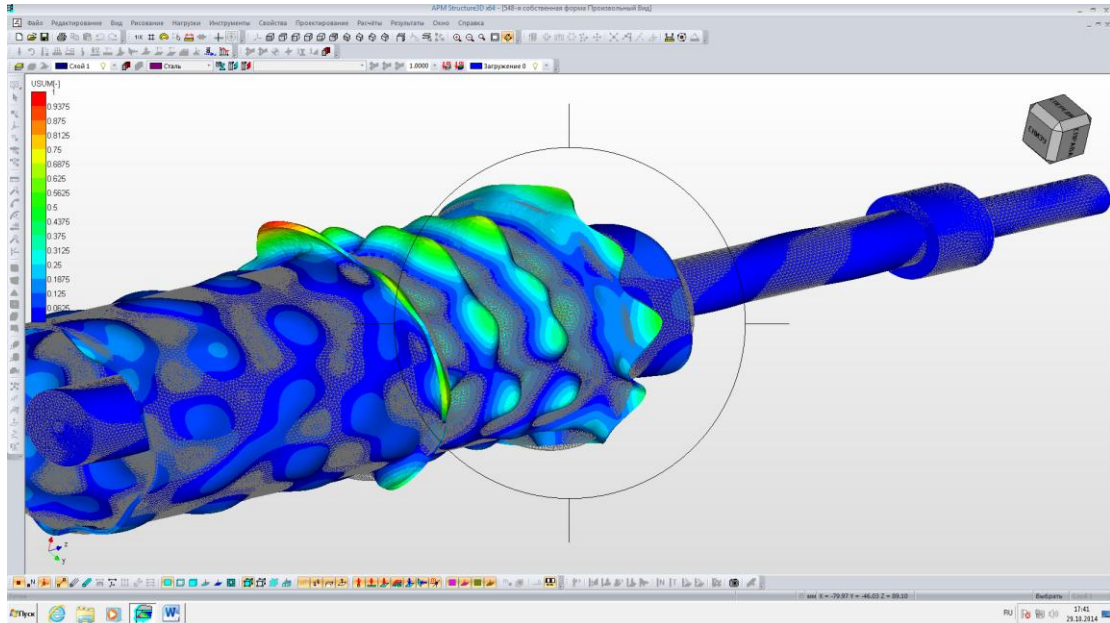


Рисунок. 2.12. Колебания полной модели на частоте 18017 Гц

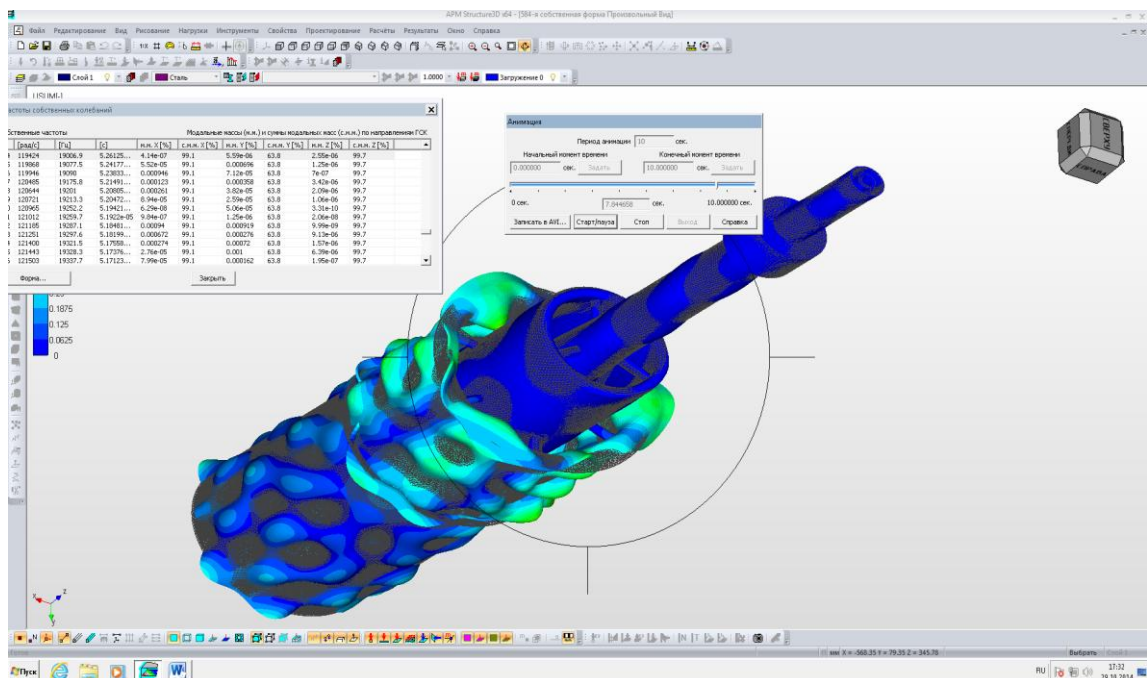


Рисунок 2.13. Колебания полной модели на частоте 19007 Гц

Это с одной стороны может обеспечить качественную обработку, но с другой представляет опасность с точки зрения усталостной прочности

конструкции и поэтому не может применяться в нашей технологии. На частотах 18000-19000 Гц (рис. 2.12 и 2.13) колебания развиваются в задней части оболочки (в области ее крепления к корпусу и в местах расположения завихрителей воздушного потока). Пилоны остаются практически недеформированными, что также не позволяет считать данный диапазон приемлемым с точки зрения эффективной обработки. На частотах 19000-20000 Гц заметны локальные деформации (рис. 2.14).

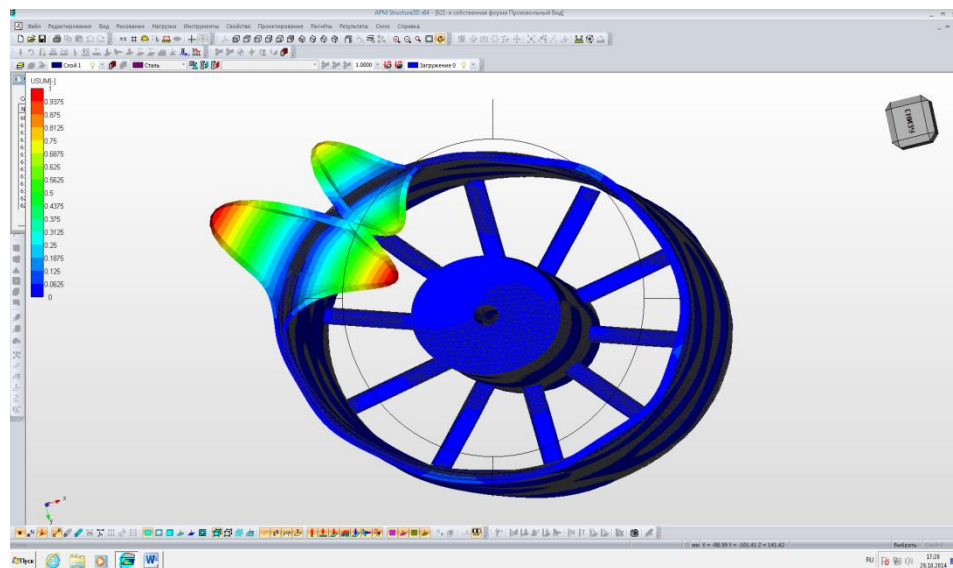


Рисунок 2.14. Колебания полной модели на частоте 20012 Гц

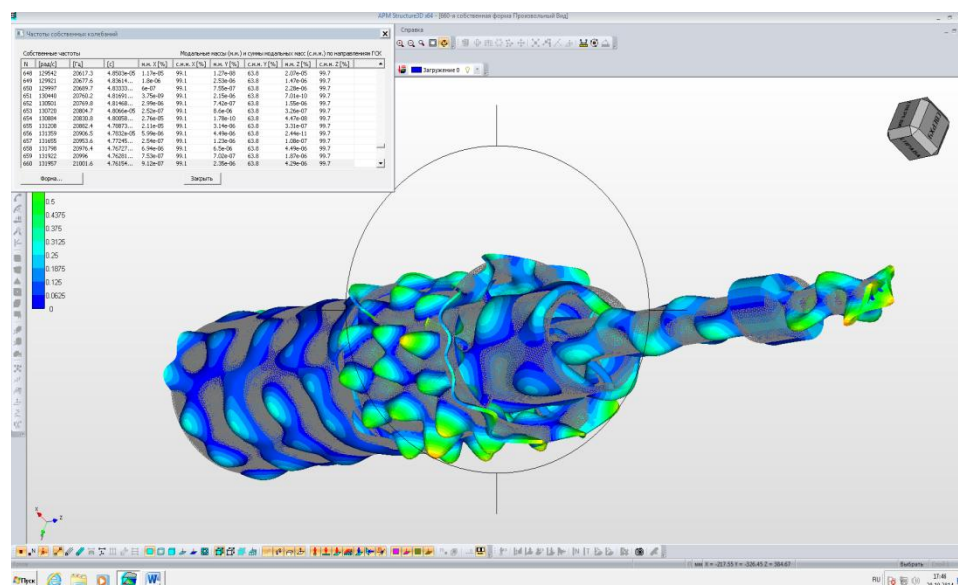


Рисунок 2.15. Колебания полной модели на частоте 21001 Гц

При частотах порядка 21000 Гц (рис. 2.15-2.16) усиленные волновые процессы развиваются по всей длине горелочного устройства, включая хвостовую часть, центральный корпус, оболочку и газоотводящие трубки.

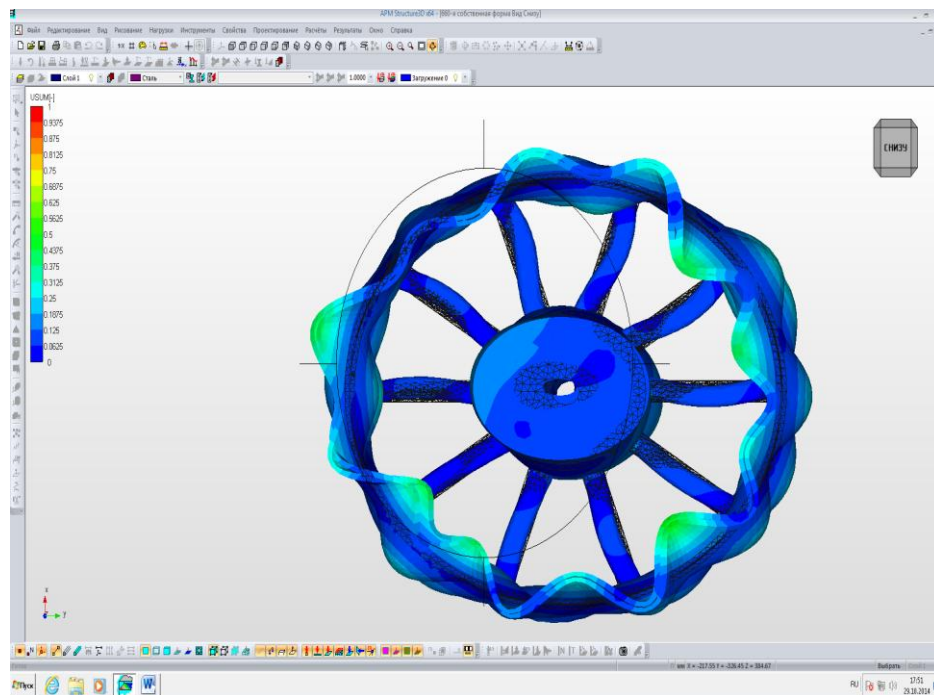


Рисунок 2.16. Колебания полной модели на частоте 21001 Гц

Деформации доходят до 0,5 от максимальных, но не превышают их. Скорее всего, данный режим следует признать рациональным. Однако, необходимо исследовать амплитудно-частотную характеристику ультразвукового генератора и излучателя экспериментальной установки с целью определения окончательных требований к соответствующим системам разрабатываемого опытного образца. При частотах порядка 22000 Гц интенсивно деформируется центральный корпус, но пилоны остаются малодеформированными, т.е. удаление поверхностного оксидного слоя внутренних полостей возможно лишь частично. При 23000-23300 Гц (рис. 2.17-2.18) происходит деформация, как центрального корпуса, так и пилонов, но хвостовая часть остается мало затронутой деформациями. При этом величины деформаций не превышают 0,5 от максимально возможных. По-видимому, данный частотный диапазон также можно считать предпочтительным для реализации предлагаемого метода обработки. Здесь необходимы

сравнительные исследования амплитудно-частотных характеристик генератора и излучателя.

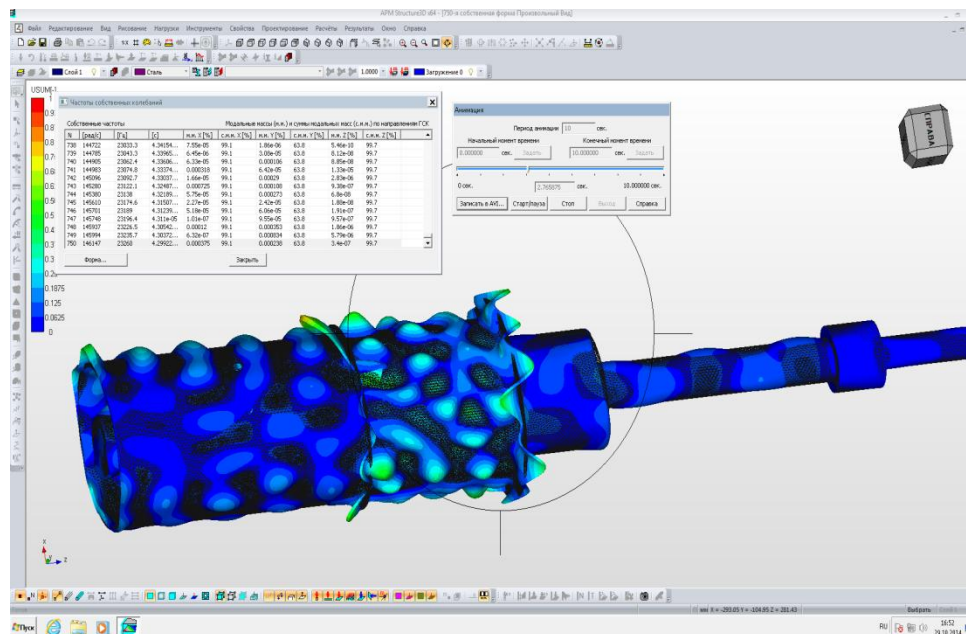


Рисунок 2.17. Колебания полной модели на частоте 23260 Гц

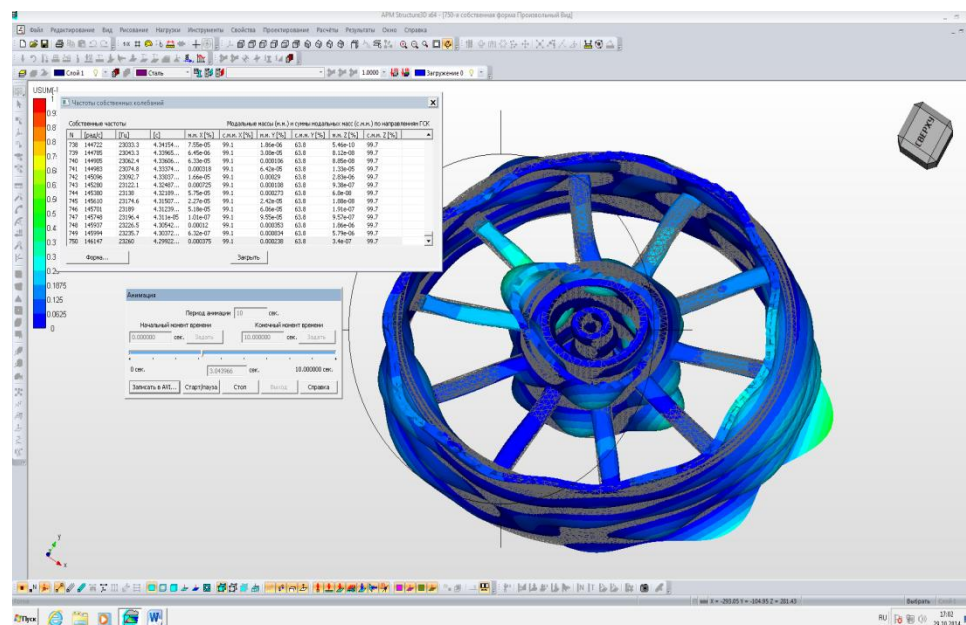


Рисунок 2.18. Колебания полной модели на частоте 23260 Гц

Поскольку предлагаемая схема комбинированной ультразвуковой обработки предполагает воздействие ультразвука на саму горелку, провели оценку частот, при которых в теле горелки укладывается целое число длин волн, т.е. возможные условия резонанса. Расчетная схема представлена на рис. 2.19.

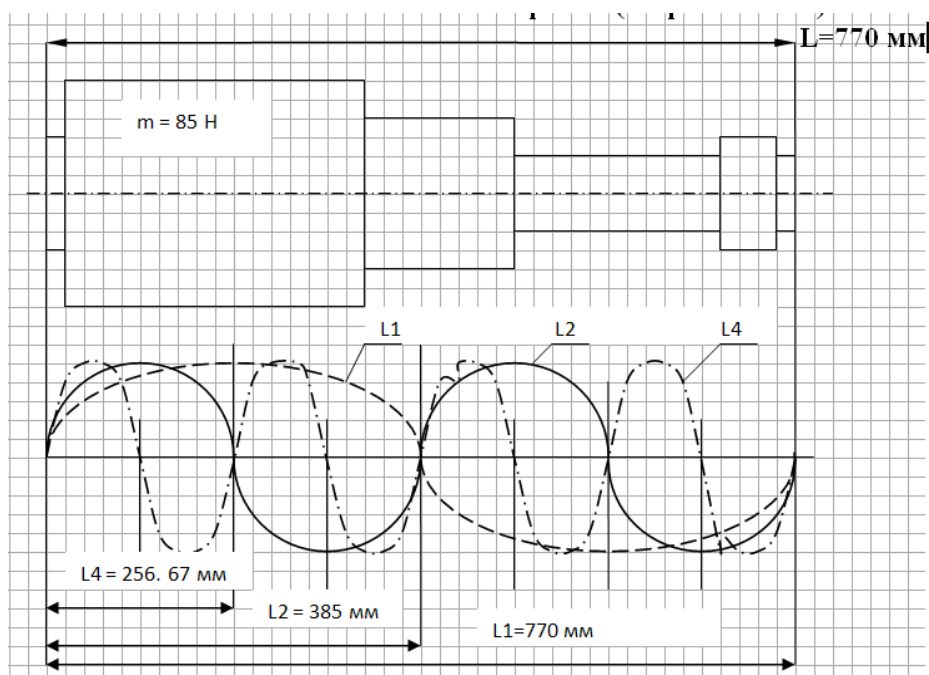


Рисунок 2.19. Возможные нижние резонансные частоты горелочного устройства

На рис. 2.19 обозначено: L – длина горелки; L_1 – длина целой волны первой гармоники; L_2 – длина целой волны второй гармоники; L_4 – длина целой волны четвертой гармоники. Поперечные линии обозначают границы половин длин волн соответствующих гармоник, т.е. узловые точки, в которых амплитуда колебаний равна нулю. Разрешенный стандартами РФ промышленный диапазон отклонений частоты сигнала ультразвукового генератора составляет: $22000 \pm 7,5\%$. Соответственно максимальная и минимальная генерируемые им частоты сигналов равны:

$$f_{\max} = 22000 + 22000 \times 0,075 = 23650 \text{ Гц}$$

$$f_{\min} = 22000 - 22000 \times 0,075 = 20350 \text{ Гц}$$

Частота колебаний связана со скоростью звука и длиной акустической волны в материале соотношением [15]:

$$f = C / \lambda \quad (2.9)$$

где f – частота колебаний 1/с (Гц); C – скорость звука, м/с; λ – длина волны, м.

С учетом выражения (2.7) и средней скорости звука в сталях, равной 5300 м/с, будем иметь в нашем случае: первая гармоника $f_1 = 5300 / 0,77 = 6883$ Гц; вторая гармоника $f_2 = 2 f_1 = 2 \times 6883 = 13766$ Гц; третья гармоника $f_3 = 3 f_1 = 3 \times 6883 = 20649$ Гц; четвертая гармоника $f_4 = 4 f_1 = 4 \times 6883 = 27532$ Гц.

Расстояние от торца горелки до пилонов составляет 116 мм. Для осуществления процесса контактной обработки необходимо обеспечить примерное совпадение пучности колебаний (максимум амплитуды, а значит – интенсивности ультразвуковых деформаций) с наиболее проблемным для обработки элементом конструкции горелочного устройства – пилоном. Определим координаты первых пучностей колебаний:

$$X_{11} = 770/4 = 192,5 \text{ мм}$$

$$X_{21} = 770 / 2 \times 4 = 96,25 \text{ мм}$$

$$X_{31} = 770 / 3 \times 4 = 64,17 \text{ мм}$$

$$X_{41} = 770/4 \times 4 = 48,125 \text{ мм}$$

Как видно, ни одна из первых пучностей не совпадает с сечением стыковки пилонов с корпусом. Вторая пучность колебаний корпуса горелки находится на расстоянии от торца:

$$X_{12} = (770/4)^2 = 384,0 \text{ мм}$$

$$X_{22} = (770 / 2 \times 4)^2 = 182,5 \text{ мм}$$

$$X_{32} = (770 / 3 \times 4)^2 = 128,34 \text{ мм}$$

$$X_{42} = (770/4 \times 4)^2 = 96,25 \text{ мм}$$

Наиболее близкой к месту стыковки пилонов и корпуса является вторая пучность третьей гармоники.

Определим фактическую амплитуду колебаний у пилонов. Положение узла колебаний будет равно $X = 0,5\pi \times 116 / 128,34 = 0,45\pi$, тогда амплитуда у пилонов $A = A_{\max} \sin(0,45\pi) = 0,9876 A_{\max}$. Т.е. амплитуда (и интенсивность) ультразвуковых колебаний практически не изменяется при установке горелочного устройства на излучатель, колеблющийся с частотой 20649 Гц.

Таким образом, можно рекомендовать (теоретически) вести ультразвуковую обработку на частоте 20649 Гц. В расчетах горелочное устройство принималось выполненным в виде сплошного ступенчатого стержня. Выше при помощи компьютерного моделирования была установлена на основе анализа форм колебаний целесообразная частота 21001 Гц. Как видно, расхождение составляет не более $(21001/20649)100\% = 1,7\%$. Необходимо исследовать диапазон настроек генератора УЗГИ-1-2.5 с целью выявления возможности работы на данной частоте.

2.3 Модель напряженно-деформированного состояния горелочного устройства в процессе ультразвукового удаления оксидного поверхностного слоя

Разработана конечно-элементная модель единичного пилона с радиальными отверстиями представлена на рис. 2.20.

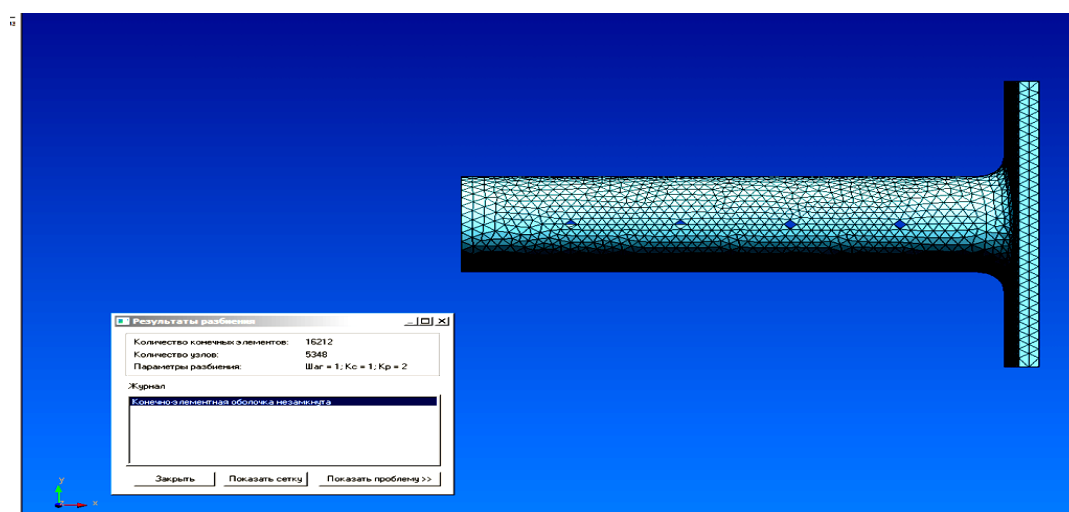


Рисунок 2.20. Конечно-элементная модель единичного пилона

На рис. 2.21и 2.22 представлены карты деформаций и внутренних напряжений, из которых следует, что в принятом диапазоне нагрузок

максимальные деформации в пилоне не превышают 1,7-2,0 мкм (рис. 2.21), а напряжения – 7 МПа (рис. 2.22). На рис. 2.23 представлена карта напряжений в полной модели горелочного устройства (с оболочками).

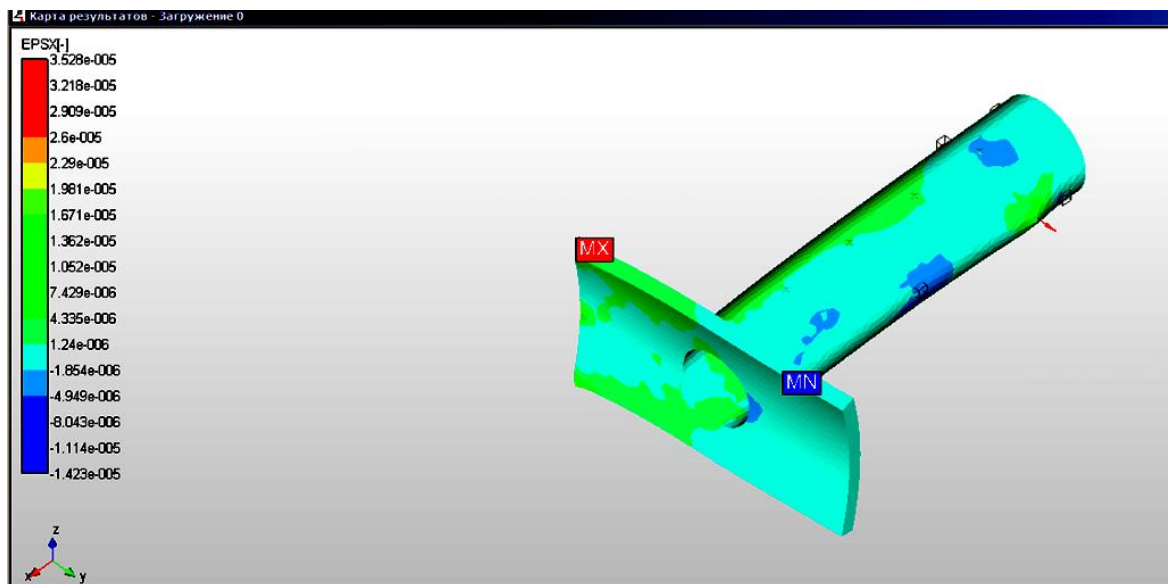


Рисунок 2.21. Карта деформаций в пилоне

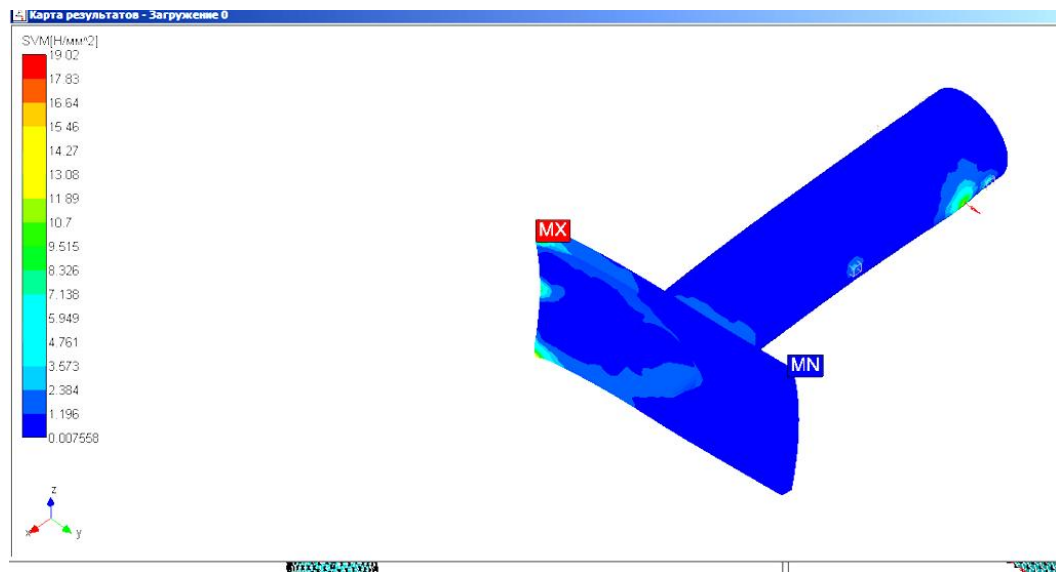


Рисунок 2.22. Карта внутренних напряжений

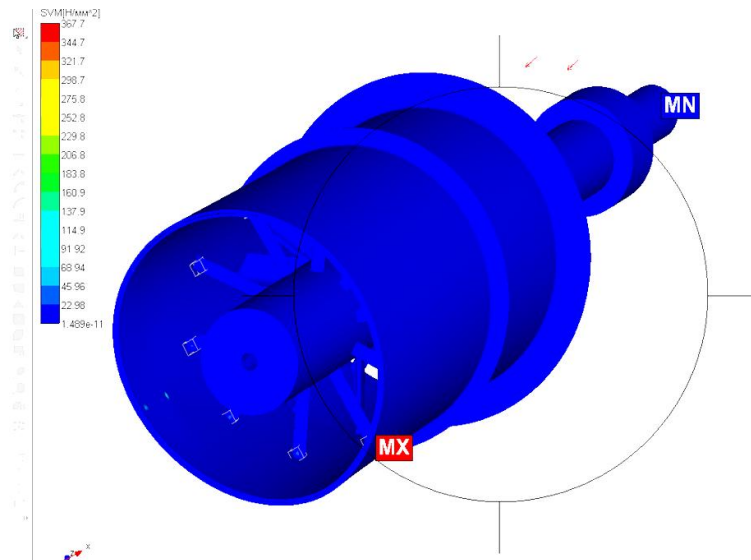


Рисунок 2.23. Карта внутренних напряжений
в модели горелочного устройства

Модель деформаций и напряжений горелочного устройства в процессе ультразвукового удаления оксидного поверхностного слоя при нагружении на пилоны, доказывает отсутствие опасности разрушения зоны контакта пилон и корпуса горелочного устройства.[68]

2.4 Выводы

1. Получено математическое выражение, представляющее собой феноменологическую модель разрушения поверхностного слоя во внутренних полостях и каналах при контактном воздействии ультразвука и позволяющее на основе взаимосвязи параметров ультразвука и размеров очищаемого объекта с адгезионной прочностью оксидного слоя определить величину амплитуды и частоты колебаний, сообщаемых изделию. Определены теоретические значения амплитуды и частоты ультразвука.

2. Выполнено компьютерное моделирование собственных частот колебаний горелочного устройства. Определена рациональная частота колебаний, при которой пучность располагается в областях максимальной концентрации

отложений, находящаяся в пределах 21000 Гц. Выявленная на основе размерного анализа объекта воздействия частота, соответствующая третьей гармонике, отличается от определенной путем моделирования не более чем на 1,7 %.

3. Выполнено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния горелочного устройства при ультразвуковом нагружении. Установлено, в наиболее опасных участках напряжение не превышает 7 МПа при деформациях менее 2 мкм, что подтверждает значительный запас прочности всех элементов, подвергаемых ультразвуковому воздействию.

3 ГЛАВА. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

3.1 Методы и средства исследования

Исследования проводили на примере горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам на специально разработанной установке (рис. 3.1) с электромеханическим преобразователем на основе пяти пьезокерамических излучателей, соединенных с общим ступенчатым кольцевым волноводом с питанием от генератора УЗГИ 1-2.5(1)(1.5)(2) производства ООО «Ультразвук-ТЕО» (г. Саратов) мощностью 1,0 кВт и частотой 22 кГц $\pm 7,5\%$.



Рисунок 3.1. Макетный образец установки для исследования комбинированной ультразвуковой обработки

Химический состав поверхностного слоя 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 АГПМ-6М (рис. 3.2).

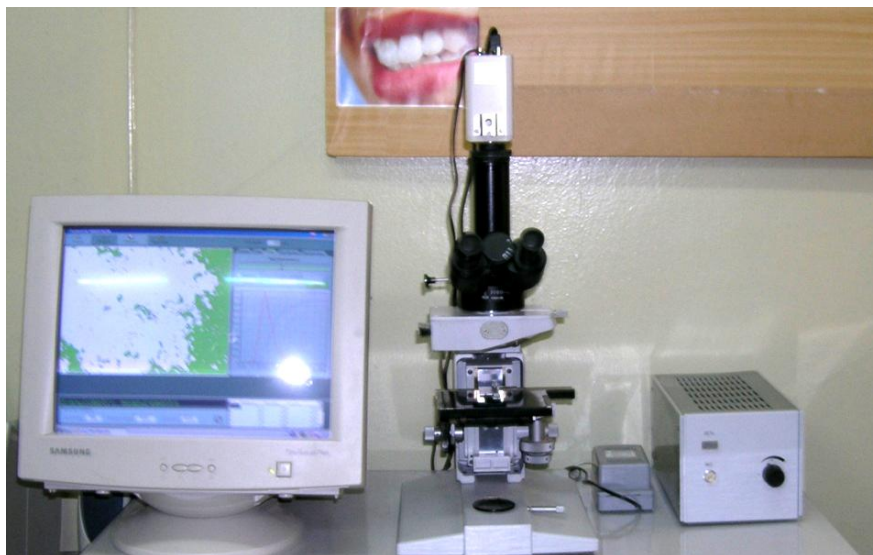


Рисунок 3.2. Компьютерный анализатор изображений микроструктур АГПМ-6М

Измерение вибрационных и шумовых характеристик изделия и торца волновода в процессе удаления поверхностного оксидного слоя проводили при помощи компьютерного виброакустического комплекса ВК-01 (рис. 3.3).



Рисунок 3.3. Компьютерный виброакустический комплекс 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 обработки каналов и отверстий оценивали при помощи специального стенда (рис. 3.4) по скорости набора давления воздуха равного 400 Н/мм^2 в герметичном баллоне, куда последовательно помещали горелочные устройства после эксплуатации и после цикла обработки.

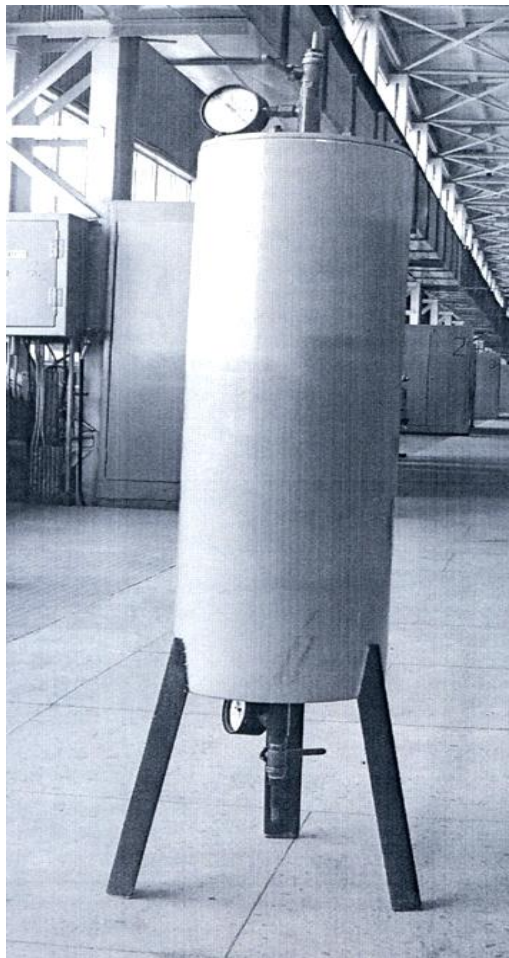


Рисунок 3.4. Пневматический стенд для проверки расхода воздуха через очищаемые горелочные устройства

Предварительно качество обработки оценивали по расходу воды объемом 2 л, заливаемой в центральный подводящий канал горелочного устройства. Интенсивность удаления поверхностного слоя определяли путем взвешивания

образцов-имитаторов до и после цикла обработки на электронных весах RM200 (рис. 3.5) с точностью 0,0001 г.



Рисунок 3.5. Весы электронные RM200

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

3.2 Исследование состава поверхностного оксидного слоя

Анализ состояния газоподводящих каналов и отверстий в пилонах подтверждает предположение, что основной причиной снижения фактического ресурса горелочных устройств является скопление отложений в порошкообразном и гелеобразном виде в торцевой зоне пилонов и кольцевом канале центрального тела горелки, а также образование поверхностного оксидного слоя, приводящего к снижению диаметра проходного сечения. Это вызывает повышенное газодинамическое сопротивление, снижение расхода газа и, как следствие –

отклонение параметров факела от заданных по паспорту, что приводит к отмеченному выше снижению развиваемой мощности ГПА, и как следствие снижению фактических оборотов роторов ТВД и ТНД. Кроме этого, отложения располагаются в каналах и пилонах крайне неравномерно. Это вызывает неравномерный расход газа в различных каналах и дополнительно увеличивает отклонения параметров факела и его стабильность. Отложения располагаются на поверхности пилонов, а также в каналах и отверстиях, уменьшая их проходное сечение (рис. 3.6 и 3.7).

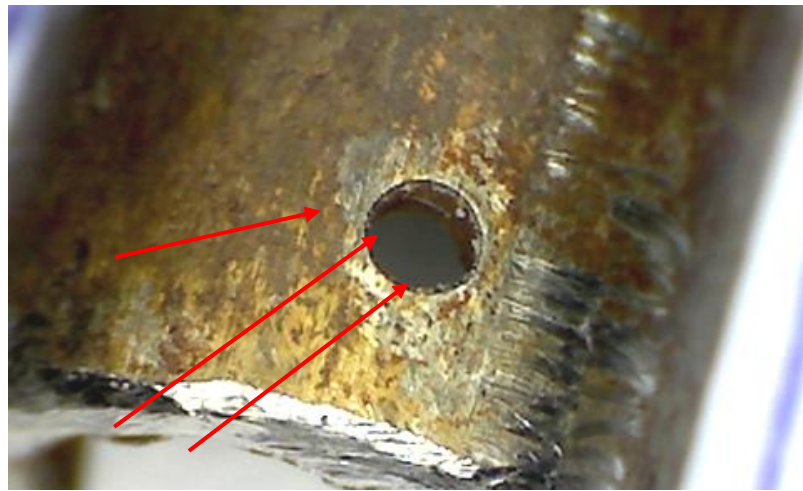


Рисунок 3.6. Отложения на стенках каналов и выходных отверстий пилонов

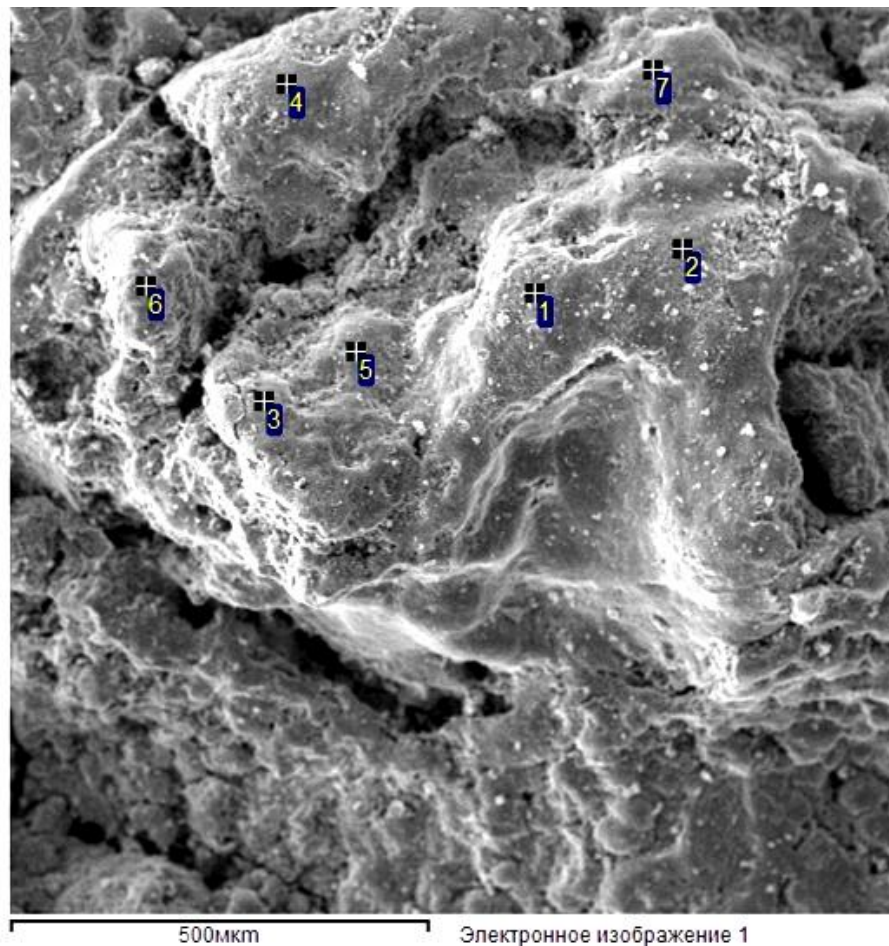


Рисунок 3.7. Внешний вид частицы поверхностного слоя с указанием точек проведения замеров химического состава

С целью выявления рационального состава технологической жидкости для растворения поверхностного слоя исследовали его химический состав методом РЭМ+ЭДРФА при помощи растрового электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan) с энергодисперсионным рентгенфлуоресцентным анализом на детекторе INCA PentaFETx3 (Oxford Instruments). Материалы анализа результатов исследования химического состава поверхностного слоя в каналах горелочных устройств, демонтированных из двух различных ГПА, на основе усредненных по шести измерениям данных приведены в табл. 3.1 и на рис. 3.8.

Таблица 3.1. Химический состав поверхностного слоя, масс %%

Эл-т	C	O	Si	Cl	Ca	Cr	Fe	Mn	S	Ti
Проба 1	12,18	33,7	1,82	0,5	0,275	0,335	52,98	0,52	0,87	0
Проба 2	6,85	30,9	0	0	0	0	62,485	0	0,47	0,4

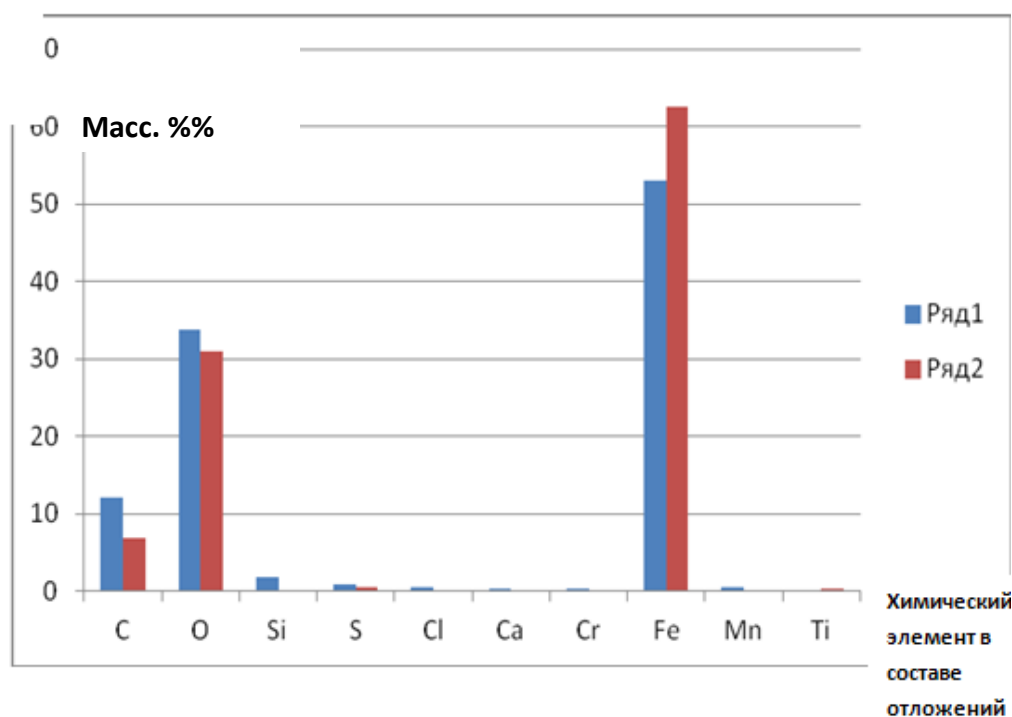


Рисунок 3.8. Распределение химических элементов в составе поверхностного слоя в двух ГПА (масс. %%)

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

- химический состав поверхностного слоя в первой и второй горелке принципиально отличается содержанием углерода (во второй пробе примерно в два раза меньше) и различием в составе элементов (во второй пробе отсутствуют сера, кальций, хром, марганец, но присутствует титан);
- в первой и второй пробах содержится примерно одинаковое количество кислорода и железа;
- в обоих пробах содержится значительно меньше углерода и серы по сравнению с кислородом и железом, в то же время можно отметить разнообразие металлов.

Таким образом, можно предположить, что элементы, характерные для углеводородного сырья и наиболее вероятные для присутствия в составе магистрального газа в качестве поверхностного слоя, составляют не более 7-14 массовых % от других элементов.

То есть, причина зашлакованности отверстий и каналов в горелочных устройствах может заключаться не столько в недоочищенном газе, сколько в продуктах взаимодействия природного газа и кислорода атмосферного воздуха, поступающего в смесь за счет эжекции, с материалом корпуса и пилонів при высоких температурах длительного нагрева (цвет хвостовой части горелочного устройства, находящейся вне огневой зоны, свидетельствует о температуре порядка 500-600⁰ С). Это подтверждается наличием таких элементов помимо железа, как хром, марганец, титан, которые наряду с железом входят в состав стали 12Х18Н10Т, из которой изготавливается согласно ТУ корпус горелочного устройства. По-видимому необходимо разработать в будущем меры по снижению температурной напряженности в корпусе горелки, что уменьшит интенсивность образования оксидных поверхностных слоев.

Большое количество железа и кислорода, определенное при химическом анализе отложений, свидетельствует о повышенном содержании оксидов железа, которые могут быть привнесены в камеру сгорания потоком газа из магистрального трубопровода и коллектора. Наличие оксидов железа в таком количестве также может свидетельствовать или быть причиной увеличенного газодинамического сопротивления каналов горелочных устройств.

Отсутствие сложных органических соединений в составе поверхностного слоя позволяет использовать в качестве технологической жидкости водопроводную воду, что улучшит экологические показатели процесса. В дальнейших экспериментах использовалась водопроводная техническая вода ГОСТ 6709-72.

3.3 Физическое моделирование процесса контактного ультразвукового удаления оксидного поверхностного слоя

Для экспериментального обоснования предложенного метода удаления поверхностного слоя проведено сравнение известным и предлагаемым методами обработки. Проводили две серии опытов на образцах-имитаторах, представлявших собой газоотводящие трубки (пилоны), отделенные от центрального тела горелочного устройства. По первой схеме общей обработки загрязненные пилоны помещали в металлическую сетку-корзину и погружали в ультразвуковую ванну. Время процесса изменяли от 1 до 15 минут. Перед обработкой и после обработки образцы-имитаторы взвешивали на электронных весах.

По второй схеме предварительно взвешенные образцы помещали в ультразвуковую ванну, но прижимали к торцовой поверхности ультразвукового излучателя с усилием, равным весу горелочного устройства с учетом его распределения между пилонами. Время обработки также изменялось от 1 до 15 минут.

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

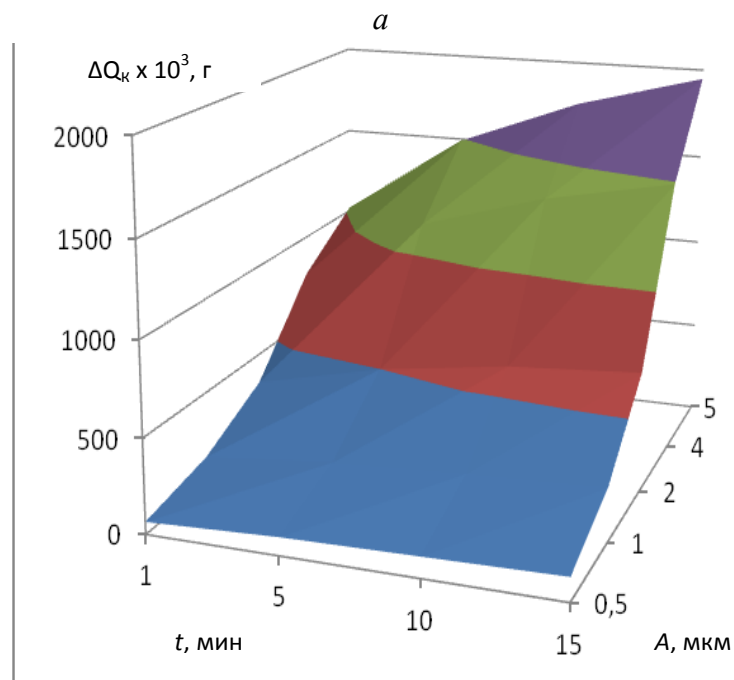
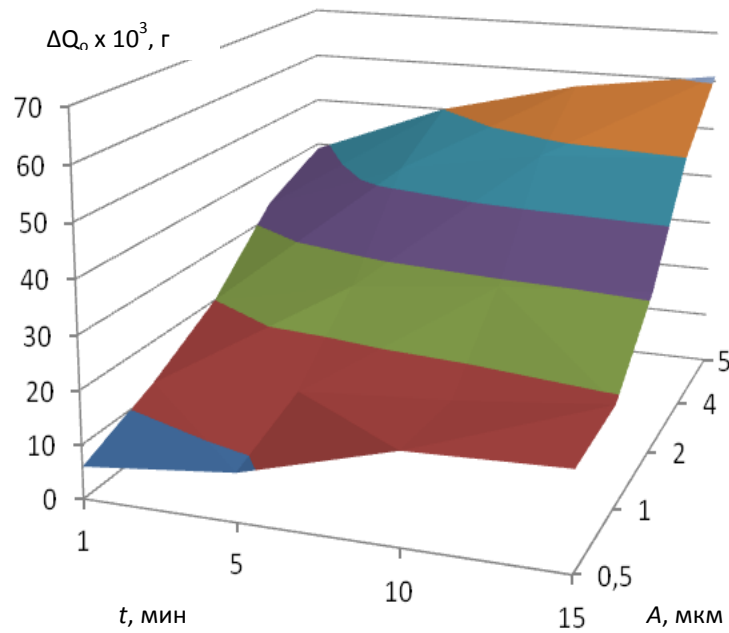
$$\Delta Q_o = 0,0012A^{0,731}t^{0,165} \quad (3.1)$$

$$\Delta Q_K = 0,015A^{1,19}t^{0,238} \quad (3.2)$$

где ΔQ_o и ΔQ_K – соответственно изменение веса образцов-имитаторов после обработки по известной схеме объемной обработки и по предлагаемой схеме; A – амплитуда колебаний торца ультразвукового преобразователя; t – время процесса обработки.

Результаты расчетов по зависимостям (3.1) и (3.2) представлены на рис. 3.9 [65-73].

Видно, что при изменении схемы обработки сохраняется общий характер зависимостей, но при этом влияние амплитуды колебаний излучателя существенно (на 62%) выше.



б

Рисунок 3.9. Зависимость изменения веса образца от схемы и режимов ультразвуковой обработки: объемная кавитация (а), контактное воздействие (б)

Время обработки также оказывает большее влияние примерно на 44%. При этом на малых (менее 1 мкм) амплитудах влияние времени обработки практически не проявляется. Объяснить данный эффект можно исходя из изменившегося механизма разрушения поверхностного слоя.

При объемной обработки «работает» кавитационный механизм воздействия на поверхностный оксидный слой ударных волн и мгновенных температур схлопывающихся микропузырьков, что приводит к скалыванию микрочастиц поверхностного слоя, 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 деформации, что способствует возникновению внутренних напряжений и усталостных трещин прежде всего в твердых оксидных слоях загрязнений, механически и химически связанных с поверхностью каналов. В результате происходит резкое снижение адгезионно-когезионной прочности оксидной пленки и разрушение достаточно крупных ее фрагментов, сопровождающееся уже упомянутым выше эффектом Ребиндера и вымыванием последних потоком прокачиваемой жидкости. Таким образом, в единицу времени происходит удаление больших масс материала. В то же время внутренняя поверхность каналов является при такой схеме источником ультразвуковых колебаний, вызывающих кавитацию во внутреннем объеме, что дополнительно разрушает и вымывает поверхностный оксидный слой. При малых амплитудах величина деформаций и динамические нагрузки резко снижаются, что уменьшает напряжения в поверхностных слоях и затрудняет их механическое разрушение.

3.4 Исследование кинетики ультразвуковой обработки горелочных устройств различными методами

В данной серии опытов осуществляли обработку горелочных устройств по следующим схемам:

1) «традиционная» очистка за счет кавитации в объеме технологической жидкости, в которую помещено горелочное устройство;

2) обработка с ультразвуковым нагружением горелочного устройства, помещенного в технологическую жидкость, на оптимальной для кавитации частоте ультразвука;

3) обработка с ультразвуковым нагружением горелочного устройства, помещенного в технологическую жидкость, на произвольной частоте ультразвука.

За критерий оценки принята скорость набора давления $0,4 \text{ кГ/см}^2$ в баллоне контрольного устройства, соответствующая скорости набора давления через эталонную горелку (не бывшую в эксплуатации).

Обрабатывалось по 3 изделия на каждом режиме. По результатам экспериментов получены аппроксимирующие зависимости, расчетом по которым получены графики, представленные на рис. 3.10.

$$V_P = 6t^{0,86} \quad (3.3)$$

$$V_P = 17t^{0,41} \quad (3.4)$$

$$V_P = 30t^{0,11} \quad (3.5)$$

где V_P – давление воздуха в баллоне измерительного устройства; t – время обработки по схемам 1, 2, 3 соответственно.

Из графиков и зависимостей (3.3)-(3.5) видно, что при использовании комбинированной обработки на докавитационной частоте (3) происходит интенсивное удаление поверхностного слоя в первую минуту обработки, далее зависимость делается пологой. По видимому, здесь играет важную роль сообщение высокочастотных вибраций непосредственно очищаемым поверхностям, и проявление пучности амплитуды смещения непосредственно в данной зоне, что вызывает отрыв поверхностного оксидного слоя от внутренних шероховатостей и заусенцев, оставшихся после механической обработки при изготовлении горелки.

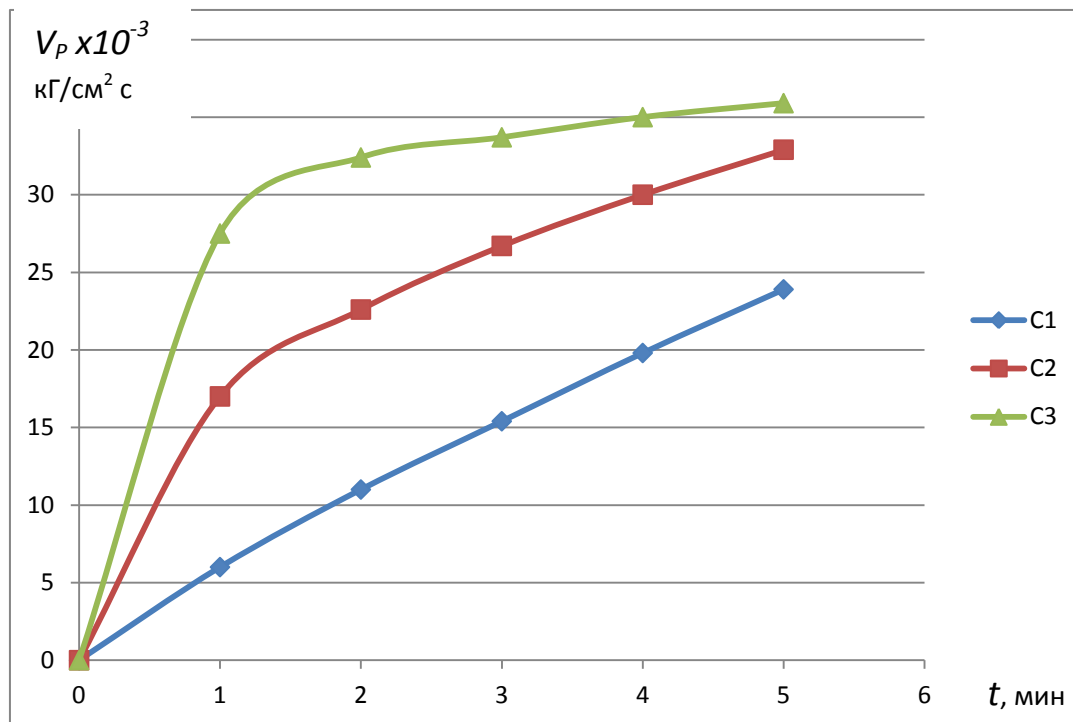


Рисунок 3.10. Зависимость эффективности удаления поверхностного слоя от времени при различных условиях обработки

C1 – общая очистка в условиях интенсивной кавитации (23,5-23,6 кГц)

C2 – комбинированная обработка - воздействие на горелку одновременно с кавитацией жидкости в условиях интенсивной кавитации (23,5-23,6 кГц)

C3 – комбинированная обработка на частоте 21 кГц

Также частично возможно разрушение заусенцев. Ультразвуковые колебания, передаваемые жидкости во внутренней полости пилона и сопряженных зонах через корпус, вызывают акустические течения, вымывающие отделившиеся элементы поверхностного слоя из зоны обработки. В целом в первую минуту процесса обработки эффективность данного режима практически в 6 раз превышает таковую для обычной технологической схемы. После 5 минут обработки суммарная эффективность снижается и превышает достигаемую при обычной схеме только в 1,4 раза. Однако уже после 3 минут обработки по предлагаемой схеме пропускная способность горелки отличается от эталонной (не эксплуатировавшейся) на 3% (97%), что делает не целесообразной последующую обработку.

Обычная схема за то же время обеспечивает восстановление пропускной способности только на 44%. Это может быть связано с расположением загрязнений в каналах диаметром 3-4 мм в пилонах, размещенных внутри кольцевой оболочки горелки, что препятствует развитию кавитационных процессов (барьерный эффект стенок пилонов и оболочки) и снижает их влияние на разрушение поверхностного слоя. Слабые по указанной причине, акустические течения также не способствуют эвакуации продуктов разрушения оксидного слоя (шлама). Экстраполяция графика показывает, что параметры по пропускной способности могут достичь эталонных значений только через 8-8,5 минут обработки. Это говорит о двукратно большей производительности предлагаемой схемы обработки.

При работе по комбинированной схеме на частоте, соответствующей кавитации жидкости, наблюдается более резкая зависимость эффективности обработки от общего времени процесса. Однако, по абсолютному значению за первую минуту обеспечивается восстановление (49-50)% пропускной способности. Только через 5 минут пропускная способность восстанавливается на 97%.

Оценка эффективности схемы обработки в зависимости от степени загрязненности каналов и времени процесса приведена на рис. 3.11 и 3.12.

Степень загрязненности оценивалась по расходу воды, проливаемой через горелку из мерной емкости. Из имевшихся в распоряжении горелок удалось выделить две группы по степени загрязненности: 31 – с высокой загрязненностью (малый расход воды, составляющий 0,024-0,012 л/с) и небольшой загрязненностью – 32 (расход воды, составляющий 0,045-0,032 л/с).

Из приведенных диаграмм видно, что предлагаемая схема обработки наиболее эффективна при значительной загрязненности каналов в начале цикла, т.е. в первую минуту (рис. 3.11), что соответствует графикам рис. 3.10. При увеличении времени процесса до 5 минут (рис. 3.12) частота колебаний излучателя практически не влияет на эффективность обработки по предлагаемой схеме.

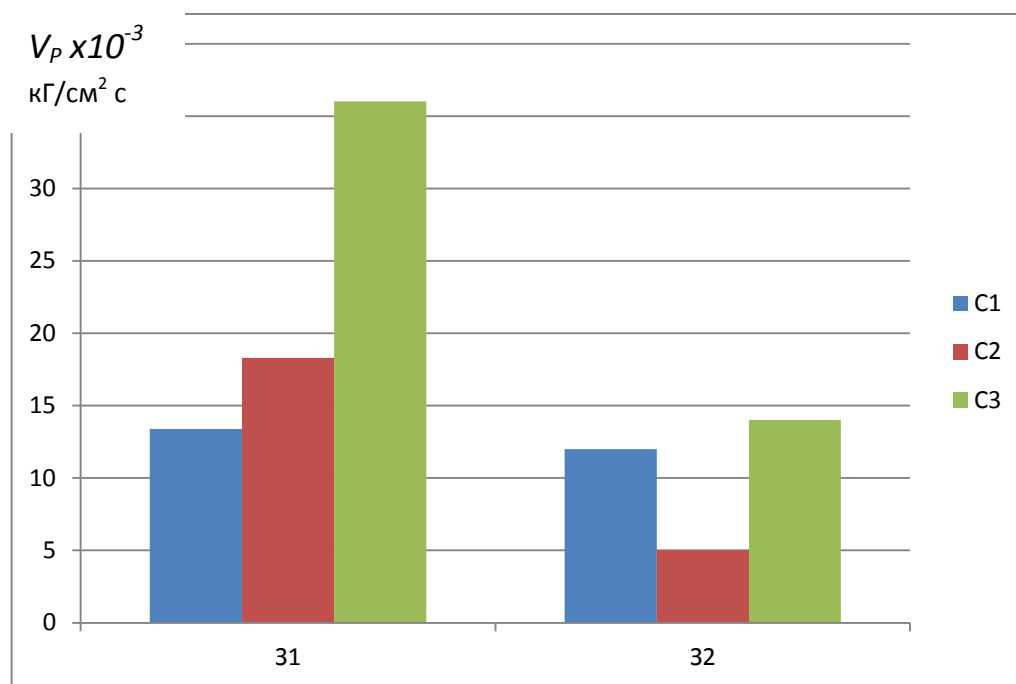


Рисунок 3.11. Эффективность схем обработки в зависимости от зашлакованности каналов (время очистки 1 минута)

31 – расход воды через каналы 0,024 -0,012 л/с

32 – расход воды через каналы 0,045 -0,032 л/с

В случае наличия малого количества загрязнений эффективность предлагаемой контактной схемы соизмерима с обычной схемой обработки, а при большем времени воздействия последняя может оказаться даже более эффективной. Это может быть связано с тем, что при малых толщинах отложений интенсивность воздействия общей кавитации оказывается достаточной для их разрушения и эвакуации, а повсеместное, хотя и слабое, воздействие в течение длительного времени способствует разрушению поверхностного слоя с удаленных от точек контакта зон горелки, где вибрации ее корпуса мало ощутимы, или располагаются узловые точки.

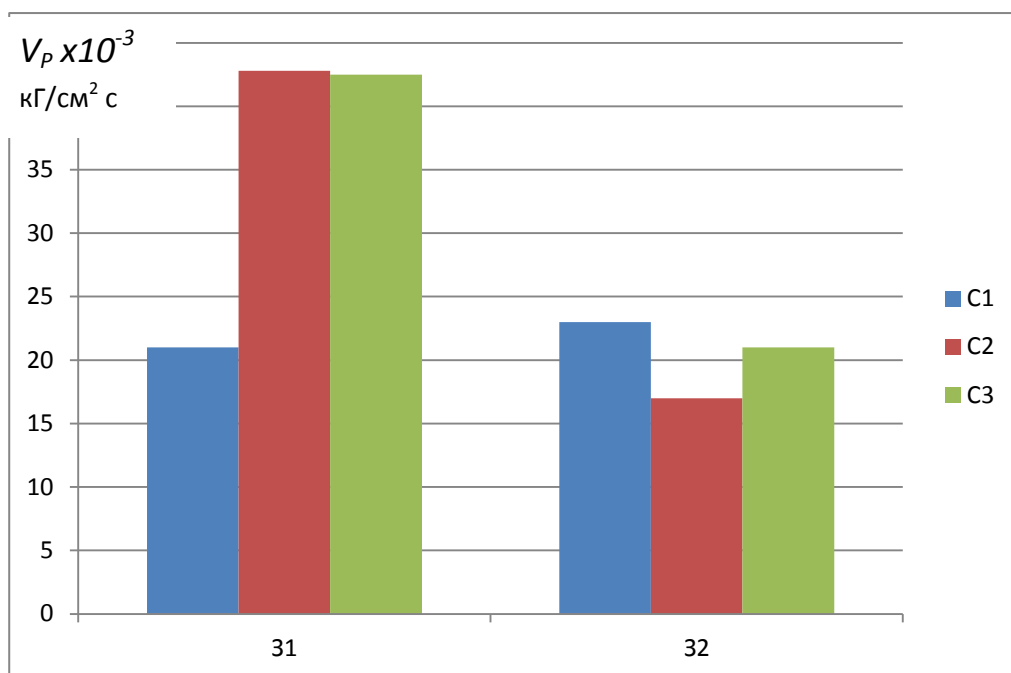


Рисунок 3.12. Эффективность схем обработки в зависимости от засоренности каналов (время обработки 5 минут)

31 – расход воды через каналы 0,024 -0,012 л/с

32 – расход воды через каналы 0,045 -0,032 л/с

Таким образом, определяющим для разрушения и удаления поверхностного оксидного слоя с внутренних полостей горелочных устройств является возбуждение высокочастотных колебаний в самом корпусе изделия, кавитация может явиться отрицательным фактором, вызывающим повышенный уровень шума на рабочем месте. Наиболее эффективное удаление поверхностного слоя из полостей и каналов осуществляется при жестком контакте обрабатываемого изделия с источником ультразвука на частоте, обеспечивающей формирование пучности виброускорения в области скопления отложений. Применительно к периферийным горелкам частота составляет 22,3 кГц. Очистка более тяжелых центральных горелок должна осуществляться на частоте 21,6 или 23,5 кГц. Комбинированная схема обработки (контактный метод в сочетании с общей обработкой) наиболее эффективна при высокой степени загрязнения каналов и отверстий, приводящей к снижению расхода жидкости через горелку в процессе входного контроля до 0,024 -0,012 л/с.

3.5 Выводы

1. В результате проведенного анализа химического состава отложений на стенках каналов и внутренних полостей, а также газоотводящих отверстий малого диаметра установлено, что углеродсодержащие органические элементы поверхностного слоя составляют не более 14 массовых % от общего количества поверхностного слоя. Остальные составляющие представлены в основном оксидами металлов, входящих в состав материала, из которого изготовлено горелочное устройство. На основании данного результата предложено использовать для осуществления обработки техническую водопроводную воду.

2. На образцах-имитаторах выполнено экспериментальное исследование кинетики удаления поверхностного оксидного слоя из каналов малого диаметра при общей кавитационной обработке и контактном воздействии ультразвукового излучателя. Отмечен факт увеличения интенсивности удаления поверхностного слоя как минимум на порядок, что свидетельствует о реальности и целесообразности применения данного метода обработки.

3. Выполнены сравнительные испытания различных схем поверхностной обработки горелочного устройства, позволившие определить рациональную схему – сочетание контактной обработки с прокачкой воды через каналы в докавитационном режиме. Показано, что предлагаемый метод наиболее эффективен при высокой степени загрязненности каналов и полостей.

4 ГЛАВА. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ И ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

4.1 Обоснование технологических режимов и способа ультразвуковой комбинированной обработки

В разделе 3.4 было показано, что в случае контактного воздействия ультразвукового излучателя на изделие наиболее интенсивное удаление поверхностного слоя происходит в докавитационном режиме. С целью уточнения условий реализации полученного эффекта и выявления его механизма проведены исследования вибро шумовых характеристик процесса контактной ультразвуковой обработки.

Определение характеристик вибраций и шума осуществляли при помощи компьютерного виброакустического комплекса ВК-01 производства ОАО «Электронные технологии и метрологические системы» (г. Зеленоград).

В процессе измерений датчик виброускорения устанавливали при помощи магнитного переходника на головку винта, ввернутого в резьбовое отверстие волновода. При этом один из пилонов горелочного устройства размещался на расстоянии не больше 2 мм от датчика. Датчик звукового давления (микрофон 1-го класса точности) размещался на штативе на расстоянии 0,5 м от корпуса ультразвуковой ванны.

В ходе статистической обработки записей с датчиков виброускорения ВС112 и звукового давления ВС501 в программной среде *ZetLab* получены графики изменения максимальных и средних значений указанных параметров от частоты выходного тока генератора и веса установленного на волноводе горелочного устройства (рис. 4.1, 4.2). Видно, что наибольшие значения как пиковых, так и средних виброускорений соответствуют частоте около 22300 Гц. При этом кавитационные эффекты менее заметны, чем на частотах 23500 Гц. В тоже время параметры звукового давления практически минимальны. Максимальные

значения виброускорения превышают средние в 1,5-1,6 раза, для звукового давления наблюдается превышение до 2 раз. В области частот интенсивной кавитации наблюдается возрастание звукового давления почти в 3,5-4 раза по максимальным значениям и до 1,7 раз по средним. Фактические максимальные значения составляют 9-9,5 Па, что примерно соответствует значениям 100-105 дБ, являющимся предельно допустимыми в третьоктавных полосах при частотах 20-25 кГц.

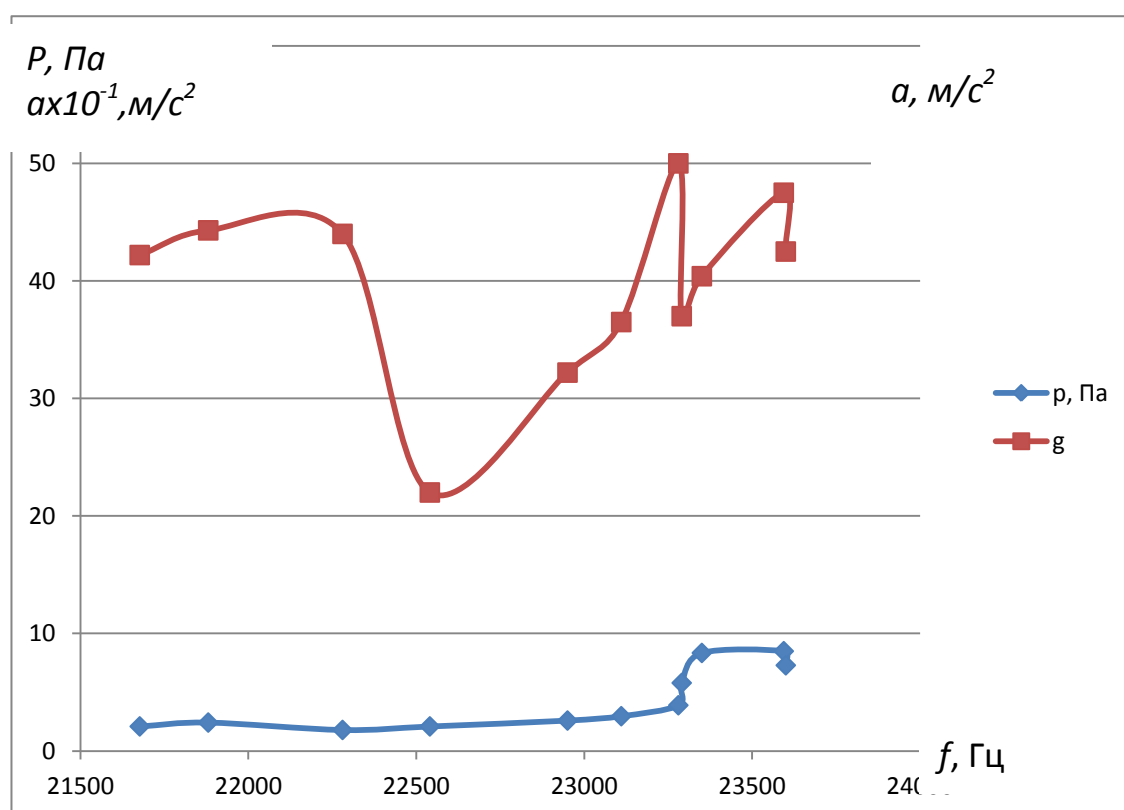


Рисунок 4.1. Изменение максимальных (пиковых) значений виброускорения a на торце волновода и звукового давления p на расстоянии 0,5 м от ультразвуковой ванны в зависимости от частоты подаваемого на преобразователь тока (вес нагрузки 85Н)

Поэтому необходимо при проектировании технологии комбинированной контактной обработки учитывать частоты 22,3 кГц, когда параметры шума меньше.

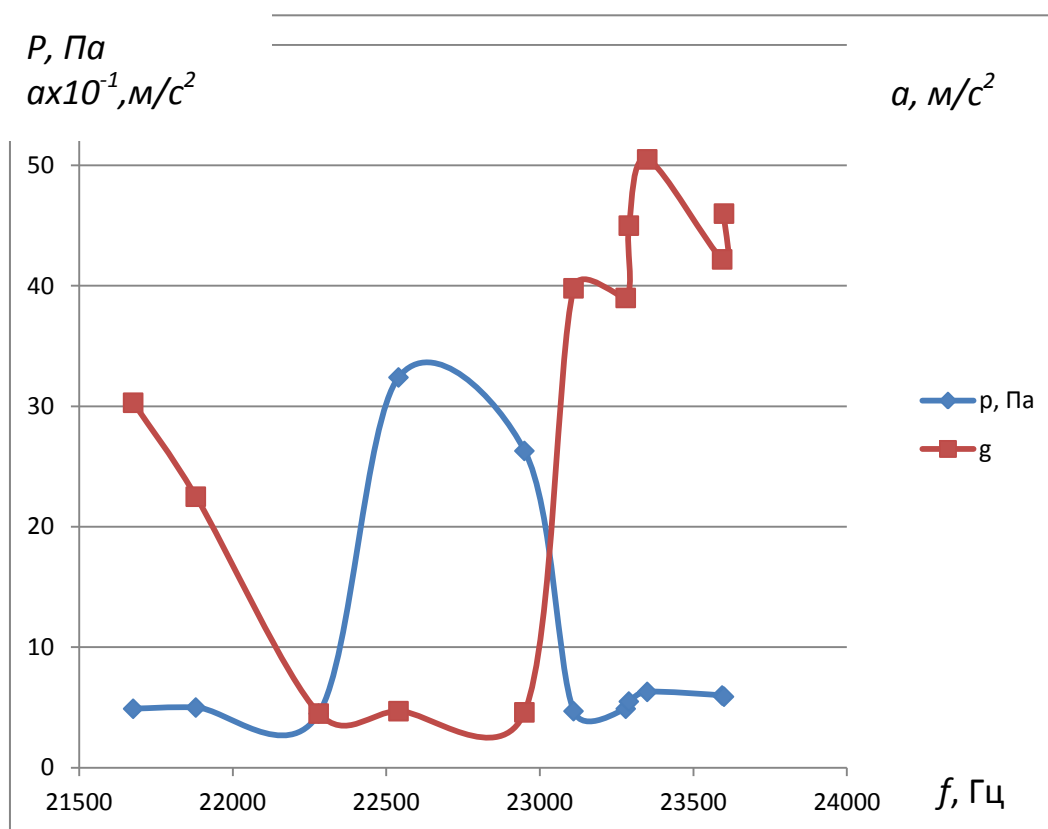


Рисунок 4.2. Изменение максимальных (пиковых) значений виброускорения a на торце волновода и звукового давления p на расстоянии 0,5 м от ультразвуковой ванны в зависимости от частоты подаваемого на преобразователь тока (вес нагрузки 120 Н)

При установке на волновод горелочного устройства весом 12 кг, в целом сохраняется тенденция двух пиков виброускорений (на меньших и больших частотах того же уровня, что и в предыдущем случае). При этом значения виброускорения практически не отличаются. Картина распределения звукового давления существенно отлична: в области частот 21600-22300 Гц и 23300-23600 Гц звуковое давление не отличается от такового при обработке горелки меньшего веса. В области средних частот (22500-23200 Гц) при минимальном виброускорении наблюдается резкий всплеск звукового давления с превышением до 10 раз! По-видимому, это связано не с интенсивностью кавитации, а с появлением низкочастотных вибраций в конструкции горелки и резонировании ее корпуса. Очевидно, в данном диапазоне частот вести обработку недопустимо.

Таким образом, рабочая частота выходного тока генератора при обработке периферийных горелочных устройств (вес 85 Н) должна составлять 22300 Гц, при обработке центральных горелок (вес 120 Н) - 23300-23600 Гц (допускается 21600-22300 Гц). С учетом сопоставления целесообразнее выбрать одну частоту для обоих изделий – 22300 Гц, на которую должна быть рассчитана ультразвуковая колебательная система.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований предложен способ комбинированной ультразвуковой обработки, защищенный патентом № 2625465, опубликован 14.07.2017 г.

Сущность способа состоит в следующем. Используют концентратор с переменным внутренним профилем, торцовую поверхность стержневого концентратора погружают в жидкость на глубину 10-15 мм, а перед возбуждением в стержневом концентраторе продольных колебаний удаляют воздух из его внутренней полости до заполнения этой полости жидкостью не менее чем на $2/3$ объема. Длину концентратора выбирают равной длине волны возбуждаемых в нем ультразвуковых колебаний, внутреннюю полость концентратора выбирают равной $2/3$ его длины, торцовую поверхность концентратора вводят в контакт с обрабатываемой поверхностью с определенным усилием, равным массе обрабатываемого объекта. Для обработки внутренних полостей и каналов горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов усилие контакта устанавливают равным 80-120 Н, а жидкость прокачивают через каналы и отверстия с расходом 1,5-1,7 м³/ч.

Защищенная указанным патентом технология реализуется следующим образом. Определяют массу изделия, подвергаемого обработке с целью определения необходимого усилия прижатия к торцу концентратора. Меньшее усилие не обеспечивает передачи достаточной амплитуды колебаний изделию. Большее усилие, особенно при недостаточной жесткости конструкции, может привести при воздействии ультразвука к размерным макродеформациям, которые приведут к нарушению размерной точности. На опоры устанавливают изделие и присоединяют к одному из его центральных каналов трубопровод, связанный с

насосом. Заполняют ванну технологической жидкостью до указанного уровня в 10-15 мм выше торцевой поверхности, что обеспечит минимальное непроизводительное нагружение концентратора и сохранение высокой амплитуды его колебаний. Создают разрежение во внутренней полости концентратора, что обеспечивает уровень жидкости, полностью покрывающей изделие в случае размещения его части в полости концентратора. Включают ультразвуковой генератор, что обеспечивают сообщение колебаний загрязненным элементам изделия. Включают насос, забирающий жидкость из емкости через фильтр. Обработку продолжают до полного разрушения и удаления поверхностного оксидного слоя из каналов и полостей изделия. Эффект обработки заключается в сочетании общего кавитационного воздействия на наружные поверхности и кромки отверстий с контактным ультразвуковым воздействием, приводящим к механическому растрескиванию, отслоению и разрушению поверхностного слоя во внутренних каналах и полостях.

4.2 Технические предложения по созданию специального ультразвукового оборудования

В связи с большими массами обрабатываемых объектов и необходимостью устойчивого возбуждения в них ультразвуковых колебаний экспериментально отработана схема и конструкция многопакетной ультразвуковой колебательной системы, в которой применено 5 пьезокерамических излучателей, соединенных с общей активной накладкой из сплава Д16Т, выполненной в виде ступенчатого стакана. 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 половины длины волны ультразвуковых колебаний от выходного торца. Наружная поверхность стакана также ступенчатая с расположением ступени на расстоянии четверти длины волны от выходного торца. Такая конструкция обеспечивает высокую интенсивность колебаний, приводящую даже к образованию поверхностных волн (рис. 4.3). С целью снижения нагрузки на

активную накладку объем жидкости рекомендуется таким, чтобы выходной торец накладки был покрыт слоем 10-15 мм. Это обеспечит постоянное кавитационное воздействие на наружную поверхность газоотводящих трубок и центральное тело корпуса, погруженное в отверстие накладки.

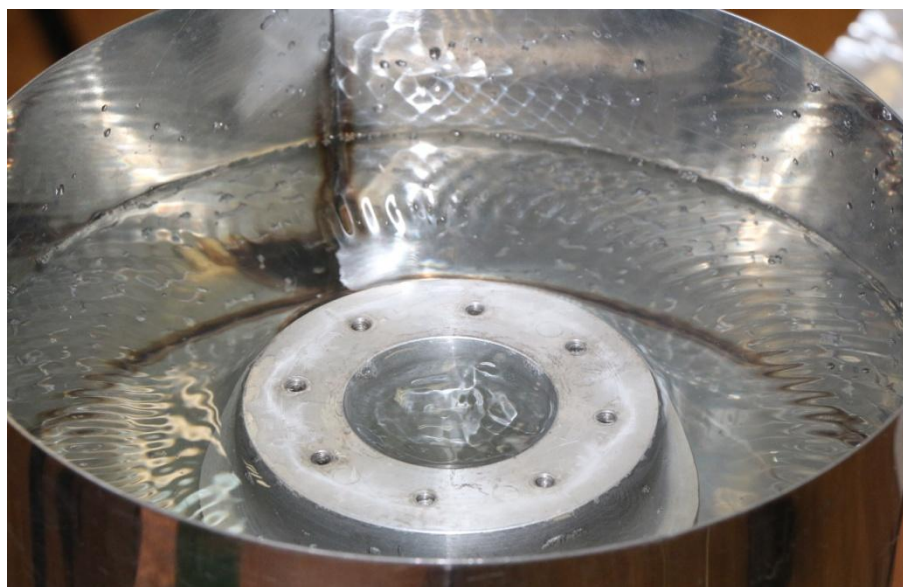


Рисунок 4.3. Ультразвуковые волны на поверхности технологической жидкости при работающем излучателе на частоте 23350-23594 Гц

В соответствии с техническим заданием установка разрабатывается модульной конструкции и содержит следующие основные модули:

- Ультразвуковой модуль;
- Гидравлический модуль;
- Нагревательный модуль;
- Контрольно-измерительный и управляющий модуль;
- Монтажный модуль.

Анализировались три возможные схемы установки:

- со всасывающей гидравлической системой и открытыми блоками (модулями);
- с размещением всех элементов в шумоизолированной камере;

– с размещением элементов электрической схемы и гидравлической системы открыто на общей платформе и с шумоизоляцией только ультразвуковой ванны.

Схема 1 имеет следующие особенности. За основную принята схема всасывания технологической жидкости через отверстия и каналы горелочного устройства с целью гарантированного удаления разрушенного ультразвуком поверхностного слоя из каналов и тупиковых зон. Для стабильного обеспечения необходимого количества технологической жидкости в ультразвуковой ванне применено два насоса: один для всасывания жидкости из ультразвуковой ванны через горелочное устройство, второй для подкачки свежей жидкости из расходной емкости в ванну. Нагрев жидкости осуществляется спиральным нагревателем, встроенным в подающий трубопровод. Это нецелесообразно, поскольку из-за проточного характера такого нагревателя необходим подвод значительной электрической мощности.

В схеме 2 нагреватель расположен в расходной емкости, что обеспечивает стабильный нагрев жидкости при малых и средних затратах электрической мощности, т.к. в целом объем жидкости изменяется постепенно вследствие ее забора вторым насосом. Эта схема выбрана для дальнейшей проработки.

Слив жидкости в расходную емкость происходит через сменный фильтр.

Гидравлический модуль (рис. 4.4) содержит:

- насос 1 обеспечивает откачку ОЖ из ультразвуковой ванны через изделие;
- насос 2 обеспечивает подкачку ОЖ в ультразвуковую ванну через соединительный трубопровод;
- датчик уровня ОЖ в ультразвуковой ванне.

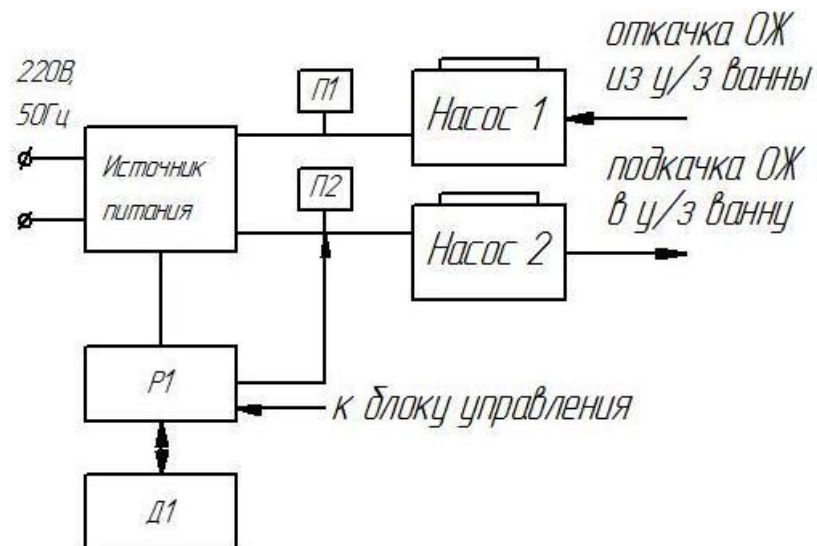


Рисунок 4.4. Структурная схема гидравлического модуля

Нагревательный модуль (рис. 4.5) содержит:

- нагреватель;
- датчик температуры ОЖ.

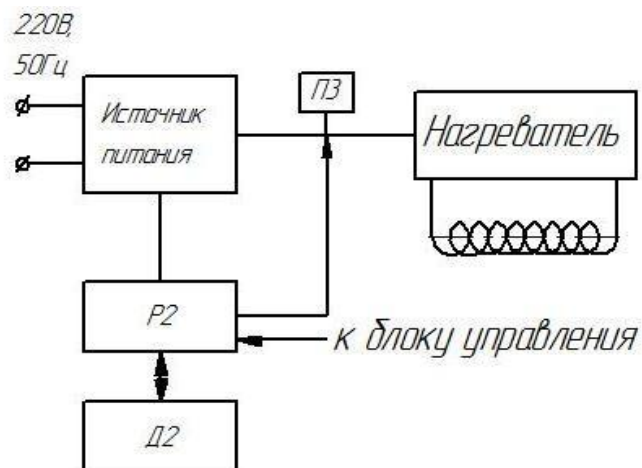


Рисунок 4.5. Нагревательный модуль

Ультразвуковой модуль (рис. 4.6) содержит:

- ультразвуковой генератор;

- источник питания;
- коммутатор с блоком управления

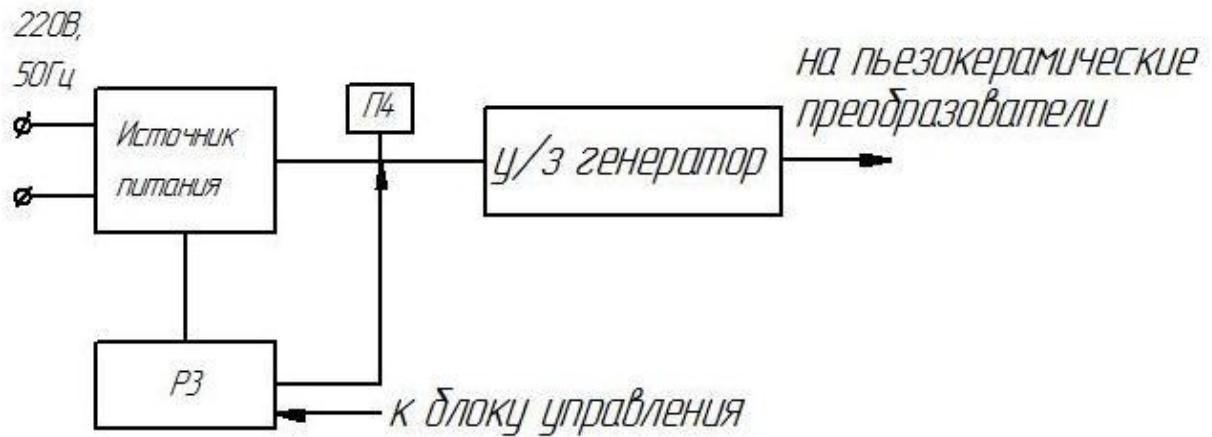


Рисунок 4.6. Ультразвуковой модуль

Модуль управления (рис. 4.7) содержит:

- датчик контроля расхода охлаждающей жидкости;
- датчик (эталонный);
- блок сравнения;
- блок управления.

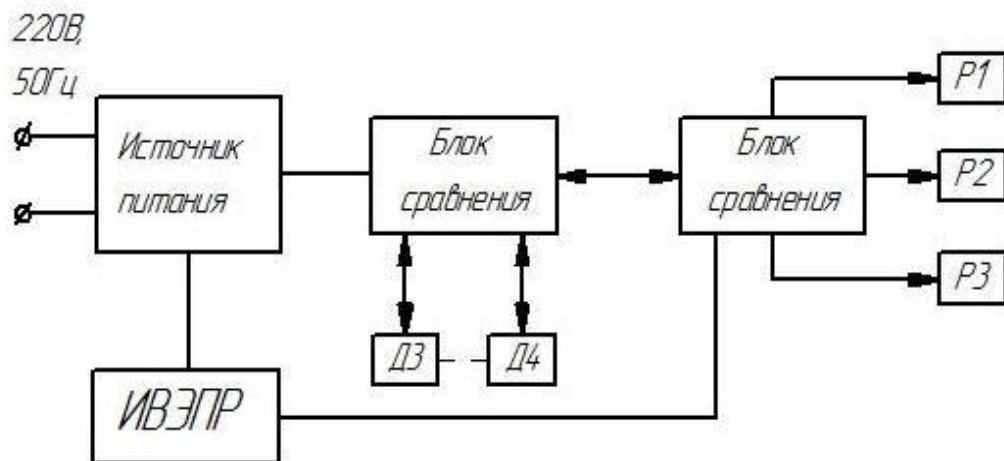


Рисунок 4.7. Модуль управления

Цикл работы установки по схеме 2 предполагался следующий.

1. Включается нагрев технологической жидкости в расходной емкости. При достижении требуемой температуры 55-75°C нагрев в баке отключается. По мере циркуляции жидкости, а также её остывания, нагрев включится.

2. Включается насос 2 подкачки жидкости в ультразвуковую ванну. При достижении необходимого ее уровня насос 2 отключается.

3. Включается ультразвуковой генератор. Отключение ультразвукового генератора обеспечивается блоком управления при достижении требуемого расхода технологической жидкости путем его оценки в блоке сравнения.

4. Включается насос 1 откачки ОЖ из ультразвуковой ванны через изделие.

Примечание. Длительность процесса обработки изделия в установке определяется в блоке сравнения с помощью датчиков ДЗ и Д4. При достижении эталонного значения расхода жидкости датчик Д4 выдает команду в блок сравнения на отключение основных модулей установки.

Все конструктивные элементы и модули установки предполагалось разместить в закрываемом герметичной крышкой корпусе с двойными стенками, промежуток между которыми заполнялся слоем стекловаты толщиной до 100 мм. Тем самым обеспечивалась надежная защита оператора от акустического воздействия ультразвука и шумов работающих агрегатов установки (насосы, фильтры, электроавтоматика). Размещение всех элементов в корпусе гарантировало также защиту оператора от самопроизвольного случайного касания с токоведущими элементами.

В дальнейшем предполагалось упростить конструкцию установки, исключив расходную емкость. Однако при тщательном анализе особенностей эксплуатации такой установки вскрылись недостатки, которые нивелировали определенные отмеченные выше преимущества:

- отсутствие расходной емкости существенно затрудняет регулировку работы насоса;
- - большинство отечественных и зарубежных насосов плохо работают на всасывание;
- наличие двух насосов усложняет конструкцию;

- размещение всех элементов установки в общем закрытом корпусе вследствие наличия источников тепловыделения (электронагреватели и расходная емкость с жидкостью, нагретой до 75°C , ультразвуковые пьезокерамические преобразователи, насос) может привести к перегреву элементов электросхемы и нарушению стабильности работы блока управления установкой) нецелесообразно;
- - затруднено техническое обслуживание.

В результате рациональной может считаться схема 3 (рис. 4.8), в которой только ультразвуковая ванна размещается в герметичном шумоизолирующем шкафу.

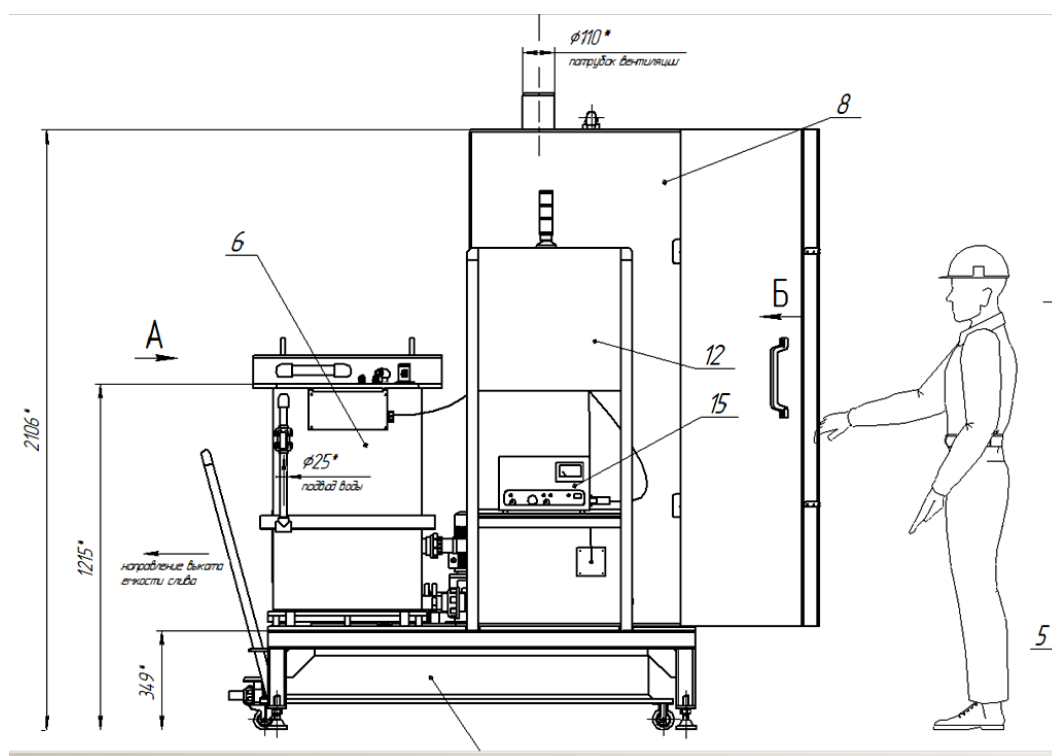


Рисунок 4.8. Окончательно принятая схема установки

Расходная емкость с нагревателями, насос, элементы гидравлической схемы, блок управления и ультразвуковой генератор размещены открыто на сварной рамной конструкции.

4.3 Выводы

1. На основе проведенных исследований виброшумовых характеристик процесса контактной ультразвуковой обработки определен рациональный частотный диапазон, обеспечивающий максимальное виброускорение в зоне воздействия при минимальном звуковом давлении.

2. Выявлены особенности источника ультразвуковых колебаний и разработана его конструкция. Источник состоит из единой активной накладки в виде ступенчатого стакана, соединенного с пятью пьезокерамическими излучателями.

3. Разработан способ комбинированной ультразвуковой обработки, защищенный патентом РФ.

4. Определены требования к специальной ультразвуковой установке, реализующей предложенный способ и обоснованные технологические режимы.

5 ГЛАВА. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Автоматизированная установка комбинированной ультразвуковой обработки горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов

На основе выполненных исследований и анализа принципов создания установок ультразвуковой обработки с учетом полученных патентов разработано техническое задание, по которому в ОАО «НИТИ-Тесар» (г. Саратов) спроектирован и изготовлен экспериментальный образец (рис. 5.1).

*а**б*

Рисунок 5.1. Экспериментальный образец установки:
фронтальный вид со стороны панели управления (а);
вид со стороны гидросистемы (б)

Особенностью установки является герметичный шкаф с вытяжной вентиляцией для размещения ультразвуковой ванны и изделия, а также гибкого трубопровода включения последнего в гидравлическую систему.

Применено два фильтра грубой и тонкой очистки, теплоизоляция трубопроводов и расходной емкости для стабилизации температуры технологической жидкости, ультразвуковой расходомер жидкости, ультразвуковой генератор на новой элементной базе. В установке применен генератор разработки ООО «Ультразвук-ТЕО» (г. Саратов). Основным технологическим элементом установки является ультразвуковая ванна (рис. 5.2), разработанная с учетом выполненных исследований и макетных работ.

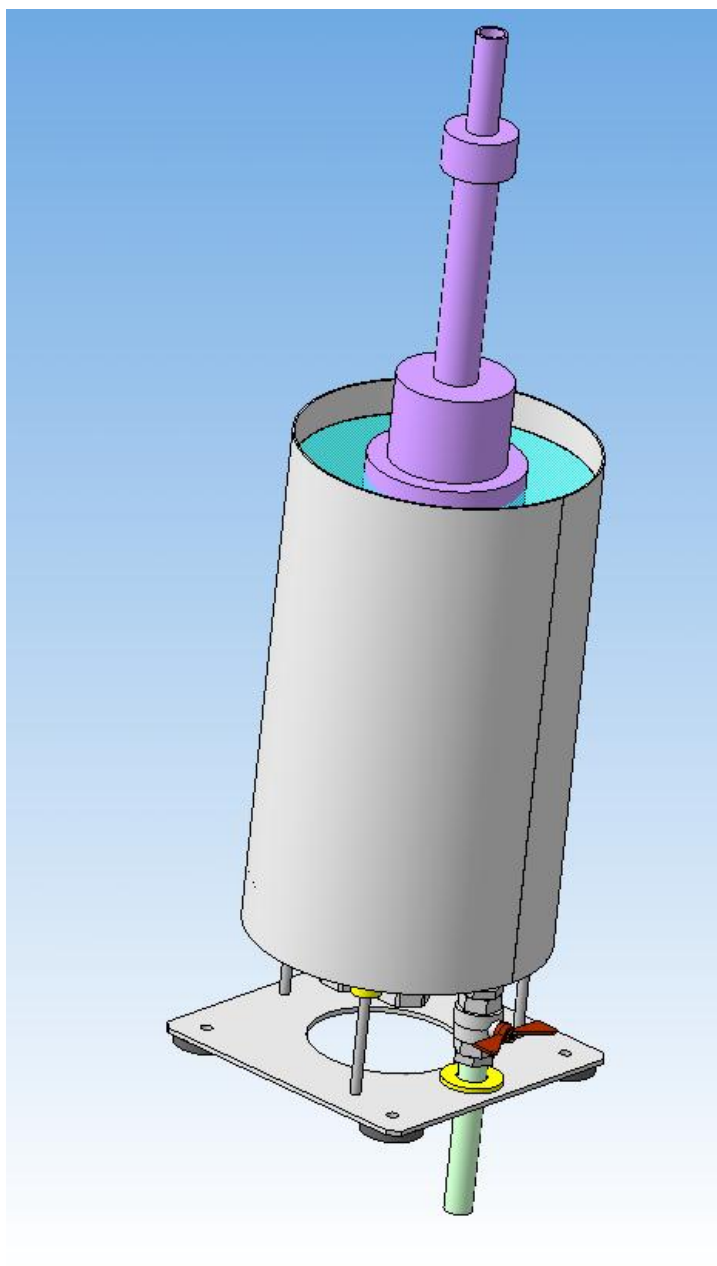


Рисунок 5.2. Ультразвуковая ванна на виброопорах

Ультразвуковая ванна состоит из двух разъемных частей: собственно ванны и виброизолирующей подставки.

Такая конструкция обоснована необходимостью предотвращения распространения ультразвуковых колебаний на рамную станину, что может вызвать с одной стороны потери акустической мощности, а с другой стороны – генерацию низкочастотных высокоамплитудных колебаний, отрицательно сказывающихся на долговечности сварной конструкции и создающих дополнительную акустическую нагрузку на рабочем месте.

Ванна представляет собой сварную цилиндрическую емкость из листов нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 2 мм. Это обеспечивает коррозионную устойчивость, исключение провара при соединении и достаточную механическую жесткость. Источник ультразвука представляет собой также отработанную конструкцию [11]: пять ультразвуковых пьезокерамических преобразователей, работающих на общий волновод, расположенный в объеме ванны. В отличие от макета волновод применен не полуволновой, а волновой длины в связи с необходимостью увеличения диаметра центрального отверстия для размещения центрального тела горелочного устройства, имеющего два исполнения (большого и меньшего диаметра). Защита волновода от кавитационной и химической эрозии обеспечивается твердым анодированием. Дно ванны расположено между преобразователями и волноводом в зоне генерации начальной амплитуды колебаний. Фазовые и массовые электроды преобразователей соединены параллельно. В дне ванны выполнено отверстие, в которое вварен штуцер с шаровым краном для аварийного слива технологической жидкости.

В среднем сечении ванны в цилиндрическом корпусе выполнено отверстие для установки рукава, соединяющего ванну с расходной емкостью по принципу сообщающихся сосудов с проходным сечением, обеспечивающим стабильную смену жидкости при работе насоса (площадь сечения соответствует диаметру 80 мм). Для вибрационной развязки корпуса ванны и емкости рукав выполнен гибким.

Ванна жестко на опорах не крепится для удобства обслуживания. Фиксация от поперечного смещения обеспечивается кольцевым поясом шириной 30 мм, спущенным за дно ванны.

Технологическая жидкость поступает в ванну из расходной емкости путем прокачки через горелочное устройство. Расходная емкость объемом 50 л сварена из листов полипропилена PP15 и имеет теплоизолирующую оболочку *K-FLEX DuctNet* для сохранения достигнутой температуры технологической жидкости. Сверху емкость закрывается герметичной крышкой для предотвращения попадания в гидросистему инородных включений из внешней среды. Наполнение емкости может осуществляться непосредственно заливом после поднятия крышки или из цехового трубопровода через специальный штуцер и шаровой кран. Если в первом случае приготовление раствора технологической жидкости нужной концентрации производится вне емкости, то в последнем случае – непосредственно в ней. В задней стенке емкости выполнены отверстия для ввода нагревательных ТЭНов. Датчики уровня жидкости и температуры установлены в отверстиях специальной верхней панели.

В установке применена двойная система фильтрации. Фильтр грубой очистки расположен на обратной ветви трубопровода. Применен фильтр, штатный для насоса ХЦМ-В-К из стали 12Х18Н10Т с сеткой с ячейками 0,4 мм и фильтроэлементом с отверстиями 0,5 мм. Фильтр тонкой очистки ФМ-03М установлен в напорной ветви трубопровода непосредственно перед ультразвуковой ванной. Фильтр с корпусом из нержавеющей стали 12Х18Н10Т снабжен сменными кассетами с тонкостью очистки 5-30 мкм, что вполне достаточно по результатам анализа отложений, извлеченных из полостей горелочного устройства.

В установке применена система прокачки технологической жидкости через горелочное устройство напрямую без всасывания поскольку абсолютное большинство насосов не обеспечивают надежной работы в заданном диапазоне расходов в режиме всасывания.

С целью обеспечения надежной работы в агрессивных средах (возможное применение щелочных технологических жидкостей) и снижения стоимости применен электронасос в смешанной комплектации: химический центробежный насос ХЦМ 1/10ВК из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и электродвигатель обычного (не взрывозащищенного) исполнения из комплекта ХМ 1/10. Регулировка расхода жидкости осуществляется не за счет применения частотного преобразователя в системе питания двигателя, а путем байпасной системы (обратный трубопровод с регулировкой проходного сечения).

Анализ известных расходомеров жидкости показал, что для решения задач контроля скорости истечения и расхода жидкости через горелочное устройство оптимальным является применение ультразвуковых расходомеров, работающих по принципу эффекта Доплера. Автоматический цикл установки обеспечивается прецизионным ультразвуковым расходомером «Днепр-7», осуществляющим контроль расхода жидкости через каналы горелочного устройства и сравнение этих данных с внесенными в память устройства управления параметрами эталонного изделия. На установке по результатам экспериментальных исследований заложены следующие эталонные расходы технологической жидкости (Таблица 5.1).

Таблица 5.1 Установленные эталонные расходы жидкости через горелочные устройства

№ п/п	Тип горелочного устройства	Обозначение	Расход, м ³ /ч
1	Центральное	ПСТ 3.387537.000	1,425 min 1,300 max 1,550
2	Периферийное (диаметр радиальных отверстий в центральном теле – 2,0 мм)	ПСТ 3.387536.000-01	1,725 min 1,716 max 1,734
3	Центральное	-	0,950 min 0,900 max 1,000
4	Периферийное (диаметр радиальных отверстий в центральном теле – 1,0 мм)	-	1,425 min 1,300 max 1,500

5.2 Производственные испытания технологии и установки

Установлено, что горелочные устройства имеют существенный разброс степени уменьшения проходного сечения каналов, что отразилось на времени цикла обработки. Как правило, два периферийных горелочных устройства из шести имели максимальную толщину поверхностного оксидного слоя, которая была устранена за 30-40 минут непрерывного процесса обработки при температуре воды в системе $(55-60)^{\circ}\text{C}$. При этом был получен средний уровень эффективности обработки, характеризуемый расходом воды через горелку порядка $1,400 \text{ м}^3/\text{ч}$. Четыре горелки из комплекта были обработаны до максимального (эталонного) уровня $1,500 \text{ м}^3/\text{ч}$ за 4-5 минут. Во всех случаях первоначальный расход воды составлял $0,3-0,4 \text{ м}^3/\text{ч}$, затем скачкообразно поднимался до $0,8-1,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ и постепенно за 3-4 минуты до $1,3 \text{ м}^3/\text{ч}$. Для загрязненных в большей степени горелок в дальнейшем нарастание расхода до $1,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ происходило примерно за 25-30 минут и в дальнейшем колебалось около уровня $1,38-1,42 \text{ м}^3/\text{ч}$. Остальные горелки повышали пропускную способность до $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ примерно за 1 минуту. В одном случае наблюдалось снижение расхода через загрязненную горелку спустя 20 минут процесса обработки до уровня $0,9 \text{ м}^3/\text{ч}$ с последующим нарастанием, что могло быть связано с отслоением крупных фрагментов поверхностного слоя и закупориванием части проходного сечения канала.

Центральные горелки подвергались обработке в количестве 3 единиц. Во всех случаях время процесса составляло порядка 30 минут, но степень удаления поверхностного оксидного слоя в одном случае составила $0,95 \text{ м}^3/\text{ч}$, в двух других – $0,6-0,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ без значимого нарастания с увеличением продолжительности процесса. По-видимому, это связано с большей сложностью внутренних каналов и полостей, что вызывает дополнительное сопротивление потоку жидкости, а также в большей степени способствует осаждению фрагментов поверхностного слоя и

усложняет их разрушение. Также следует учесть, что центральная горелка имеет два ряда газоотводящих трубок – пилонов, из которых только один внешний ряд контактирует с торцом волновода и подвергается действию контактного интенсивного ультразвука.

Для производственных испытаний в условиях РММ Петровского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Саратов» были предоставлены два комплекта горелочных устройств: с компрессорного агрегата Петровского ЛПУМГ и компрессорного агрегата Александровогайского ЛПУМГ. Испытания проводились как в присутствии соискателя, так и в его отсутствии техническим персоналом Петровского ЛПУМГ.

В результате производственных испытаний пропускная способность всех периферийных горелок доведена до паспортного уровня (табл. 5.2).

Таблица 5.2 Результаты обработки горелочных устройств на установке в производственных условиях РММ Петровского ЛПУМГ

№ п/п	Обозначение горелочного устройство	Начальный расход/ конечный расход моющей жидкости м куб. / час	Время очистки мин.
1	2	3	4
Александровогайское ЛПУМГ, ГПА № 4, тип ПСТ 3.387536.000-01			
1	Периферийное, тех. № 379	0,57 / 1,246	120
2	Периферийное, тех. № 191	1,28 / 1,3	45
3	Периферийное, тех. № 375	1,3 / 1,45	8
4	Периферийное, тех. № 376	1,35 / 1,5	10
5	Периферийное, тех. № 377	1,4 / 1,51	12
6	Периферийное, тех. № 378	1,3 / 1,51	11
7	Центральное, тех. № 60к	0,3 / 0,65	60

Петровское ЛПУМГ, ГПА № 23, тип ПСТ 3.387536.000-01			
1	Периферийное, тех. № 352	1,25 / 1,48	45
2	Периферийное, тех. № 363	1,45 / 1,55	10
3	Периферийное, тех. № 353	1,55 / 1,55	10
4	Периферийное, тех. № 365	1,3 / 1,5	25
5	Периферийное, тех. № 356	1,2 / 1,45	45
6	Периферийное, тех. № 362	1,22 / 1,47	30
7	Центральное, тех. № 61	0,397 / 0,41	60

После снятия с установки горелочные устройства дополнительно подвергались финишному контролю в сравнении с эталоном по критерию времени набора стандартного давления в герметичном баллоне. Сравнительные графики, полученные в процессе испытаний, представлены на рис. 5.3-5.5.

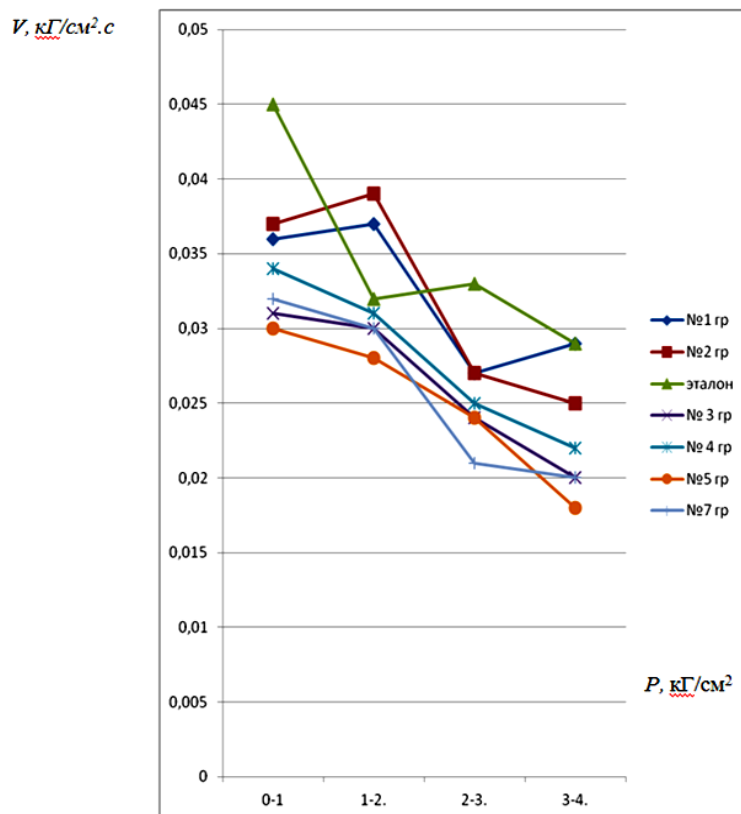


Рисунок 5.3. Скорость набора давления в баллоне его накачке через горелочные устройства после эксплуатации в течение 6000 часов в сравнении с эталоном

На графиках указана скорость набора давления воздуха в герметичной емкости, в которой установлено испытываемое изделие. Накачка воздуха осуществлялась компрессором через подводящий канал горелочного устройства.

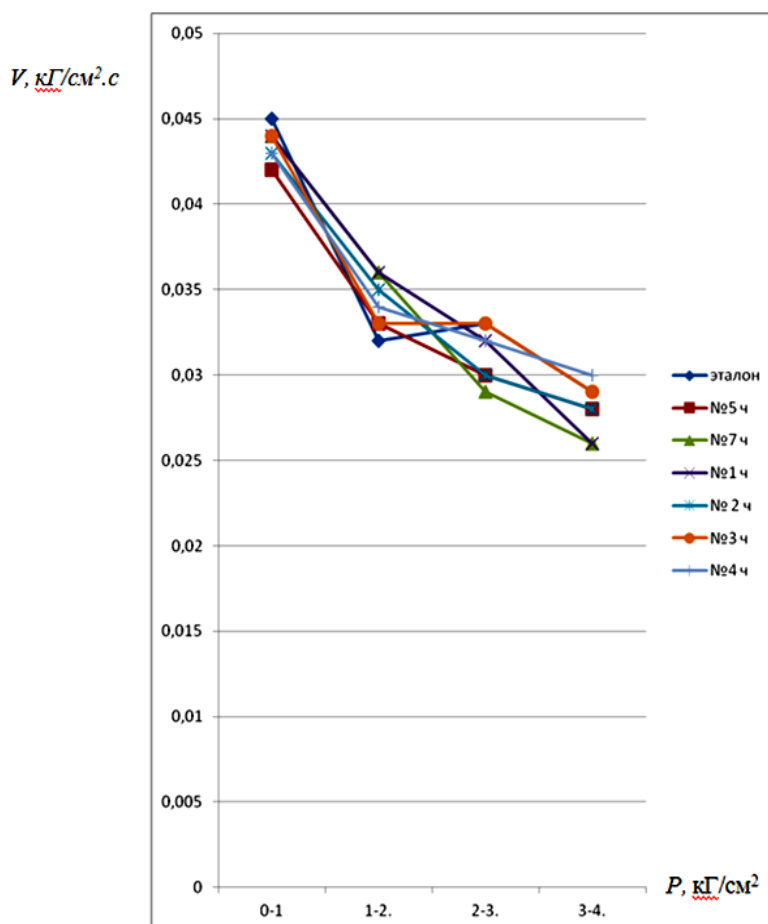


Рисунок 5.4. Скорость набора давления в баллоне его накачке через горелочные устройства после ультразвуковой обработки в сравнении с эталоном

Анализ результатов производственных испытаний, отраженный в графиках (рис. 5.3-5.5), показывает, что:

- средняя скорость набора давления через эталонную горелку составляет $0,035 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{с}$;
- средняя скорость набора давления через не обработанную горелку составляет $0,027 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{с}$;

- средняя скорость набора давления через обработанную горелку составляет $0,034 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{с}$;
- после ультразвуковой обработки скорость набора давления по сравнению с эталонной восстановлена на 97%.

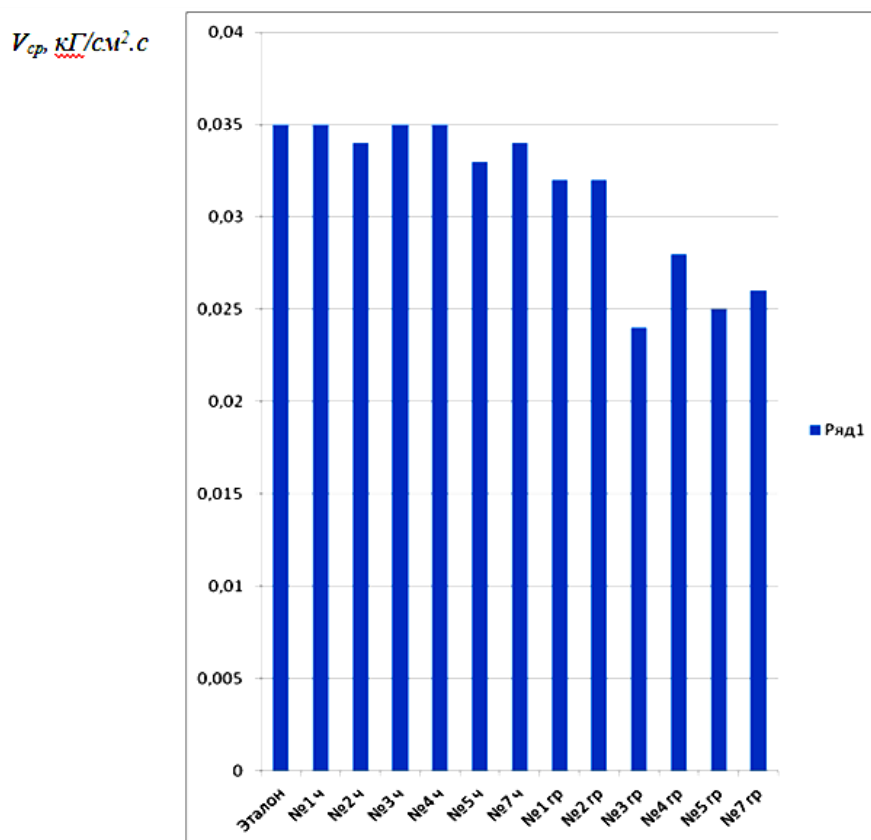


Рисунок 5.5. Средняя скорость набора давления в баллоне ($P=4,0 \text{ кг/см}^2$) через эталонную горелку, горелки после ультразвуковой обработки и горелки после эксплуатации

После прохождения цикла обработки комплекты горелочных устройств были вновь введены в эксплуатацию.

Производственная проверка технологии путем передачи обработанных комплектов горелочных устройств в эксплуатацию на компрессорные станции в г. Мокроус и г. Петровск (Саратовская область) показала, что достигнутое качество обработки позволяет довести частоту вращения турбины агрегата с 4500-4700 об/мин до 5050 об/мин при номинале 5000-5200 об/мин, т.е. войти в требуемый

диапазон. КПД агрегата после обработки горелочных устройств возрос на 6%. Приведенная концентрация соединений NO_x и CO в сухих отработавших газах понизилась соответственно в 4,3 и 7,5 раза и соответствуют новому изделию.

5.3 Оценка технико-экономической эффективности технологии и установки

Расчет показателей коммерческой эффективности проводится с использованием принципа «с проектом – без проекта». В качестве варианта «без проекта» рассматривается вариант эксплуатации стационарных ГПА в количестве 55 единиц с заменой вышедших из строя комплектов горелочных устройств на новые при наработке 6000 часов. По варианту «с проектом» в расчете учитываются затраты на проведение НИОКР, в результате которой будет разработана серийная технология восстановления горелочных устройств методом комбинированной ультразвуковой обработки, созданы и внедрены специальная ультразвуковая установка.

Продолжительность расчетного периода принята равной десять лет, что составляет прогнозируемый срок работы до списания ультразвуковой установки. Расчет выполняется в текущих ценах базового периода без учета НДС, в качестве показателя коммерческой эффективности используется чистый дисконтированный доход.

Эффект достигается за счет экономии финансовых средств, расходуемых на покупку и замену новыми вышедших из строя горелочных устройств за счет восстановления работоспособности горелочных устройств через каждые 6000 часов путем ультразвуковой обработки до значений, близких к номинальным.

Существующие затраты:

Стоимость нового комплекта горелочных устройств для одного ГПА по производственным данным составляет 1144 тыс. руб. без учета НДС. Как показывает опыт эксплуатации, наибольший ресурс одного комплекта горелок

составляет около 6000 моточасов. Соответственно за период эксплуатации до капитального ремонта (24000 часов) затраты на эксплуатацию камеры сгорания увеличиваются в 3 раза и составляют около 3432 тыс. руб. за счет установки новых комплектов горелочных устройств.

Прогнозные затраты:

Стоимость обработки комплекта горелочных устройств для одного ГПА предлагаемым методом по результатам производственных испытаний составляет 17,8 тыс. руб. с последующей обработкой каждые 6000 часов. Соответственно за срок эксплуатации горелочных устройств до капитального ремонта затраты составят 53,4 тыс. руб.

Расчет экономической эффективности:

Расчет экономической эффективности выполнен на основе исходных данных, приведенных в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Исходные данные для расчета экономического эффекта

Показатель	Единица измерения	Величина
Количество ГПА (ГТ-750-6, ГТК-10-4) в ООО «Газпром трансгаз Саратов» на момент выполнения работы	ед.	47
Средняя наработка ГПА (по данным 2011 г.)	час/год	871
Затраты на приобретение нового комплекта горелочных устройств	тыс. руб.	1144
Срок полезного использования камеры сгорания	часов (лет)	24000 (8)
Прогнозируемые затраты на выполнение НИОКР	тыс. руб.	5000,0
Прогнозные затраты на восстановление работоспособности горелочных устройств за весь период назначенного ресурса	тыс. руб.	53,4
Налог на прибыль	%	20
Прогнозируемый срок службы ультразвуковой установки до списания	лет	10

Норма дисконта принимается равной 10 % согласно действующей в ПАО «Газпром» методике расчета ожидаемого экономического эффекта.

При расчете экономической эффективности принято, что затраты осуществляются за счет собственных средств ПАО «Газпром» без привлечения кредита.

Коэффициент, учитывающий годовое количество комплектов горелочных устройств, подлежащих замене (восстановлению) при условии годовой наработки ГПА 871 час/год и фактического ресурса 6000 часов:

$$k = 871 / 6000 = 0,145.$$

Годовая экономия при заданных условиях от использования метода комбинированной ультразвуковой обработки горелочных устройств, составит:

$$\mathcal{E} = (D_1 - D_2) \cdot k \cdot A_2,$$

где: D_1 - стоимость нового комплекта горелочных устройств, тыс. руб.;

D_2 – стоимость восстановления комплекта горелочных устройств, тыс. руб.

$$\mathcal{E} = (1144 - 17,8) \cdot 0,145 \cdot 47 = 7645,05 \text{ тыс. руб.}$$

Экономический эффект, приходящийся на один комплект горелочных устройств составляет 162,66 тыс. руб.

Расчет отчислений по амортизации основных производственных фондов:

$$A = 5000,0 \cdot 0,100 = 500,0 \text{ тыс. руб.}$$

Расчет налога на имущество:

В соответствии со статьей 381 Налогового кодекса Российской Федерации организации освобождаются от налога на имущества в отношении магистральных трубопроводов, а также сооружений, являющихся их неотъемлемой технологической частью. Перечень имущества, относящегося к указанным объектам, утверждается Правительством Российской Федерации.

Расчет налога на прибыль:

Расчет налога на прибыль для первого года расчетного периода:

$$C = (\Xi - Z_1 - A) \cdot 0.2 = (7645,05 - 2,58 - 500,0) \cdot 0.2 = 1270,9 \text{ тыс. руб.}$$

где Z_1 – затраты на проведение ультразвуковой обработки комплекта горелочных устройств с учетом фактической наработки приходящиеся на один год эксплуатации

$$Z_1 = 17,8 \cdot k = 17,8 \cdot 0.145 = 2,58 \text{ тыс. руб.}$$

Коэффициенты дисконтирования:

Коэффициенты дисконтирования рассчитываются для каждого года с округлением до второго знака после запятой до момента получения прибыли:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 1/(1+0,10) \approx 0,90, \alpha_2 = 1/(1+0,10)^2 \approx 0,83, \alpha_3 = 1/(1+0,10)^3 \approx 0,75, \alpha_4 = \\ &1/(1+0,10)^4 \approx 0,68, \alpha_5 = 1/(1+0,10)^5 \approx 0,62, \alpha_6 = 1/(1+0,10)^6 \approx 0,56, \\ \alpha_7 &= 1/(1+0,10)^7 \approx 0,51, \alpha_8 = 1/(1+0,10)^8 \approx 0,47, \alpha_9 = 1/(1+0,10)^9 \approx 0,42, \\ \alpha_{10} &= 1/(1+0,10)^{10} \approx 0,39 \end{aligned}$$

Расчет чистого дисконтированного дохода (ЧДД) производим до момента наступления прибыли:

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} \approx & (-5000 \cdot 1,00) + (7645,05 \cdot 0,90) + (7,645,05 \cdot 0,83) + (7645,05 \cdot 0,75) + \\ & (7645,05 \cdot 0,68) + (7,645,05 \cdot 0,62) + (7645,05 \cdot 0,56) + (7645,05 \cdot 0,51) + (7645,05 \cdot 0,47) + \\ & (7645,05 \cdot 0,42) + (7645,05 \cdot 0,39) \approx 42048,02 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

В результате расчета получены следующие показатели эффективности:

- интегральный доход за весь проект – 22683,8 тыс. руб.;
- индекс эффективности 5,5;
- внутренняя норма доходности 82%
- срок окупаемости 3 года, включая затраты на НИОКР и прочие расходы.

5.4 Выводы

1. На основе выполненных исследований разработано техническое задание, по которому спроектирована и изготовлена установка комбинированной ультразвуковой обработки горелочных устройств, реализующая обоснованный в работе новый способ ультразвукового удаления поверхностного оксидного слоя. Особенностью установки является цикл процесса обработки, сочетающий

локальное вибрационное воздействие на загрязненные зоны изделия с внешним кавитационным действием и прокачкой технологической жидкости через каналы, полости и отверстия. Установка работает в полуавтоматическом цикле по расходу прокачиваемой жидкости в сравнении с эталонными показателями, отличается ультразвуковой ванной с многопакетным преобразователем, имеющим единый волновод (активную накладку) с внутренними и внешними ступенями, установленной в шумоизолирующем шкафу.

2. Производственные испытания технологии и установки на одном из предприятий ООО «Газпром трансгаз Саратов» подтвердили эффективность обоснованного в работе способа обработки. Использование способа обеспечивает гарантированное обеспечение 97% пропускной способности от эталонной, что дает возможность повторного использования горелочных устройств с вхождением газоперекачивающего агрегата в номинальный диапазон параметров.

3. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения технологии и установки комбинированной ультразвуковой обработки составляет 162,66 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения исследований по теме диссертации решена актуальная научно-практическая задача разработки ультразвуковой технологии и оборудования повышения пропускной способности горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам, имеющая важное значение для повышения эффективности магистральной транспортировки природного газа и импортозамещения в сфере эксплуатации компрессорных станций. При этом получены следующие новые результаты.

1. Обоснованы новая схема и технология ультразвуковой обработки полостей, каналов и отверстий, скрытых в корпусе изделия, заключающиеся в сообщении последнему колебаний на частоте, формирующей пучности деформаций в зонах наибольшей концентрации оксидных поверхностных слоев, при одновременном объемном воздействии ультразвуковой кавитации и прокачки технологической жидкости и обеспечивающие повышение производительности разрушения оксидного поверхностного слоя и удаления его частиц из «скрытых» зон до 10 раз по сравнению с объемной кавитацией.

2. Получены теоретические зависимости, позволяющие определить амплитуду колебаний ультразвукового преобразователя, обеспечивающую изгибные напряжения в конструкции изделия, превышающие адгезионную прочность оксидного слоя и обеспечивающие его эффективное отделение от нижележащего материала. Обоснованы технологические режимы ультразвуковой комбинированной обработки горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам: частота ультразвука 21,0 – 21,5 кГц при выходном токе генератора 1,0-1,2 мА, расход технологической жидкости 1,4-1,5 м³/ч, температура жидкости 40-55⁰С, усилие прижатия изделия к торцу активной накладки ультразвукового преобразователя 80-120 Н, позволившие обеспечить пропускную способность изделий на 97-98% от эталонной.

3. Выполнено компьютерное моделирование форм собственных колебаний сборных тонкостенных конструкций сложной формы типа горелочных

устройств и полей внутренних напряжений и деформаций, позволившее определить рациональную частоту вынуждающей силы, генерирующей распределение пучностей волновых деформаций, приводящих к трещинообразованию и отслоению оксидного слоя, в рабочей зоне. Для выбранного объекта диапазон частот составил 21,0 кГц.

4. Экспериментально путем макетирования обоснованы технические требования, по которым разработан и изготовлен опытный образец установки комбинированной ультразвуковой обработки горелочных устройств с автоматизацией цикла по контролю изменения расхода технологической жидкости через каналы при помощи ультразвуковых расходомеров повышенной точности.

5. Исследована кинетика изменения пропускной способности горелочных устройств при различных схемах обработки и доказана эффективность предложенной схемы с контактным воздействием на определенные зоны изделия. На основе сравнения уровня вибраций активной накладки, нагруженной очищаемым изделием, и интенсивности акустического шума с результатами изменения пропускной способности горелочного устройства установлен факт повышенной по сравнению с ультразвуковой очисткой эффективности данной схемы очистки при работе колебательной системы в некавитационном режиме.

6. В результате производственных испытаний и внедрения технологии и установки в РММ Петровского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Саратов» достигнуто изменение расхода жидкости через горелочные устройства от уровня с 0,75 до 1,25 м³/ч, до уровня с 1,22 до 1,47 м³/ч, что позволило довести частоту вращения турбины агрегата до 5050 об/мин при номинале 5000-5200 об/мин, т.е. войти в требуемый диапазон, и восстановить экологические показатели сгорания газозоудшной смеси до уровня эталонных изделий. Годовой экономический эффект из расчета на один комплект горелочных устройств составляет 162,7 тыс. руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.А. Новик, Н.П. Коломеец, С.В. Вешняков, В.А. Федорченко, Г.В. Генин. Ультразвуковая установка для обработки жидких сред / Патент на полезную модель РФ № 44540 с приоритетом от 05.11.04 // Бюллетень: Открытия. Изобретения. Пром. Образцы и товарные знаки. – 2005. - № 9.
2. А.Н. Орлов Введение в теорию дефектов в кристаллах: Учеб. пособие для вузов по спец. «Физика металлов». – М.: М.: Высш. шк., 1983. – 144 с.
3. Абрамов О.В. Ультразвуковая обработка материалов / под ред. О.В. Абрамова. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
4. Агранат, Б.А. Основы физики и техники ультразвука / Б.А. Агранат [и др.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
5. Адиков, С.Г. Исследование влияния тангенциальных ультразвуковых колебаний инструмента на эффективность процесса механической обработки древесины. 2007. 180 с.
6. Акуличев, В.А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях / В.А. Акуличев. – М.: Наука, 1978. – 220 с.
7. Акуличев, В.А. Пульсации кавитационных полостей // Мощные ультразвуковые поля / В.А. Акуличев; под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – Ч. 4. – С. 129 – 166.
8. Арзуманов, З.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях / З.С. Арзуманов. – М.: Энергия, 1978. – 303 с.
9. Бекренев, Н.В. Исследование ультразвукового развертывания глубоких отверстий малого диаметра в деталях из труднообрабатываемых материалов / Н.В. Бекренев, Б.М. Бржозовский, А.М. Сарсенгалиев и др. // Технология машиностроения. – 2014. – № 1 . – С. 12-15.
10. Бекренев Н.В. Обоснование метода повышения эффективности ультразвуковой обработки конструкционных материалов на основе установления корреляции амплитудно-частотных параметров процесса и

фрактальной размерности их структуры / Н.В. Бекренев, Протасова Н.В., Петровский А.П. // Вестник СГТУ. – 2009. – № 3 (41). – Вып. 2. – С. 23-27.

11. Бекренев Н.В. Оптимизация конструкций трансформаторов скорости ультразвукового оборудования на основе 3-D моделирования (постановка задачи) / Н.В. Бекренев, А.П. Петровский, Т.Ю. Чиндыкова // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. № 4 (49). – С. 77-83.

12. Бекренев Н.В. Ультразвуковые процессы и аппараты в биологии и медицине: учеб. пособие / Н.В. Бекренев, О.А. Дударева, А.В. Лясникова, С.В. Приходько. – Саратов: СГТУ, 2005. – 121 с.

13. Бергман Л., Ультразвук и его применение в науке и технике, пер. с нем. / Л. Бергман. – 2-е изд. – М., 1957. – 187 с.

14. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов / М.Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1977. – 431 с.

15. Бржозовский Б.М. Физические основы, технологические процессы и оборудование ультразвуковой обработки материалов: учеб. пособие / Бржозовский Б.М., Бекренев Н.В., Захаров О.В., Трофимов Д.В. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. – 208 с.

16. Бржозовский Б.М., Бекренев Н.В. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении. – С.: СГТУ, 2009. 348 с.

17. Бронин Ф.А. Удаление заусенцев и диспергирование порошковых материалов при воздействии ультразвука / Ф.А. Бронин, А.П. Чернов. – М.: Машиностроение, 1978. – 55 с.

18. Буйвол В.Н. Тонкие каверны в течениях с возмущениями / В.Н. Буйвол. – Киев: Наукова думка, 1980. – 296 с.

19. В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин., Р.В. Барсуков., С.Н. Цыганок., А.В. Шалунов. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. – Бийск: Изд-во Алт. Гос.техн. ун-та, 2010. – 203 с.

20. Варламов Г.Б. Улучшение характеристик камеры сгорания ГТД за счет использования трубчатой технологии сжигания газа / Г.Б. Варламов // НТУ Украины «Киевский политехнический институт»: Газотурбинные технологии, № 3, 2012. – 48 с.

21. Влияние направления ультразвуковых колебаний на геометрические параметры процесса микрорезания / Бекренев Н.В., Марков А.И. // Интенсификация технологических процессов в ультразвуковом поле. – М.: Металлургия, 1985. – С. 119-125 с.

22. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс доводки отверстий малого диаметра алмазным прокатом // Опыт применения ультразвуковой техники и технологии в машиностроении (Сб. Всесоюз. науч.-техн. совещ.) / Бекренев Н.В., М.: НТО Машпром. 1985. С. 67-69

23. Водопьянов, В. И. Курс сопротивления материалов с примерами и задачами: учеб. пособие / В. И. Водопьянов, А. Н. Савкин, О. В. Кондратьев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – 136 с.

24. Гершгал Д.А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д.А. Гершгал, В.М. Фридман. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.

25. Горбунов А.А. Способ механической обработки деталей / А.А. Горбунов, А.И. Марков, С.И. Петров, Е.П. Калинин, В.М. Салтанов, В.М. Фирсов, В.Г. Моисеев // Авторское свидетельство № 878503. 1981.

26. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов в среде APM Structure 3D. – М.: Издательство АПМ. 2010. 376 с.

27. Илюшин А.Ф. О необходимости подготовки попутного нефтяного газа для конверсионных авиационных двигателей / А.Ф. Илюшин. ОАО «Томскнефть»: газотурбинные технологии. – 2012. – № 3. – 48 с.

28. Интенсификация технологических процессов в ультразвуковом поле.- М.: Металлургия, 1985. – 250 с.

29. Ионов В.Н. Динамика разрушения деформируемого тела / В.Н. Ионов, В.В. Селиванов. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с

30. Исследования по развитой кавитации: сб. науч. тр. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1976. – 144 с.
31. Кардашев, Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г.А. Кардашев. – М.: Химия, 1990. – 208 с.
32. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – 9-е изд. – М.: Химия, 1973. – 750 с.
33. Келлер О.К. Ультразвуковая очистка / О.К. Келлер, Г.С. Кротыш, Г.Д. Лубяницкий. – Л.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
34. Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: учеб. пособие / Е.С. Киселев. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.
35. Киселев Е.С. Интенсификация технологических операций механической обработки заготовок на основе новых способов использования энергии ультразвуковых колебаний / Е.С. Киселев // «Вопросы технологии машиностроения: сб. материалов / под ред. Академика РАН К.С. Колесникова. – 29-30 сентября 2003 г. – Ульяновск: УлГТУ, 2003 – С. 20 – 27.
36. Кнэпп З.Т. Кавитация / З.Т. Кнэпп, Дж.У. Дейли, Ф.Г. Хэммитт. – М.: Мир, 1974. – 668 с.
37. Козырев С.П. Генезис кавитационного изнашивания / С.П. Козырев // Трение и износ. – 1985. – № 5. – С. 793-808.
38. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации / С.П. Козырев. – М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
39. Красильников В.А. Введение в физическую акустику / В.А. Красильников, В.В. Крылов. – М., 1984. – 160 с.
40. Левковский Ю.Л. Структура кавитационных течений / Ю.Л. Левковский. – Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.
41. Лясникова А.В. Бесконтактная ультразвуковая обработка биоактивных плазменных покрытий / А.В. Лясникова, Н.В. Бекренев, Н.В. Протасова, Д.В. Трофимов // Материалы и упрочняющие технологии: сб. материалов 10-й юбилейной Российской науч.-техн. конф. с междунар.

участием, посвященной 40-летию образования Курского государственного технического университета, 15-17 декабря 2003 г. Ч. 1. – Курск: КурскГТУ, 2003. – С. 20-25.

42. Лясникова А.В. Кавитационная ультразвуковая обработка высокопористых плазмонапыленных покрытий / А.В. Лясникова, Н.В. Бекренев // Современные наноматериалы и технологии их обработки: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Жуковский, 19 августа 2009 г. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – С. 33-38.

43. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция / М.А. Маргулис. – М.: Химия, 1986. – 288 с.

44. Маргулис М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): учеб. пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов / М.А. Маргулис. – М.: Высш. шк., 1984. – 272 с.

45. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 250 с.

46. Меркулов Л. Г. Теория и расчет составных концентраторов / Л. Г. Меркулов, А. В. Харитонов // Акустический журнал. – 1959.

47. Немчин А.Ф. Новые технологические эффекты тепломассопереноса при использовании кавитации / А.Ф. Немчин // Пром. теплотехника. – 1997. – Т. 19, № 6. – С. 39-47.

48. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химикотехнологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / Б.Г. Новицкий. – М.: Химия, 1983. – 192 с.

49. Основы физики и техники ультразвука: учеб. пособие для вузов / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

50. Пат. 2368435 Установка ультразвуковой очистки деталей / Леденев Н.М., Левадный А.И., Анохин С.М.

51. Пат. 2375127 Устройство для ультразвуковой очистки малогабаритных изделий от технологических и эксплуатационных загрязнений / Шестаков С.Д.

52. Пат. 2378058 Способ ультразвуковой очистки изделий / Приходько В.М., Макаров Л.О., Фатюхин Д.С.

53. Перевертун А.И. Электроэрозионное легирование с наложением ультразвуковых колебаний / А.И. Перевертун, А.А. Бугаев, В.А. Скороход // Опыт применения ультразвуковой техники и технологии в машиностроении: тез. докл. —. - М., 1985. - С. 141-142.

54. Перник А.Д. Проблемы кавитации. — Л.: Судостроение, 1966. — 439 с.

55. Пирсол И. Кавитация. — М.: Мир, 1975. — 95 с.

56. Попилов Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: справочник / Д.Я. Попилов. — М.: Машиностроение, 1982.

57. Применение ультразвука в промышленности. Под редакцией Маркова А.И., М., «Машиностроение», София «Техника», 1976 г.

58. Приходько В.М. Физические основы ультразвуковой технологии при ремонте автотракторной техники. - М.: «Брандес», 1996. - 127 С.

59. Радж Балдаев Применения ультразвука. [Текст] / Р. Балдаев, В. Раджендран . — М.: Издательство Техносфера, Паланичами, 2006. — 576 с.

60. Рождественский В.В. Кавитация. — Л.: Судостроение, 1977. — 248 с.

61. Розенберг Д. Физика и техника мощного ультразвука. Том 3. Физические основы ультразвуковой технологии. 2012-689.

62. Розенберг Л.Д. Кавитационная область // Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л.Д. Розенберга. — М.: Наука, 1968. — Ч. 6. — С. 221-266.

63. Розенберг Л.Д. Источники мощного ультразвука [Текст] / под ред. Л.Д. Розенберга. — М.: Наука, 1969. — 380 с.

64. С.П. Кундас, В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский, А.П. Достанко. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. — 2002. — 404 с.

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

66. Сарсенгалиев А.М. Обоснование контактного метода ультразвуковой очистки труднодоступных внутренних полостей и каналов в изделиях транспортного и энергетического машиностроения / А.М. Сарсенгалиев, И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // Вопросы электротехнологии. – 2017. – № 1 (15). – С. 48-53.

67. Сарсенгалиев А.М. Исследование ультразвуковой очистки внутренних полостей и каналов в изделиях транспортного и энергетического машиностроения контактным методом / А.М. Сарсенгалиев, И.В. Злобина, В.Ю. Карачаровский, Н.В. Бекренев // Вопросы электротехнологии, . – 2016. – № 1 (10). – С. 35-42.

68. Сарсенгалиев А.М. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов в процессе ультразвуковой контактной очистки / А.М. Сарсенгалиев, И.В. Злобина, М.В. Аврамов, В.Ю. Карачаровский, Н.В. Бекренев // Информационно-коммуникационные технологии в науке, производстве, образовании (ICIT-2016): сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф. / СГТУ им. Гагарина Ю.А. – Воронеж: ООО Издательство «Научная книга», 2016.

69. Сарсенгалиев А.М. Новая ультразвуковая технология восстановления работоспособности горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов / А.М. Сарсенгалиев, Н.В. Бекренев, М.В. Аврамов и др. // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 2. – С. 39-43.

70. 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 / А.М. Сарсенгалиев, Н.В. Бекренев //

Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2013. – № 13-1 (59). – С. 89-92.

71. Сарсенгалиев А.М. Способ ультразвуковой обработки и установка для его осуществления / Чернощекоев Л.Н., Пахтусов С.В., Ковалев А.П., Выдыш С.Л., Аврамов М.В., Бекренев Н.В., Злобина И.В., Карачаровский В.Ю., Сарсенгалиев А.М. // патент RU № 2625465, опубл. 14.07.2017 г.

72. Сарсенгалиев А.М. Технология и установка ультразвуковой очистки горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам / А.М. Сарсенгалиев, Н.В. Бекренев, И.В. Злобина и др. // Восьмой Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций, 19-20 сент. 2013 г. – С. 242-244.

73. Сарсенгалиев А.М. Устройство для ультразвуковой обработки / Бекренев Н.В., Бржозовский Б.М., Фирсов В.М., Сарсенгалиев А.М. // патент RU № 2548344, опубл. 20.04.2015 г.

74. Свиридов А.П. Ультразвуковая обработка радиотехнических деталей / А.П. Свиридов, В.А. Волосатов. – Л.: Энергия, 1969. – 120 с.

75. Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации / М.Г. Сиротюк // Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – Ч. 5. – С. 168 – 220.

76. Терентьев А.Г. Математические вопросы кавитации: учеб. пособие / А.Г. Терентьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 1981. – 132 с.

77. Теумин, И.И. Ультразвуковые колебательные системы / И.И. Теумин. – М.: Машгиз, 1959. – 331 с.

78. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И.П. Голяминой. – М.: Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с.

79. Ультразвуковая обработка материалов / Вероман В.Ю., Аренков А.Б. – Л.: Машиностроение, 1971.

80. Ультразвуковое оборудование [Электронный ресурс]. – ПКФ ООО «Сапфир». – Режим доступа: <http://www.sapphire.ru/>.

81. Ультразвуковой ингалятор: пат. 2070062 Российская Федерация: МПК6 А61М15/02, А61М11/00 / Хмелев В.Н., Гавинский Ю.В., Котов Б.С.;

заявитель и патентообладатель Котов Борис Степанович; Хмелев Владимир Николаевич; Гавинский Юрий Витальевич. – № 93021377/14; заявл. 20.04.93; опубл. 10.12.96, Бюл. № 15. – 4 с.

82. Ультразвуковые преобразователи / под ред. Е. Кикучи; пер. с англ. И.П. Голяминой. – М.: Мир, 1972.

83. Федоткин И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности / И.М. Федоткин, И.С. Гулый. – Ч. 1. – Киев: Полиграфкнига, 1997. – 838 с.

84. Федоткин И.М. Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. – Киев: Вища шк., 1984. – 68 с.

85. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. – М., 1970.

86. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // Физическая акустика / под ред. У. Мезона. – М.: Мир, 1967. – Т. 1. Ч. Б. – С. 7-138.

87. Хмелев В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев, О.В. Попова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1997 – 160 с.

88. Хмелев В.Н. Ультразвуковая размерная обработка материалов: монография / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: изд. АлтГТУ, 1997. – 120 с.

89. Хмелев В.Н. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных жидких сред / Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Голых Р.Н., Барсуков Р.В. // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3.

90. Хмелев В. Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности / В. Н. Хмелев [и др.]. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 416 с.

91. Хмелев В.Н. Способ управления работой ультразвукового технологического аппарата для оптимизации ультразвукового воздействия /

В.Н. Хмелев, И.И. Савин, Р.В. Барсуков // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технологическая системотехника. – Тула, 2006. – Вып. 6. – С. 12–18.

92. Хмелев В.Н. Ультразвуковое распыление жидкостей: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 250 с.

93. Хмелев В.Н. Управление работой электронного генератора при ультразвуковом воздействии на кавитирующие технологические среды [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, А.В. Шалунов // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технологическая системотехника. – 2004. – Вып. 2. – С. 32-40.

94. Хорбенко Н. Г. Ультразвук в машиностроении / Н. Г. Хорбенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

95. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука: учеб. пособие / В.А. Шутилов. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280 с.

96. Эчнадиосянц О.К. Получение аэрозолей / О.К. Эчнадиосянц // Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – С. 337-395.

97. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учеб. пособие: в 2 т. / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова, Ф.В. Седыкин и др. – М.: Машиностроение, 1983. – Т. 1. – 247 с.

98. Энциклопедический словарь по техносфере / сост. В.В. Перинский, В.К. Шухостанов, В.Н. Лясников, А.В. Глухов. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. – 87 с.

99. Active ULTRASONICS [Электронный ресурс]. – Innovative & Unique Ultrasonic Solutions. – Режим доступа: <http://activeultrasonics.com/>.

100. Bekrenev N. Ultrasonic Diamond – Borason Cutting Force Computation / N. Bekrenev, A. Markov // Aerospace MAI Journal. – 1996. – V. 3.

101. <http://www.wiegand.ru/info/articles/45932/>

102. Khmelev V.N. Adaptive Phase Lock System of Ultrasonic Electronic Generators / V.N. Khmelev [et al.] // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: Workshop Proceedings / NSTU. – Novosibirsk, 2006. – P. 229-231.

103. Khmelev V.N. System of Phase–Locked–Loop Frequency Control of Ultrasonic Generators / V.N. Khmelev [et al.] // Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2001: Workshop Proceedings / NSTU. – Novosibirsk, 2001. – P. 56-57.

104. Koon N., Schinder A., Carter F. // Phys. Lett. A. – 1971. – Vol. 37. – P. 413.

105. Kops L. Исследование ультразвуковой обработки / L. Kops // Metalworking Production. – 1961. – Т. 105. – № 6. – P. 51-57.

106. F. John Fuchs, William L. Puskas Application of Multiple Frequency Ultrasonics // Blakstoneney Ultrasonics-2005.

107. Nejedly P. Ultraschall beim galvanischen Abscheiden / P. Nejedly, Ja. Neumann, Ja. Vitek // Metalloberflache. – 1991. 45 (7). – S. 283-286.

108. Neppiras E.A. Acoustic cavitation / E.A. Neppiras // Phys. Repts. – 1980. – V. 61. – № 3. – P. 159-251.

109. Sarsengaliev Ay.M. Relaxation Residual Stresses by the Ultrasonic Vibrations / Lev A.V., Savran S.A., Smirnov O.O., Vereshchagin P.N., Sarsengaliev Ay.M. // SWorld Journal. – 2016. – Т. 10. – № 116 (10).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер – первый
заместитель генерального директора
ООО «Газпром трансгаз Саратов»

С.В. Пахтусов
« 30 » // 2015 год

АКТ ПРИЕМОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

опытного образца установки комбинированной
ультразвуковой очистки горелочных устройств

г. Саратов

«02» ноября 2015 года

Приемочная комиссия, назначенная приказом ООО «Газпром трансгаз Саратов» от 17.09.2015 № 553 в составе:

председателя:

– Пахтусов Сергей Викторович, главный инженер – первый заместитель генерального директора ООО «Газпром трансгаз Саратов».

членов:

- Евдакимов Иван Иванович, начальник производственного отдела по эксплуатации компрессорных станций ООО «Газпром трансгаз Саратов»;
- Ковалев Александр Петрович, начальник технического отдела ООО «Газпром трансгаз Саратов»;
- Михеев Александр Николаевич, начальник Петровского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Саратов»;
- Аврамов Максим Валерьевич, ведущий инженер производственного отдела по эксплуатации компрессорных станций ООО «Газпром трансгаз Саратов»;
- Бекренев Николай Валерьевич, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Федерального бюджетного образовательного учреждения «Саратовский государственный технический университет» им. Гагарина Ю.А.

провела приемочные испытания опытного образца установки ультразвуковой очистки горелочных устройств в соответствии с программой и методикой

УТВЕРЖДАЮ



АКТ

об использовании на предприятии результатов диссертационной работы аспиранта СГТУ имени Гагарина Ю.А. Сарсенгалиева А.М. «Повышение эффективности очистки от загрязнений сложноконтурных полостей и каналов в деталях машиностроения путем ультразвуковой кавитации и контактного местного вибровоздействия»

Мы, нижеподписавшиеся: главный конструктор ООО «Тесар-Экогаль» ОАО «НИТИ-Тесар» Ю.П. Бредихин, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» СГТУ имени Гагарина Ю.А. Н.В. Бекренев, аспирант А.М. Сарсенгалиев составили настоящий акт в том, что в ОАО «НИТИ-Тесар» при проектировании опытного образца автоматизированной установки комбинированной ультразвуковой очистки «Резонанс» (ХД № 568 15ед 223 от 27.03.2015 г.) использованы следующие результаты диссертационной работы «Повышение эффективности очистки от загрязнений сложноконтурных полостей и каналов в деталях машиностроения путем ультразвуковой кавитации и контактного местного вибровоздействия»:

- новая технологическая схема комбинированной ультразвуковой очистки внутренних полостей, каналов и отверстий малого диаметра, заключающаяся в сообщении ультразвуковых колебаний непосредственно очищаемым конструктивным элементам изделия совместно с общей кавитационной очисткой с одновременной прокачкой через отверстия моющей жидкости;

- технологические режимы комбинированной ультразвуковой очистки: частота ультразвука 21,0 – 21,5 кГц при выходном токе генератора (1,0-1,2) А, расход моющей жидкости 1,4-1,5 м³/ч, температура моющей жидкости (40-55)°С.

При внедрении опытного образца в РММ Петровского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Саратов» на операции очистки отверстий и каналов в периферийных и центральных горелочных устройствах газоперекачивающих агрегатов ГТ-750-6 после эксплуатации с наработкой более 6000 часов обеспечено восстановление пропускной способности на 97-98%, что гарантирует возможность их повторного использования и снижает затраты ООО «Газпром трансгаз Саратов» на приобретение новых комплектов горелочных устройств.

От ОАО «НИТИ-Тесар»

Главный конструктор
ООО «Тесар-Экогаль»

Бредихин Ю.П.

От СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Зав. кафедрой «Техническая механика и
детали машин», д.т.н., профессор

Бекренев Н.В.

Ответственный за внедрение, аспирант

Сарсенгалиев А.М.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2548344

УСТРОЙСТВО ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А." (СГТУ имени Гагарина Ю.А.) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013129516

Приоритет изобретения 27 июня 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 19 марта 2015 г.

Срок действия патента истекает 27 июня 2033 г.



*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий

ОКОНЧАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Автор(ы): *Бекренев Николай Валерьевич (RU), Бржозовский
Борис Максович (RU), Фирсов Владимир Михайлович (RU),
Петровский Алексей Петрович (RU), Сарсенгалиев Айдос
Миргенгалиевич (RU)*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ **2625465**

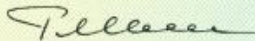
Способ ультразвуковой обработки и установка для его осуществления

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью "Газпром трансгаз Саратов" (RU)*

Авторы: *Чернощеков Леонид Николаевич (RU), Пахтусов Сергей Викторович (RU), Ковалев Александр Петрович (RU), Выдыш Сергей Леонидович (RU), Аврамов Максим Валерьевич (RU), Бекренев Валерий Николаевич (RU), Злобина Ирина Владимировна (RU), Карачаровский Владимир Юрьевич (RU), Сарсенгалиев Айдос Миргенгалиевич (RU)*

Заявка № **2016107668**
Приоритет изобретения **02 марта 2016 г.**
Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **14 июля 2017 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **02 марта 2036 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



«~~1~~» марта 2015 г.

1. Предмет договора

(CONTINUED FROM PREVIOUS PAGE)

1.2. Исполнитель вправе привлекать к исполнению настоящего Договора соисполнителей только с согласия Заказчика. В случае привлечения соисполнителей Исполнитель обязуется включить в договоры между Исполнителем и соисполнителями условия, содержащиеся в разделе 6 настоящего Договора.

2.1. За оказанные услуги Заказчик перечисляет Исполнителю сумму в размере 1 770 000 (Один миллион семьсот семьдесят тысяч) руб., в том числе НДС 270 000 руб.

(сумма чисел) разн. и протн.сво)

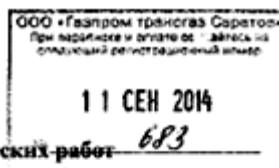
2.2. Оплата принятых Заказчиком работ (этапов) осуществляется не позднее 10 банковских дней с момента подписания Сторонами акта приемки-сдачи услуг по этапам, при наличии выставленного Исполнителем счета-фактуры.

3.1. Сроки и содержание основных этапов оказания услуг определяются календарным планом (Приложение № 1), являющимся неотъемлемой частью настоящего договора.

3.2. Срок выполнения работ по Договору с момента подписания по 30.09.2015 г.

3.3. Датой выполнения Исполнителем обязательств по Договору в целом и по отдельным этапам выполнения услуг считается дата подписания Сторонами акта сдачи-приемки выполненных услуг (этапов).

Договор № 370



на выполнение опытно-конструкторских и технологических работ

г. Саратов «19» августа 2014 г.

Общество с ограниченной ответственностью «Газпром трансгаз Саратов», именуемое в дальнейшем «Заказчик», в лице Сергея Викторовича Пахтусова, главного инженера – первого заместителя генерального директора, действующего на основании доверенности № 28-10/312 от 21.05.2014 г., с одной стороны, и Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», именуемое в дальнейшем «Исполнитель», в лице Александра Александровича Сытинки, первого проректора, действующего на основании доверенности № 01-02д от 31.12.2013 года, с другой стороны, именуемые в дальнейшем «Стороны», заключили настоящий договор (далее – Договор) о нижеследующем:

1. Предмет Договора

1.1. Заказчик поручает, а Исполнитель обязуется выполнить в соответствии с требованиями Технического задания на выполнение работ (Приложение 1) работу по теме: «Разработка метода комбинированной ультразвуковой очистки горелочных устройств».

Заказчик обязуется принять работу и оплатить ее.

1.2. Исполнитель выполняет работы, предусмотренные настоящим Договором, лично. Исполнитель вправе привлекать к исполнению настоящего Договора соисполнителей только с согласия Заказчика. В случае привлечения соисполнителей Исполнитель обязуется включать в договоры между Исполнителем и соисполнителями условия, содержащиеся в разделе 6 настоящего Договора.

1.3. Исполнитель обязуется безотлагательно информировать Заказчика об обстоятельствах, возникающих в ходе выполнения работ, которые могут отрицательно повлиять на сроки, качество и стоимость работ.

1.4. Исполнитель обязан в ходе выполнения работ по настоящему Договору согласовывать с Заказчиком необходимость использования результатов интеллектуальной деятельности, которым предоставляется правовая охрана, принадлежащих Заказчику, Исполнителю или третьим лицам, а также приобретение Заказчиком прав на использование таких результатов, принадлежащих Исполнителю или третьим лицам.

Такое согласование осуществляется путем письменного обращения к Заказчику до момента сдачи результатов работы (этапов) и должно содержать обоснование необходимости использования указанных в настоящем пункте результатов интеллектуальной деятельности и приобретения прав на их использование.

1.5. Если при выполнении работ по Договору обнаружится невозможность достижения запланированных результатов либо выявится нецелесообразность продолжения работ вследствие обстоятельств, не зависящих от Исполнителя, Исполнитель обязуется приостановить работу и незамедлительно уведомить об этом Заказчика. В этом случае Стороны обязаны в течение 10 (десяти) календарных дней рассмотреть вопрос о целесообразности продолжения работы полностью или частично. В случае прекращения

С. Пахтусов
ООО «Газпром трансгаз Саратов»



**VIII САРАТОВСКИЙ
САЛОН ИЗОБРЕТЕНИЙ,
ИННОВАЦИЙ И ИНВЕСТИЦИЙ**

ДИПЛОМ

II степени

Серебряная медаль

присуждается за проект
**Технология и установка
ультразвуковой очистки горелочных
устройств к газоперекачивающим
агрегатам**

Авторы проекта

Бекренев Н.В., Карачаровский В.Ю., Петровский А.П.
Злобина И.В., Сарсенгалиев А.М.
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»
Аврамов М.В., Выдыш С.Л., Потрясаев А.Ф.
ПОЭКС ОАО «Газпром трансгаз Саратов»

Министр
промышленности и энергетики
Саратовской области
С.М. ЛИСОВСКИЙ

Ректор
Саратовского государственного
аграрного университета
имени Н.И. Вавилова
Н.И. КУЗНЕЦОВ