

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения  
(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Повышение эффективности очистки литьевых прессформ для  
пластиковых и резино-технических изделий с помощью ультразвука

Студент

Путин И.А.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

к.т.н., доцент, В.А. Гуляев

руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 ГЛАВА. АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ СЛОЖНЫХ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	5
1.1 Проблема удаления технологических и эксплуатационных загрязнений с поверхностей деталей машиностроительных изделий...	5
1.2 Методы и технологии удаления загрязнений.....	8
1.3 Физическая сущность процесса ультразвуковой очистки.....	12
1.4. Известные схемы ультразвуковой очистки. Результаты научных исследований.....	18
1.5. Технические средства ультразвуковой очистки. Преимущества и недостатки.....	24
1.6. Предлагаемое техническое решение. Постановка задач исследований .....	34
1.7. Выводы.....	38
2 ГЛАВА. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА КОМБИНИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО УДАЛЕНИЯ ОКСИДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ПОЛОСТЕЙ И КАНАЛОВ.....	39
2.1 Модель разрушения оксидных слоев при местном контактном ультразвуковом воздействии.....	39
2.2 Определение рациональных частот колебаний горелочного устройства на основе компьютерного моделирования.....	45
2.3. Вывод.....	50
ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД.....	51
3.1 Постановка задачи моделирования.....	51
3.2 Описание программного обеспечения для моделирования.....	59
3.3 Результаты численного моделирования.....	62
3.4 Выводы.....	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	80
Список используемой литературы.....	82

## ВВЕДЕНИЕ

Современное транспортное и энергетическое машиностроение характеризуется применением в перспективных технологиях для снижения себестоимости продукта и повышения производительности. Актуальной проблемой является повышение экологичности действующего производства, улучшению условий труда, снижению себестоимости обслуживания инструмента, вследствие чего снижение себестоимости изделий. В целях экологической безвредности и ожидаемого попутного экономического эффекта в случае внедрения ультразвуковой ванны для очистки пресс-форм для пластиковых и резино-технических изделий решило бы множество проблем связанных со стандартами ISO TS 16949 и ISO 14001.

В каждой отрасли машиностроения, будь это топливные установки, моторостроения, обслуживания оснастки или очистка гидравлических систем оборудования успешно применяется практика очищения тонких оксидных слоев поверхностей, старт этому процессу дан в середине XX века. Хорошо себя зарекомендовал из-за успешных результатов технологии чистки методом ультразвуковой очистки в очищение тонких оксидных поверхностных слоев, который является более эффективным и дает в итоге более качественный результат чем традиционные технологии и методы. Метод заключается в создание благоприятной среды для явления кавитации. В свое время были изучены использования волн ультразвука на поверхности в жидких средах, учеными разработаны ряд теорий такими учеными как 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.. Разработаны теории по воздействию кавитации в различных температурных средах, разные плотности, интенсивность воздействия ультразвуковых волн. Разработана теория ультразвуковой кавитации при различных температурных условиях,

плотностях технологических сред, интенсивности ультразвука и его частоты. В данный момент времени есть уже рабочие варианты установок, с разным применением волноводов, мощности и объемов ванн. К сожалению наработки данных исследований достаточно только для обработки внешних поверхностей и открытых полостей. Плохо рассмотрены воздействия кавитации ультразвуковых волн на внутренние поверхности и трудно доступные места, слепые зоны и важные формовые размеры которые создают специальные параметры по формированию изделий. Отверстия малого диаметра мало изучены, а исследования не достаточны для принятий окончательных решений, по эффективной очистки оснастки. Альтернативные ультразвуковые методы очистки таких поверхностей изучены недостаточно. Также не рассмотрены вопросы сохранения целостности геометрии формовых размеров образующие специальные характеристики по безопасности изделия установленных международных стандартов автомобильной и авиационной промышленности, при воздействии на него мощного ультразвукового воздействия, интенсивностью, достаточной для поверхностной обработки «скрытых» каналов и не повредить части оборудования и инструмента отвечающих за функциональную работу. Изложенное позволяет считать тему данного диссертационного исследования актуальной.

Тема магистерской диссертации поддержана Кластером автомобильной промышленности Самарской области для развития новых технологических решений для дальнейшего развития промышленности в регионе и компанией ООО «Гумма Лайн» характеризующей на производстве РТИ и Тормозных шлангах для внедрения результатов данной работы в своей системе обслуживания оснастки и оборудования не только на территории Российской Федерации, но и на центральной площадке в Сербии (исх. Письмо # 1239 от 14.05.2020)

# 1 ГЛАВА. АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ СЛОЖНЫХ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

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

Загрязнениям — это отношение любого вещества имеющие свой химический состав, который отличается по своим химическим элементам от состава загрязняемой поверхности. При этом загрязнения можно разделить на две группы:

1) технологические, возникающие в процессе производства и сборки изделия и представляющие собой элементы отхода от резания, остатки технологических СОЖ, частицы протирочного материала, остатки доводочно-полировальных паст и т.п.;

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

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

К первой группе загрязнений, относятся приставшие частицы механических следов оксидов образовавшиеся на поверхности детали. Основное особенностью загрязнения можно считать, что оно образуется только на внешней поверхности деталей и не включаться в контракт со структурой детали. Загрязнения данной категории, образовавшиеся путем от взаимодействия м другими инструментами, абразивами, от контакта с масляными поверхностями, остатки после операции шлифования в виде крошки, следы от контакта с необезжиренными поверхностями (следы пальцев) и т.д.

Иная группа образуется путем взаимодействия с окружающей средой, от которой происходит реакция химических элементов, от взаимодействия материала с окружающей средой (ржавчина, коррозия, щелочная зернистость)

Загрязнения вызывает повышение уровня брака как на определённых технологических операциях, уменьшения срока эксплуатации, снижению надёжности и т.д

Чаще всего по составу и структуре получаются более сложные загрязнения образуются в химически активных средах при повышенных температурах, что образует сложные по составу, структуре и физико-механическим свойствам эксплуатационные соединения. Что самое интересное образование не в коем случае не имеет принадлежности поверхности, оно может быть как на внешней, так и внутренней части и литниковой системы оснастки, в формо-образующих размерах изделий, которые определяют конструктивные особенности изделия и их назначения.

Типовыми представителями изделий сложной формы, работающими в температурно напряженных условиях в многокомпонентных средах являются пресс-формы работающие в условиях высоких температур и давления, имеющие при этом контакт с различными материалами которые в свою очередь оставляют от себя различные виды загрязнений (сажа, нагар, линии движения материала, кристаллическую крошку от компонентов материалов, остатки каучуков и белесость от пластиковых гранул.

В стандартных комплектах пресс-форм для производства РТИ состоит из формообразующих элементов в то числе и со спец. характеристиками, блоки горячих и холодных каналов, теснения смыкания форм, направляющие плит. Литниковые системы являются собой весьма сложные в плане работоспособности форм системы, отвечающие за проливаемость изделий.

Диаметр каналов составляет в среднем от 4 до 6 мм, а точки инъекций до 0,5 мм в РТИ. Формообразующие элементы расположены на 2 плитах, где в углах образуется устойчивое загрязнение в виде нагара и нарост каучука. Блок отвода излишнего воздуха для обеспечения вывода из оснастки излишнего воздуха для проливаемости компонентов.

Из опыта эксплуатации пресс-форм, следует, что оснастка в некоторых случаях не выдерживает свой паспортный ресурс, в количестве циклов, качества продукции, на назначенный жизненный период инструмента. По итогам статистики прошлых лет наблюдается снижение производительности и времени цикла между профилактическими ремонтами, и частота отказов функциональных частей инструмента, что негативно сказывается на выполнении заданных норм и проценте загрузки оборудования, увеличенный процент брака.



Рисунок 1 Пресс-форма в рабочем состоянии.

Отмеченные нарушения проявляются за долго до выработки пресс-формы паспортных ресурсов.

Предположительно, причиной ухудшение работы пресс-форм является появление образований от материала в литниковых каналов, тиснений смыкания и тех. отхода воздушных отводов. Поскольку поступление материала происходит по технологии инъекции через литниковые системы форм, то загрязнение на прямую ведет к снижению скорости пробиваемости и высокому давлению впрыска из-за загрязнённых воздушных отводов, 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 материалом. Также возможно, но маловероятно, смешивание какой-то части сырья с другими материалами в основе которых находится другая база каучука.

Таким образом, очистив каналы и отверстия от загрязнений, возможно довести проходное сечение до исходного значения и, соответственно восстановить первоначальные расход сырья и скорость впрыска, а следовательно, и поступающий вследствие инъекции параметры работы станка обеспечат на выходе годную продукцию в заложенные временные циклы.

Решить вероятные проблемы можно путем очистки загрязненных частей оснастки и подобных изделий. Однако, для решения задачи осложняется труднодоступностью загрязненных участков и высокая трудоемкость, из-за сложной конструктивной особенности и конструктивной работоспособности и представляющими собой узкие кольцевые каналы или отверстия малого диаметра.

## **1.2 Методы и технологии удаления загрязнений**



Из-за поиска оптимальных решений проблем с загрязнениями технологической оснастки, есть опыт практических решений: химический, механический и электрофизическая.[15].

К *механическим методам* относятся чистка латуновыми стержнями, проволоками, продувка системы воздухом или водой с применениями абразивов, применениями вращающимися щетками из более мягких видов стали, шлифовка с применениями специализированных паст. Выше перечисленные решения не подходят по методике из-за малого размера отверстий, и высокой трудоемкости по обработки (щетками и притирками), и еще высокий риск из-за влияния физического воздействия инструмента на изделие, которые может повлиять на размеры каналов и изменения поверхности (царапины), которые могут повлиять на функциональные свойства оснастки.

К *химическим методам* относится использование химических элементов, которые разрушают загрязняемый слой и отделяет его от поверхности пресс-формы. Химический метод обычно состоит из пары этапов: травление и обезжиривание.

Под *обезжириванием* имеется ввиду устранение с поверхности изделия частей не связанных с материалом детали. При обезжиривании структура поверхности детали не нарушается. Данную операцию в обычных условиях проводят, либо в растворителях на органической основе, либо в составах на основе щелочных соединений. Из данных вариантов нельзя выделить како-то конкретный способ из-за того, что у каждого метода есть свои плюсы и минусы.

*Травление* – это способ, который уже взаимодействует с материалом изделия. При удалении загрязнения образуется шероховатая или гладкая поверхность структуры. При данном методе нарушается обрабатываемая поверхность материала детали, если после операции чистки образуется гладкая зеркальная поверхность, данная операция называется химическим полированием.

Травление и полирование производят в кислотных, щелочных растворах или ваннах с динамической жидкостью. Чтобы добиться быстрого и качественного процесса, необходимо сначала выполнить операцию полного обезжиривания изделия. В противном случае жировые пятна будут создавать помеху и сопротивление непосредственному течению жидкости с зоной контакта изделия.

Однако данные методы используются в своем профиле в основном для удаления жирных и других природных накоплений и наслоений, отсюда следует вывод, что данная методика мало эффективна в удаление твердых тел, образованных в основном в пресс-формах, работающие в условиях высоких температур. Из немаловажных факторов является это и стандарты по охране труда и экологические стандарты и требования ISO 14001, которые несут и дополнительные затраты на утилизацию отработанных жидкостей и обеспечения условий труда персонала.

Основными *электрофизическими методами* очистки являются обработка в вакууме среде с применением газоразрядной плазмы и метод ультразвуковой очистки в жидкости основе на основе воды и чистящих жидкостях. Использование газоразрядной плазмы характерно для изготовления изделий микроэлектроники и электровакуумных комплектующих для приборов электрики. Данный метод осуществляется в вакууме и дает эффективный результат удаление поверхностей всех типов толщиной, но не более десятки микронов. Очевидно, что в отверстиях образуется загрязнение гораздо большей толщины, и есть полное понимание, что данные загрязнения не повлияли бы на работоспособность пресс-форм, а именно на их протикаемость и расход сырья и отклонение в параметрах работы оборудования. К тому же применение вакуумного оборудования требует высокие стандарты подготовки производства, специальных площадей, квалификация персонала, и наличие больших накладных ресурсов в виде(воздуха, электроэнергии и вытяжки) и наличия больших свободных

площадей для вакуумных камер. Все это в сумме дает длинный цикл обработки и большое количество необходимых экономических потерь.

В отраслях авиации, таких как приборостроение и агрегатостроение, а так же в производстве топливных систем, и многих других производствах широкое применение получила технология ультразвуковой чистки, которая дает высокие показатели загрязнения средней и высокой степенью сложности, и высокой прочностью сцепки с поверхностью и не нарушая ее поверхности. Для очистки сложной поверхности, а именно литниковой системы используется игольчатые трубчатые излучатели с прокачкой жидкостей через канал. Такие виды оборудования получили широкое применение и разработки многих модификаций на ряде предприятий в 90-х годах XX века.

Но для применения подобной технологии потребуется решить ряд технических проблем, с применением трубчатых излучателей в большом количестве каналов, что сложность автоматизированного причине малой прочности взаимного расположения каналов в плитах пресс-форм и их трудозатраты.

Использование ручного труда, применяемого в авиационной промышленности, не имеет большого применения по причине высокой трудоемкости очистки большого количества отверстий. Необходимо анализировать специфические кинетические воздействия на очищающую жидкость, через малые и узкие отверстия излучателя, как мы и говорили ранее диаметр отверстия в системе равен 2мм.

Тем не менее анализ технической литературы [13] и опыт показывает, что технология ультразвуковой очистки, показал себя как со стороны универсальности и адаптации его процесса на разные классы изделий, так же как наиболее результативный и эффективный метод по очистки разных поверхностей деталей и компонентов машиностроительных

производств, а частных случаях таких как, топливные системы, системы гидравлики и моторостроение.

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

- метод очистки струями высокого давления, промывки, ополаскивание – 79%;
- обезжиривание при помощи бензина и растворителей – 68%;
- отпаривание в хлорсодержащих парах растворителей – 61%;
- вибрационная очистка – 56%;
- кипячение в воде – 45%;
- ручная очистка при помощи механического воздействия специальным инструментом – 10%;
- ультразвуковая очистка – менее 2%.

Собранные данные позволяют нам принять решение с учетом необходимым исследованием и конструкторские работы, имеющие тенденцию увеличения диаметра сечения отверстия и литниковой системы за счет удаления загрязнения поверхностного слоя.

### **1.3 Физическая сущность процесса ультразвуковой очистки**

Работа ультразвуковой чистки базируется на механическом действии волн ультразвука на оксидный поверхностный слой, находящийся на поверхности деталей.

Каждое тело колебания вынуждает двигаться в такт со своими движениями газовую, жидкую или любую другую среду, в которой находится тело. Упругие колебания среды, заключаются в том, что Воздушная среда или жидко-образная среда прилегающие к твердому телу, периодически сжимаются и разрываются. Каждый цикл состоит из одного сжатия и разжатая, имеет термин волна. За счет этой энергии, происходит

взаимодействие с другими слоями твердого тела, в результате производится большая площадь колебания.

При увеличении волн ультразвука в цикле волны колеблющегося тела в жидкостной среде происходит возникновение пузырьков, заполнение газами (парами) жидкостями и растворённым в нем воздухом и иными испарениями газа, а в следствие цикла волны сжатия тела – их захлопывания. Данное явление, формирования и взрыва пузырька воздуха в жидкости, сопровождаются гидроударами в месте пузыря называются кавитацией. Энергия, полученная от удара, передается жидкости, которая в свое время получает огромное ускорение. Чем выше ускорение жидкости, тем большая энергия образуется способная повлиять на разрушение, способная совершить работу. Данные силы образующие в периоде кавитации не только разрушает жировые следы, но и разрушают оксидные соединения [56] .

Полное удаление загрязнения с детали происходит, взрыв пузырьков происходит на максимальной близости к детали, либо на ее поверхности. В процессе кавитации происходит колебание пузырьков в свою очередь воздействует сильнее на частях поверхности детали, где есть нарушение структурного слоя оксидной пленки(трещины, раковины) при расклепывание пузырьков, они проникают по торец пленки загрязнения, что образует давление под пленкой и растягивает ее снаружи, и образуется дельта с большими значениями. Это позволяет нам заметить большое отслоение пленки загрязнения от поверхности очищения.

Из используемой всеми принятой технологии, есть два типа активности кавитации: стабильная и коллапсирующая (нестационарная) хочется заметить, что граница не всегда очевидна и прозрачна.

Базирующиеся без движения полости начинают под воздействие ультразвукового поля пульсировать. В течение времени крупного числа периодов размер пузырька в пределах равновесного значения. Возникновение акустических макропотоков и высоких напряжений сдвигов

связано на прямую с ровной цикличностью. Кавитация образуется в среде там, где замечается давление ниже основной среды, этот фактор на прямую влияет на образование локальных разрывов в размерах нескольких микрон. В акустических кавитациях, при распространении волн ультразвука, служат меняющиеся давление в местах разрыва жидкости.

При низких колебания ультразвуковой зоны (0,3 Вт/см<sup>2</sup>) формируется пузыри малого диаметра до 0,1 мм, собирающиеся в зонах спокойствия волн и сохраняют энергию некоторое время. Рассмотрим основные причины их появления, являются газа, которые колонизируют пузырьки. Под этим эффектом замечается изменение форм, объема прямо пропорционального с частотой изменения давления звука. При увеличение ультразвуковых волн, часть растворяющихся газовых элементов образуют собой большие пузыри воздуха, стремящиеся на поверхность, данное явление называется дегазация. Или процесс газовой или псевдокавитации. В дегазированной жидкости происходит процесс кавитация.[9]

При расклёпывание пузырей кавитации возникает повышение давления среды жидкости. Из-за того, что пузырьки образуются со скоростью до нескольких миллионов с секунду, формируется зона кавитации. В момент разрыва пузырьков образуется ударные волны, которые в свою очередь создают в прилегающих зонах давление в несколько раз превышающие изначальные показатели. Динамику квансионной области рассмотрим на уравнение Непайреса-Нолтинга.[2]:

$$2\rho R^2 \frac{d^2 R}{dt^2} + 3\rho R \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + 4\sigma = 2R \left[ \underbrace{P \sin(2\pi f)}_{\text{acoustic pressure}} - \underbrace{P_0}_{\text{ambient pressure}} + \underbrace{\left( P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right)}_{\text{Laplace pressure}} \frac{R_0^3}{R^3} \right] \quad (1)$$

где,  $R_0$  – начальный радиус пузырька в момент времени  $t=0$

$P$  – амплитуда давления звуковой волны

$f$  – частота колебаний

$P_0$  – гидростатическое давление

$\rho$  – плотность жидкости

$\sigma$  – поверхностное натяжение

$R$  – текущий радиус пузырька

Начальный радиус пузырька может быть определён по формуле Минаэрта-Смита [15]:

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

где,  $\chi$  – отношение теплоемкостей газа в пузырьке (для воды  $\chi=1,14$ ).

Обычно последним слагаемым в формуле (2) пренебрегают и она выглядит следующим образом [48] :

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

Согласно Рэлею, максимальное давление в жидкости на расстоянии  $1,587R$  от центра пузырька равно [48] :

$$P = P_0 + \frac{3\chi P_0^2 R_0^3}{4R} \quad (4)$$

Давление на поверхности кавитационной ударной волны может также определяться следующим образом

$$P^{\max} = \frac{P_0 \delta}{Z} \quad (5)$$

где,  $Z = R_{\min} / R_{\max}$  – безразмерный минимальный радиус пузырька

$\delta = P_n / P_0$  – параметр, характеризующий содержание воздуха в полости

$P_n = P_d + P_s$  – давление внутри пузырька при его максимальном радиусе

$P_d$  и  $P_s$  – парциальные давления насыщенного пара и воздуха

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

$$P = \sqrt{\left( \frac{R^3}{R_0^3} - 1 \right) \frac{2 P_n}{3\beta}} \quad (6)$$

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

Полное смыкание пузырька при данном гидростатическом давлении происходит за время: [93]

$$t = 0,915 R_0 \sqrt{\frac{\rho}{P_0}} \quad (7)$$



Из выражения (7) выявляется прогрессия, что увеличение частоты циклов волны приводит к уменьшению размеров пузырей из-за сокращения времени цикла расширения и взрыва. Количество полостей поддерживается в равновесии от показателя акустического давления процесса. Необходимо отметить, что при увеличении колебаний, увеличивается и порог кавитации.

При движении колебаний ультразвуковых волн в различных средах происходит потеря энергии, связанное внутренним трением.[44]. Так же необходимо учитывать, что при движении колебаний ультразвуковых волн излучателя поверхности, в технической области образуется распределенное в пространстве область давления. При этом в поверхности среды, формируемое стабильным излучением, существует порядка трех методов: дальнейе 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.

Ультразвуковая волна в доле расстояний, пропорциональных с длиной волны характерна дельтой минимума и максимума, базирующихся на разных расстояниях от объекта излучения. Количество интерференционных минимум и максимумов снижается в прямой последовательности от значения излучаемой поверхности. От это следует следующие, что если значение излучаемой поверхности становится меньше в 2 раза длины волны ультразвуковых колебаний, то поле приобретает однородную среду, и излучатель ведет себя как излучатель сферического порядка. [56,85]

Длина и рикошет ультразвуковой волны от изменчивой в пространстве и времени кавитационной области влечет за собой среднее значение акустического поля, интерференционная картина разглаживания и область получает диффузионный характер, мелкомасштабное значение.

#### 1.4 Известные схемы ультразвуковой очистки. Результаты научных исследований

В настоящее время распространены несколько схем ультразвуковой очистки [13,15], которые можно квалифицировать по следующим параметрам:

- по базирование в оборудование в ванне (донное, боковое, комбинированное);
- по расположению в системе излучателя и ванне (встроенные и погружные);
- по конструкции вспомогательных элементов волноводов к основному волноводу;
- по движению волн ультразвуковых колебаний 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.

В основном технология ультразвуковой чистки заключается в том, что изделие, которое необходимо очистить погружается в ванну в подвешенном состоянии (например, за кольцо и кран-балку) в области

максимального значения кавитации, при воздействии ультразвуковых волн, фиксированной чистоты. Данная технология хорошо изучена благодаря наработкам российских и европейских ученых [30]. Из базы прошлых многолетних испытаний с конструировано и разработано и производится множество количества установок для очистки, обзор проведем ниже.

Доказано, что результативность ультразвуковой чистки зависит от частоты колебаний волны ультразвука, его частота, температуры моющей жидкости и времени обработки [31]. Более высокий результат зависит от расположения деталей и меньших частот преобразования в пучке 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 800 кГц через 90 с в пучности колебаний остается 75% загрязнений, а в узле – 98%. В некоторых, случаях, когда качество поверхности имеет высокое требование по качеству поверхности, в таких случаях используют большие частоты колебаний, в связи с тем, что повреждение поверхности деталей может происходить на малых частотах кавитации.

Время операции очистки и обезжиривания имеет обратную пропорцию, при увеличение интенсивности волн, мы получаем меньшее время обработки. Отсюда получается рекомендация по интенсивности колебания в воде 1,5-2 Вт/см<sup>2</sup>, а в ограничительных растворах, имеющие более низкий порог кавитации 1 – 1,5 Вт/см<sup>2</sup>.

Использование высоких режимов интенсивности ультразвуковой волны несет не только высокие энергозатраты, и плохо тем, что на поверхности преобразователей образуется подушка квансионная, что несет снижение очистки и при увеличение расстояния от изделия. Самая оптимальная среда моющего раствора составляет по справочным источникам 55-70° С [22,23].

Некий эффект идеальной пропорции амплитудных характеристик частот ультразвуковой обработки, В связи последних разработок элементной базы ультразвуковой чистки, которая нам позволяет разрабатывать новые решения по системам управления и контроля, иные схемы ультразвуковых генераторов, которые не позволяло нам новые технические решения. Одним из факторов разработки новых методов является развитие приспособлений и элементов физических принципов, части которых изготовлены из твердых тел, обладающие высокой хрупкостью. Состоящие из материалов (кварц, ситалл, керамика), что потребовало иных решений процесса разделения в цикле, на предварительную и основную очистку, не нарушая требования поверхности. Иным фактором стало повышение требований к крупногабаритным деталям изделий топливной и моторостроительной отрасли, размеры которых не позволяет захватить все зоны обработки пучка волны, что проводило к неравномерному и не качественной чистки. 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 данные сложности, могут решения методом распределения поля пульсацией («качанием») частоты [16]. Функция *Sweep* позволяет постоянную переменную звуковых максимумов, что позволяет вовремя операции распределять поля по всей среде ванны. Данная функция реализуется установкой дополнительными преобразователями, расположенными на разных стенках ванны, а генератор управляет кавитацией поля. В этот момент образуется движущая волна, которая с постоянной цикличностью формирует в ванной усредненную по времени силу ультразвука, одинаковой на всей площади ванны. С применением данного эффекта мы нейтрализуем постоянную дельту между

максимальным и минимальным колебанием. В данном случае кавитация не будет нести пагубное влияние на детали при мойке, что делает мойку более качественной по качеству поверхности и бережной.

*Многочастотная технология* предусматривает использование двух волноводов колебаний в одной ванне. Более низкие частоты используются для удаления твердых и оксидных загрязнений. Более высокая частота лучше всего подходит для загрязнений, к качеству которых выдвигаются высокие классы стандартов требования и не допускается повреждение при очистке. Ультразвуковая очистка имеет более высокий эффект даже на малых углублениях и отверстиях

Не объемлемое преимущество данной технологии многочастотной очистки, заключается в том, что в ванной не образуются «слепых» зон в узлах интерференции. Поэтому ультразвуковые облучатели дает возможность расположить объект в любой зоне УЗ-ванны [48].

Фактор комбинирования одновременно частот ультразвуковых используемых, способствует поднять эффективность и качество очистки деталей с образованием поверхности компонента, и сократить сам процесс [57,58]. Алгоритм увеличения производительности связан с применением не однотипных частиц, простым языком использование в процессе кавитации двух различных размеров пузырей (малых, и больших), который в свое время образуют разные ударные выплески энергии и образование иной волны жидкости. Разработка разно частотной ультразвуковой техники началось в середине XX века. Данная необходимость появилась в связи с необходимостью снижения пагубного влияния стационарных волн формирующие от обычного процесса в больших емкостных ванн, направление большого диапазона размеров частиц, очищаемы УЗ, в явлениях очистки ультразвуком, и необходимостью увеличить интенсивность протекающих процессов. В

Иной метод, по предотвращение слепых зон при помощи генератора качающихся частиц. (рис. 2).

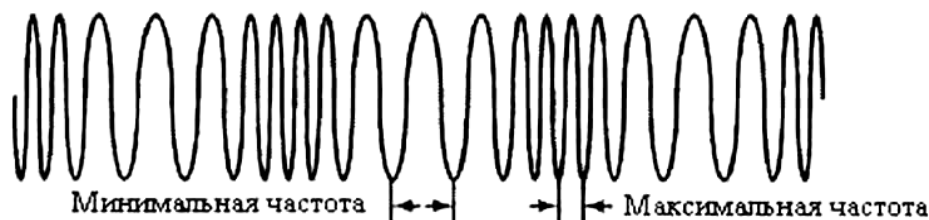


Рисунок 2. Режим с «качающейся» частотой

Основной минус данного метода — это низкий ПКД генератора, т.к узлы и пучки поля интерференционного движения на абсолютно разные зоны очищающей всю площадь, при этом не оставляя не обработанных зон.

Режим *Pulse* можно использовать, когда нужен мгновенный эффект за счет краткосрочного увеличения мощности ультразвуковых волн. В этом случае получается пиковая мощность, за счет быстрых частотных изменений, которые позволяют удалять застоявшиеся и вросшие в структуру изделия загрязнения, при этом не оказывая долговое воздействия на поверхность. если необходимо кратковременно увеличить ультразвуковую мощность.

В первые используемы жидкости для чистки изделий, обогащены еще не стравленным воздухом, что дает большей эффект за счет дегазационных свойств жидкости. За счет быстрой дегазации работают мойки в режиме *Degas* в свежеприготовленной жидкости для чистки оснастки. Приостановки процесса кавитации приводит к выбросу микропузырьки по поверхность. Кавитация как процесс получает максимальный результат очистки, только в дегазационных ваннах. Автоматизированная техника для воспроизводимости более предпочтительнее, т.к. КПД данных генераторов близок к максимальной производительности, что обеспечивает получить максимально энергоемкий процесс. (рис. 3). Применяя сигналы, прямоугольной формы, приходят к акустическому выбросу богатой смеси,

что описания вышесказанных режимов дает нам возможность получить легкий результат.

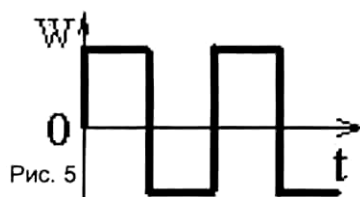


Рисунок 3. Импульсы цифрового генератора

В литературе [5,6,7,8] рассмотрены все виды режимов очистки методом многочастотной обработки, в различных средах, и, в частности, подбора оптимальных параметров очистки.

Из наиболее очевидных методов реализации многочастотного воздействия ультразвуковых волн, применяя различные ультразвуковые аппараты основного типа. Один аппарат состоит из своей автономной станции питания в виде электрогенератора, который питает две независимы колебательные системы.

Так же не исключается метод, когда работает одновременно две системы, работают единовременно, и все ультразвуковое оборудование работает одновременно. Основной минус данного ультразвукового оборудования — это не самый стабильный процесс кавитации, в сравнение с обычными одночастотным оборудованием, идентичной по техническому оснащению силовых систем, По вытекающим причинам дестабилизации волновой системы по причине разных частот. По мимо всего прочего, возникает дополнительные затраты на подготовку производства, т.к. каждую систему будет необходимо подключать к собственным источникам и оборудованию имеющие согласованные системы управления. Из-за этого высокая себестоимость процесса и долгий период окупаемости оборудования. Кроме того, практическая реализация обуславливает необходимость оборудовать каждую колебательную систему отдельным, согласованным с ней, генератором. Нельзя не заметить простату

конструкции, и высокую надежность установки. В процессе отказа одного из элемента установки, она не приведет к полной остановки системы, а лишь приведет к частичному снижению эффективности процесса.

Другой вариант является унифицированным и универсальным, который подразумевает собой универсальную конструкцию аппарата, и способна работать как от одного генератора или так же от двух независимых, и способна работать в определенной частотном диапазоне, что нам в итоге дает фиксированную частоту.

Из всех приведённых преимуществ приведенных выше, и воздействия УЗ волн и колебательное увеличения мощности для очистки сложных видов загрязнений, не дает возможности гарантировать результат, из-за потери ультразвуковых волн, и как следствие процесс очистки в сложных конструкционных полостях в частности литниковых системах пресс форм, м зонах отведения тех. отходом. И мы получим только результат на простых поверхностях, и не выполним основной поставленной задачи по конструктивным задачам.

### **1.5 Технические средства ультразвуковой очистки. Преимущества и недостатки**

Применение на сегодняшний день ультразвуковых технологий, получают большое применение данной технологии для очистки деталей различного уровня применения. Данный процесс протекает в моющих ваннах (преимущественно использую нержавеющие стали для конструкций ванн) в которые помещаются изделия, которые покрываются специализированными моющими растворами. А за генерацию жидкости и кавитацию на поверхности изделия отвечает специализированное оборудование, (излучатели) установленные обычно, либо на стенках, либо на дне моющих ванн. В данном исполнении отдельный блок состоит из моющей системы из насосов и нагревателей и акустическая система. Или блок погружаемых излучателей, в таких условиях очистка происходит в емкостях любого



объема. В медицине используют ванны для чистки медицинского оборудования, фрезы стоматологического оборудования, хирургические скальпели и прижимы, оптических приспособлений и инструментов оптики. Для удовлетворения потребности чистки достаточно небольших ванн малого объема емкостью до 35 литров в их основе лежат пьезокерамические преобразователи, генераторы мощностью до 900 Вт, автоматизированной системы нагрева очищающей жидкости. Из опыта данных установок они себя хорошо зарекомендовали со стороны Надежности и низкого уровня шума.

Имеющие более большой объем ванны от 50 литров и более оборудованы специализированными системами электро-нагрева или независимыми системами нагрева жидкости, независимая система охлаждения установки при помощи циркуляции рабочей жидкости. Магнитострикционные преобразователи, полупроводниковыми генераторами. Данные установки имеют большое применение уже на производствах машиностроения и авиастроения.

Рассмотрим ниже ультразвуковых ванн и проанализируем их характеристики.

*Установка ультразвуковая «Кристалл-15» с объемом ванны 15 л. для*

Подготовительной очистки медицинских инструментов в с применением моющих средств, имеющие в своем составе компоненты позволяющие провести стерилизацию медицинского инструмента, А также очистки инструмента от инородных биологических пленок и частиц, используются уже растворы направлены е на очистку и обезжиривание поверхностей инструмента в растворах на водной составляющей, приборостроения и агрегато-строения.

Рассмотрев основные характеристики выделяем основные такие как рабочую частоту 48 кГц, мощность ультразвуковой волны на выходе не менее 480Вт, емкость ванны 20 литров, что позволяет нам без препятственно разместить в ее объеме малые пресс-формы, но данный вид не позволяет нам

воспроизвести колебательные волны ультразвука во внутренних системах оснастки

*Погружной ультразвуковой модуль фирмы «Александра-плюс» для промывки крупногабаритных изделий* имеет применения для очистки крупных и габаритных изделий в ваннах в которых происходит очистка. Данная установка получила большое количество положительных кейсов в сфере нефти и газа добычи где образуется закоксованность систем и появления нагаров накипи оксидов, и другие загрязнения связанные из-за агрессивной среды применения инструмента. Средние габариты изделий 2х2х2 м. Данная установка имеет вид герметичной конструкции выполненной из нержавеющей стали, на дне ванны стоит система сварных углов, излучатели несут составную конструкцию в дне ванны. Дают результат большой интенсивности очистки в поле области ванны под излучателями на глубине пол метра. Из основных характеристик выделяем это работающая частота волн -25 кГц, и потребляемый объем электроэнергии оборудования в 10 кВт. Принцип действия установки заключается в движении излучателей на обрабатываемой поверхностью, на заданную высоту оператором. Для увеличения производительности и качества очистки используется подача жидкости в обрабатываемую зону, за счет подачи насоса моющей жидкости под давлением в зону ультразвукового воздействия. Для предотвращения поломки установки, а именно излучателей от соприкосновения с деталью или шланга подающего жидкость, установлено съемное ограждение. На основе защитного модуля смонтированы уши и рычаги для монтажа установки механизма перемещения, а также механизм изменения угла поворота модуля с фиксацией заморозки угла на стандартные 30 и 60 градусов. Данный модуль несет дополнительные потребления электроэнергии порядка еще 1 кВт.

Габаритные размеры излучателей не более 560×400 мм. Основным минус данной установки это невозможность обслуживания внутренних частей из-за их плоскостности и внутренних полостей.

*Комплект погружных ультразвуковых излучателей* (рис. 4) дает возможность очистки габаритных частей в любой емкости не прибегая к использованию специализированных приспособлений, выдавая высокого результата очистку.



Рисунок .4. Комплект ультразвуковых погружных излучателей

Как и в установке ранее мы сталкиваемся с ее не возможности обслуживания ее внутренних плоскостей и полостей от ультразвуковых волн, и также ее огромные энерго затраты на электричество, и высокую трудоемкость из-за габаритов. И сложную систему генераторов и блока управления.

*Установка МО-78 фирмы «Александра-плюс»* Используется для чистки изделий в водных растворах моющих технических средств от загрязнений при помощи ультразвука. Комплектность данной установки состоит из элементов: регенерации жидкости в ванной подставки и пульта управления, ванна ультразвуковая, в терма и звуко изолирующем коробе. Принцип действия установки заключается в непрерывном движение жидкости, через систему фильтрации которая отсеивает, крупные отходы и следы агрессивных сред. Установка состоит из комплекта, ванны с подогревом жидкости и корпусом для сбора примесей после фильтрации.

Технические характеристики установки выдает мощность частоты в 22кГц, и выдаваемую энергию 6 излучателей равной 100 Вт каждый. Данная установка тоже эффективна для очистки простых полостей, но внутренние части также не получают должный уровень качества поверхности.

*Установка МО-229* получило широкое применение в машиностроение для очистки загрязнений, и не плохо зарекомендовало себя для обслуживания оборудования. Данная установка обладает прямоугольной ванной со сменной крышкой, крышка обладает коррозионной прочностью. Звукоизолирующий материал покрывает ванну по всей ее поверхности. Также оснащена подставкой, которая оснащена виброподводящими опорами для создания комфортных условий труда. 6 пьезокерамических излучателя располагаются на дне ванны, и выведенный специализированный шланг для слива всей отработай жидкости в резервуар для утилизации. Как и в прошлом образце ванна оснащена системой для нагрева жидкости и системы поддержания постоянной температуры в системе. Размеры ванн дают нам возможность размещать нам пресс-формы, однако мы не получим эффективной очистки внутренних литниковых систем.

*Установка МО-239* в своем роде ее применение для обработки крупногабаритных изделий в водных растворах. Ее принцип работы полностью повторяет работу установки МО-229, которая классов меньше. Отличие заключается только в рабочих характеристик установки. Во первых данная установка имеет большой объем ванны и и гораздо большая мощность излучателей порядка 1600 Вт. Преимуществом установки является это ее метод работы с применение системы циркуляции и фильтрования. И из-за большого объёма ванны можем размешать до трех независимых установок. Но недостаток как и у остальных не высокий эффект очистки внутренних частей элементов.

На комплексе выполняются следующие операции:

– Вспомогательны операции при помощи вспомогательных инструментов вручную.

– предварительная промывка вручную с использованием различных приспособлений (ерш, щетка и т.п.);

– Очистка каналов размеров от 1-5 мм длиной до 100мм. В том числе и резьбовые отверстия при помощи излучателя в виде шприца.

– Финишная очистка по методику погружения в ультразвуковой ванне.;

– Очистка при помощи испарений от ультразвуковых испарений.

Для данной установки проработаны пакеты хорошо показавших себя жидкости такая как хладон-113, и множество растворов класса пожаробезопасные, в основе которых этиловый спирт и пропанол-2. В активной зоне обработке получаем значения мощности не более 4 частиц на в 1 литре воздуха.

Установка оснащена с генератором ультразвуковых частот (УЗУ-025М) и излучателем в виде шприца. Две ванны оснащены магнитные излучателями, много пакетным излучателями, берущие питание от генератора УЗГ-2-4М. Очистка изделий происходят по следующему принципу. Изначально в первой ванне происходит очистка от оксидных пленок, путем перегонки жидкости через очистную систему, для восстановления ее свойств. Во второй ванне происходит очистка уже более крупных элементов от механических загрязнений, контроль за испарением производится при помощи датчиков, и удаления воздуха через вытяжные шкафы. У данной установки огромный потенциал по очистки сложно доступных зон изделий, в том же числе топливные системы, отличные возможности обеспечивается из-за систем протока очищающейся жидкости. Но используемые здесь системы не несут положительного влияния на внутренние части из-за отражающего эффекта, но нельзя не отметить ее преимущество по очистке труднодоступных зон.

Ниже рассмотрим импортные ультразвуковые ванны с функциями sweep, pulse, degas.

Ультразвуковые ванны *Elmasonic S* компании Elma Hans Schmidbauer GmbH & Co.KG (Германия) имеет широкий модельный ряд по габаритам от 1 литра до 100 литров. Каждая установка оснащена специализированный ПО, с применением метода Sweep, что позволяет в ванне оптимальное распределение ультразвуковых волн, базовые значения ультразвуковых частот равен 37 КГц. Ультразвуковые мойки *Elmasonic XL* п самые крупные в линейке установки, имеющие резервуары от 150 литров до 300, в таких ваннах производятся машиностроительные компоненты, с управляемой кавитацией. Можно так же рассмотреть вариант двух и трех излучателей в случае расположения на стенках ванны. Применено две частоты ультразвука для грубой и финишной очистки 25 или 45 кГц. Установка имеет независимую систему управления. Данная установка может при помощи режима Pulse увеличить ультразвуковую мощность, на два излучателя расположенных на противоположных стенках ванн. режим *Sweep* для равномерного покрывания области ультразвуковой волны, по всей ванне, режим *Degas* для быстрой дегазации новых моющих растворов. Как дополнительное оборудование используют, откидные крышки, для снижения выдаваемого уровня шума.

Компанией Elma Hans Schmidbauer GmbH & Co.KG выпускаются также промышленные ультразвуковые ванны малых объёмов для чистки металлических поверхностей или стекла с возможностью изменения диапазона частот ультразвуковых волн, в зависимости от комплектности излучателей. Например для мягкой чистки 35/130кГц. Оборудование оснащено всеми функциями, начиная от Sweet для распределения ультразвуковых волн по всему объёму жидкости, и функции быстрой дегазации моющей жидкости.

Базовые ультразвуковые ванны *Everest Elektromekanik*, серия *CleanMax N* производства Турции – Огромное преимущество установки это ее способность работать в течение 24 часов в полной производственной загрузке. Серийные версии оборудования подразумевают из себя ванны объемом от 60 до 240 литров полезного объема.

Корпус из нержавеющей стали, образует простую и в свое время надежную конструкцию для выполнения поставленных перед установкой задач. Установки оборудованы системой фильтрации от масляных образований, частиц от механической обработки и защитой переливание при засоре системы. И дополнительная установка для сушки деталей после мойки.

Конструкция ванны *CleeanMax P* максимальной загрузки 200 кг. Погружение корзины с деталями при помощи кран-балки. Рабочая частота ультразвука – 28 кГц. Установка имеет примитивные датчики оповещения это таймер, и отклонения в уровне жидкости.

Эти, а также другие модели ультразвуковых ванн с функциями *Sweep*, *Pulse* и *Degas*, х не смотря на то, что их производительность и эффект от чистки лучше чем у конкурентов, они так же как и установке приведенные ранее, мы не получим от данных установок ожидаемый нами результат по очистке внутренних частей пресс-формы.

Далее рассмотрим вариации установок очистки по технологии ультразвуком применяемы, в авиационной промышленности и разработаны специализированные приспособления для обработки отверстий. [15]

*Установка ультразвуковой прецизионной мойки УПМ-901* (рис. 5) Используется для обработки изделий топливной системы, обработке технологических загрязнений, для обработке гидро и пневмо узлов, а также тонкой очистки гидр смесей АМГ-10, ГМ50И.



Рисунок 5. Установка ультразвуковой прецизионной мойки УПМ-901

Данная установка оснащена ультразвуковой ванной с шестью волноводами, центробежный барабан для очистки генератор ультразвуковых волн УЗУ-025М и пульта управления.

Работа установки заключается не обычным методом распределение очищающей жидкости, особенность заключается в том, что раствора для очистки состоит из очищенного керосина который подготавливается до и соединяется с раствором для очистки. После заполнения ванны данным раствором, оператор производит погружение деталей для замачивания, а уже после этой операции происходит основная очистка ультразвуком очистка деталей.

Если же на обрабатываемых деталях существуют отверстия, то их обработка происходит при помощи шприца волновода, в время проведения операции замачивания.

Данный генератор ультразвуковой установки оснащен кнопкой, педального типа для активизации ультразвуковых волн. Так же в установка комплектуются стандартными щупами 0,8; 1,2; 2; 4; 6мм. Из



инструментальной стали 12Х18Н10Т. Для зачистки пленки 2 мкм масляных пленок достаточно скорости расхода жидкости 20л/мин.

*Установка для ультразвуковой промывки отверстий УУПО-901* (рис.6) имеет свое назначение для очистки резьбовых отверстий, простые продолговатые отверстия, глухие отверстия узких узлов от технологических загрязнений.

Установка комплектуется ультразвуковым шприцем, гидрочистителем, ультразвуковым генератором УЗУ-025. Характеристика оборудования, это выдаваемая мощность генератора в 500 Вт и частота в 18 кГц. Установка позволяет пару циклов очистки отверстий обеспечить должный результат на длину отверстия до 180 мм.

*Стенд для ультразвуковой очистки деталей СПДУ-901* (рис. 7) предназначен для очистки протезных элементов от технологических загрязнений.

Установка состоит из ультразвуковой ванны, и переработанной системы циркуляции жидкости. Данную разработку провели ученые [96] введя в конструкцию ванны щелевые отверстия через которые происходит подача смеси.

УЗГ-2-10 ультразвуковой генератор с мощностью 19,5 кВт, так же три магнитострикционных образователей волн, в прямоугольной форме.

Тонкость очистки моющей среды центробежным очистителем составляет 1,5 мкм.



Рисунок 6. Установка ультразвуковой промывки отверстий УУПО-901

Рисунок 7 Стенд ультразвуковой очистки деталей СПДУ-901

Данные установки, хоть и предназначены для обработки труднодоступных элементов, отверстий, или глухих отверстий. Но данные ванны не могут использоваться для очистки пресс-форм и из-за сложной конструкции литниковых каналов не позволяют проникнуть иглам в обрабатываемые поверхности. В связи с этим у данных ванн высокая трудоемкость очистки и малопроизводительными.

Вышеприведённые установки были изготовлены в ОАО «НИТИ-Тесар» в лабораториях по электрофизики и их технологий. Расчеты и разработка методик стали ключом команды к развитию ультразвуковых систем очистки, и также конструирование и сборка портативных элементов для получения более точных результатов. Их основное открытие это закономерность к расположению и количеству волноводов излучателя. Такие установки могут держать под контролем расхождение частот и колебаний амплитуд, которые формируются от каждого излучателя и позволяет равномерно распределить, волны по всему объему жидкости.

## **1.6 Предлагаемое техническое решение. Постановка задач исследований**

Проанализировав все составляющие ультразвуковой очистки, а именно факторы влияющие на процесс такие как экранизация отражающих частей, трудоемкость обработки труднодоступных элементов, методы обработки, влияние кожной кавитации на обработку разных материалов [18], собрав опыт прошлых лет и поняв, что в отверстиях откладывается не только загрязнения, но остатки примесей в виде разной толщин, и плотности, и их

устойчивость к воздействию ультразвуковых колебаний. Формируется следующий план для достижения поставленной задачи работы:

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

- Изучение загрязнений каналов и отверстий с целью, выявления частот, при которой пучность оказывается в наиболее проблемных зонах, с минимальным прохождением сечения.

- 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. 8 [71].

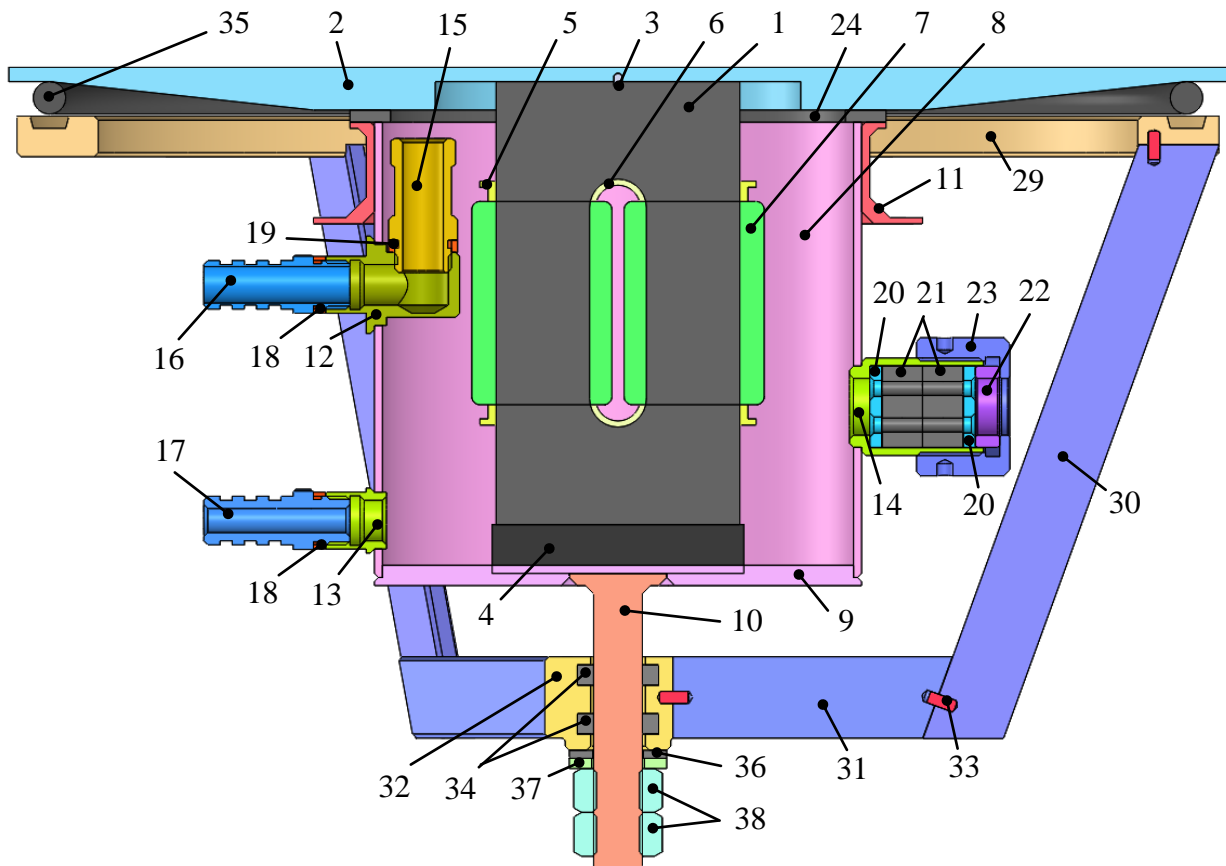


Рисунок 8. Предлагаемое техническое решение преобразователь ПМС-6-22

№ позиции	Наименование детали
1	пакет магнитострикционный 109х60х63
2	диафрагма 300х300
3	штифт монтажный 2х3,5
4	демпфер 65х62х12
5	уголок изоляционный
6	щека изоляционная
7	обмотка 14 витков
8	корпус бачка
9	крышка бачка
10	болт притяжной М12-6g.88
11	фланец бачка
12	ниппель верхний
13	ниппель нижний
14	ниппель боковой
15	трубка (М14х1,5-6Н)х10х33
16	штуцер верхний 12х9х36
17	штуцер нижний 12х6х36
18	кольцо штуцера 14х12х3
19	кольцо ниппеля 17х14х3
20	шайба уплотняющая 20х х3
21	шайба уплотнение 20х х10
22	втулка уплотняющая 20х14х6
23	гайка уплотнения М24х1,5-6Н
24	прокладка 2Ф-1 - АМС - Т - 3 ГОСТ 7338-90
25	шпилька (М8-6Н-35/М8х1-6Н- 10)х70
26	шайба демпфирующая 15-2х10- 4х8х6
27	шайба 14х9х2
28	гайка М8-6Н.8 ГОСТ 15521-70
29	кольцо кронштейна 296х256х10
30	ребро
31	консоль
32	ступица
33	штифт монтажный 3х7

34	кольцо демпфирующее 20x12x5
35	кольцо уплотнительное 280-295-85-2-4 ГОСТ 9833-73
36	шайба-демпфер 24x12,5x2
37	шайба 24x13x2,5
38	гайка М12-6Н.8 ГОСТ 15521-70

Предлагаемая схема осуществляется следующим образом. Определяют массу детали, которая будет подлежать очистке, с целью расчёта необходимого усилия прижатия к торцу концентратора. Если заложить меньшее усилие, его будет недостаточно, для обработки. Если приложить усилие более необходимого, это приведет деформаций и изменения конструкторской точности, что в свою очередь повлияет на функциональность изделия. В ванну погружаем оснастку и устанавливаем с волноводом один из центральных каналов, и подключаем его к центральному каналу потока жидкости от насоса. Оснастку погружаем на 10-20 мм от уровня жидкости. Данное решение нам позволит минимизировать потери колебательных волн. Запускаем генерацию ультразвуковых волн, что обеспечит колебание среды. Которая в свою очередь будет влиять на обрабатываемые элементы изделия. В следующем шаге запускаем насос для циркуляции жидкости через очистные установки, и продолжаем обработку до полного исчезновения загрязнения и исключения оксидных слоев на поверхности. По окончании обработки при помощи расходомера фиксируем по изменению расходомера через канал жидкости. Ожидаемый эффект от данной технологии, общего кавитационного воздействия от всех сил на кромки отверстий и обрабатываемые поверхности

Для подтверждения необходимости разработки иной технологии по ультразвуковой очистке следует разобрать следующие задачи.

1. Выполнить анализ исследований в области удаления загрязнений оксидных слоев по технологии ультразвуковой очистке.
2. Проанализировать возможные пути активации, в том числе и с применением дополнительной энергии ультразвуковых колебаний

3. Выполнить численное моделирование ультразвуковой активации, исследовать режим кавитации и определить рациональные условия ее наиболее эффективного распыления в зоне обработки.

### **1.7 Выводы**

1. Исходя универсальности и эффективности метода очистки ультразвука как технологии, является на сегодня широко востребованным, за счет энергии ультразвука на поверхности деталей разного назначения.

2. Намеченный план задач по исследовательской части и воплощения их на практике, образовался по ходу анализа существующих и перспективных устройств ультразвуковой очистки, используемый для очистки различных поверхностей, расположенных в полостных и труднодоступных местах.

3. В нашем случае для поверхностей внутренних частей изделий, выдвинуто предложение по установке которые основаны для контактного действия излучателя колебаний с постоянной циркуляцией технической жидкости. Для ее исполнения необходимо проанализировать воздействие ультразвука на изделие, изучить и разработать технические параметры работы персонала.

## **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**

Беря в учет сложную конструкцию пресс-форм, имеющие наличие слепых зон при распределении волн, изложенное ранее позволяет предположить особые ультразвуковые кавитации. Интенсивность поля обычного технологического поля с высоким ультразвуковым полем обеспечит очистку только на простых поверхностях изделий.

Основной подход обеспечения качества очистки поверхностного слоя оксидов, с учетом напряжений, которые выше адгезионных свойств покрытия. В зоне очистки деталей, мы будем воспроизводить ультразвуковые волны изгибного напряжения, которые в свою очередь обеспечат, нам желаемый результат. Приоритет исследования состоит в задаче в получении более эффективной очистки поверхностного слоя оксидов, в сложно доступных местах, литниковых системах, отверстиях, в аналогичных по признакам деталях машиностроения, в технологии нужно учесть факторы, кавитационного и местного воздействия. В контакте детали и ультразвукового излучателя, будет воздействие постоянной силы, которая арифметически состоит из переменной и постоянной.

Проанализировав исследования можем подвести некий итог, существующие методы ультразвуковой кавитации чистки и с предполагаемым способом контактной обработки с применением фактора жидкости для очистки, и учитывая сложный конструктив обрабатываемых поверхностей, при допущении того что причиной разрушения оксидного слоя

в необходимых нам местах заключатся путем высокого внутреннего напряжения от кавитации или изгибных волн, приводящие к многочисленным циклам, с переменной нагрузки на поверхностные оксидные слои, обогащение наличием углерода. Схема разрушения оксидного поверхностного слоя под действием изгибных колебаний представлена на рис. 9.

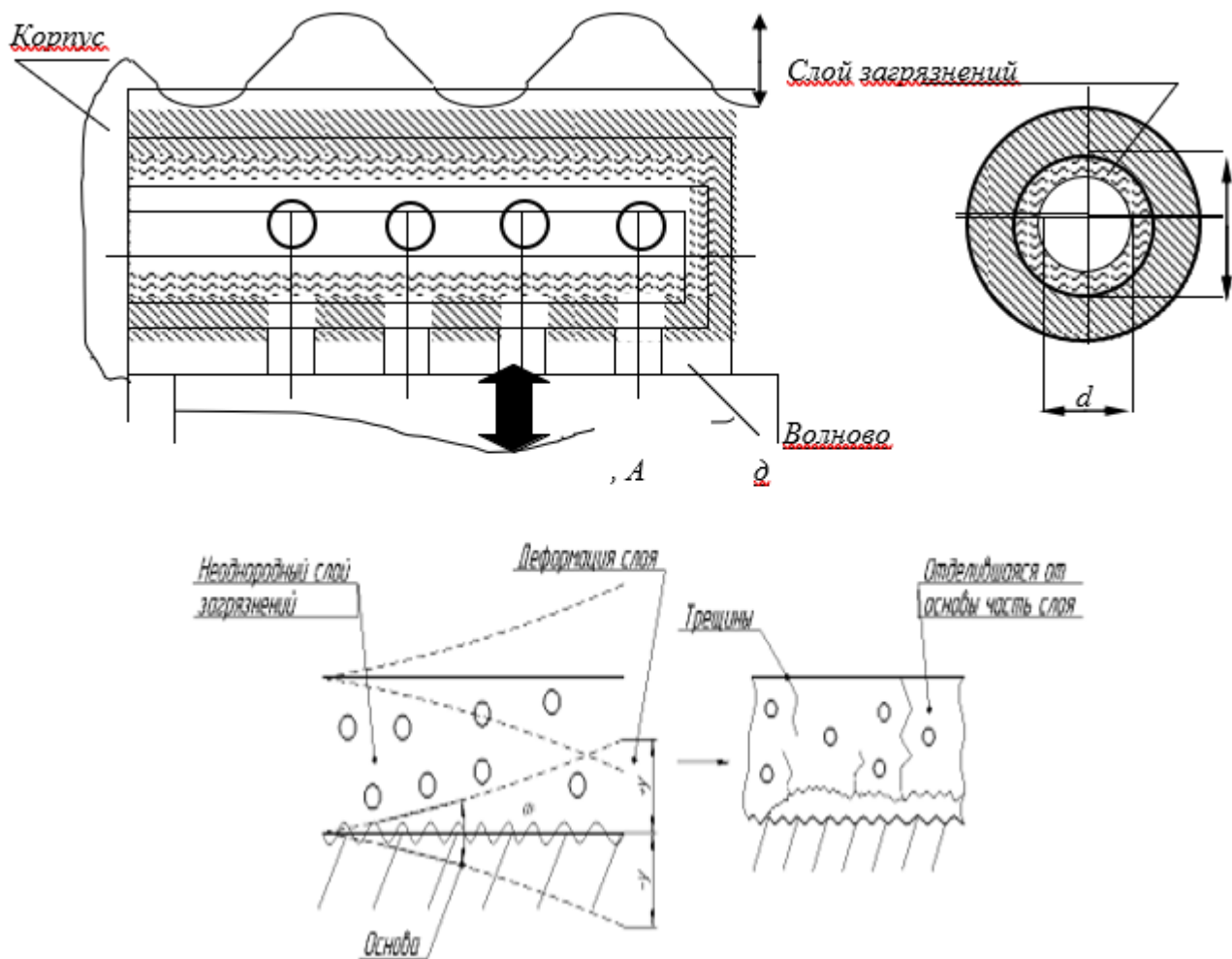


Рисунок 9. Схема деформаций элемента конструкции и возникновения напряжений в поверхностном слое при ультразвуковом нагружении

Условие разрушения внутреннего поверхностного слоя может быть записано следующим образом:

$$\sigma_F \geq \sigma_{адг} \cdot \quad (8)$$



где,  $\sigma_f$  – изгибные напряжения, вызванные ультразвуковыми колебаниями

$\sigma_{адз}$  – адгезионная прочность (прочность сцепления) оксидного слоя.

Изгибные напряжения согласно известным выражениям сопротивления материалов [94,58] определяются по выражению:

$$\sigma_f = M/W \quad (9)$$

где  $M$  – изгибающий момент

$W$  – момент сопротивления поверхности изгибающегося элемента.

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

$$W = 0,1D^3(1 - c^4), \quad (10)$$

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

$$M \approx P_l \approx CA^{0,56}l, \quad (11)$$

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 (9) и (10) в (11), получим выражение для определения внутренних напряжений изгиба в оксидном слое, связывающее величину напряжений с амплитудой ультразвуковых колебаний и конструктивными особенностями изделий

С учетом многоциклового характера нагружений элемента конструкции изгибные напряжения необходимо определять с учетом эквивалентного  $N_э$  и базового  $N_б$  циклов его нагружения по известной зависимости [85,69]:

$$\sigma_{FЭ} = \sigma_F \sqrt[m]{\frac{N_Б}{N_Э}} \quad (12)$$

где,  $m = 8$  показатель степени

$N_б = 10^7 - 10^8$  – 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. волновода  $N_э = f$ . С учетом этого, подставив (11) в (12), можно переписать (9) следующим образом:

$$\frac{CA^{0,567}}{0,1D^3(1-c^4)^8} \sqrt[m]{\frac{N_Б}{f}} \geq \sigma_{\text{крит}} \quad (13)$$

По данным [94], принимая материал поверхностного слоя преимущественно хрупким, можно принять  $C = 16,6$ . Расчет по зависимости, принимаем справочное значение  $f = 22000$  Гц, получены графики (рис. 10), позволяющие выставить диапазон значений эффективности обработки при контакте при обработке с учетом адгезионной прочности оксидного слоя  $\sigma_{адг} = 12-15$  Н/мм<sup>2</sup> (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.

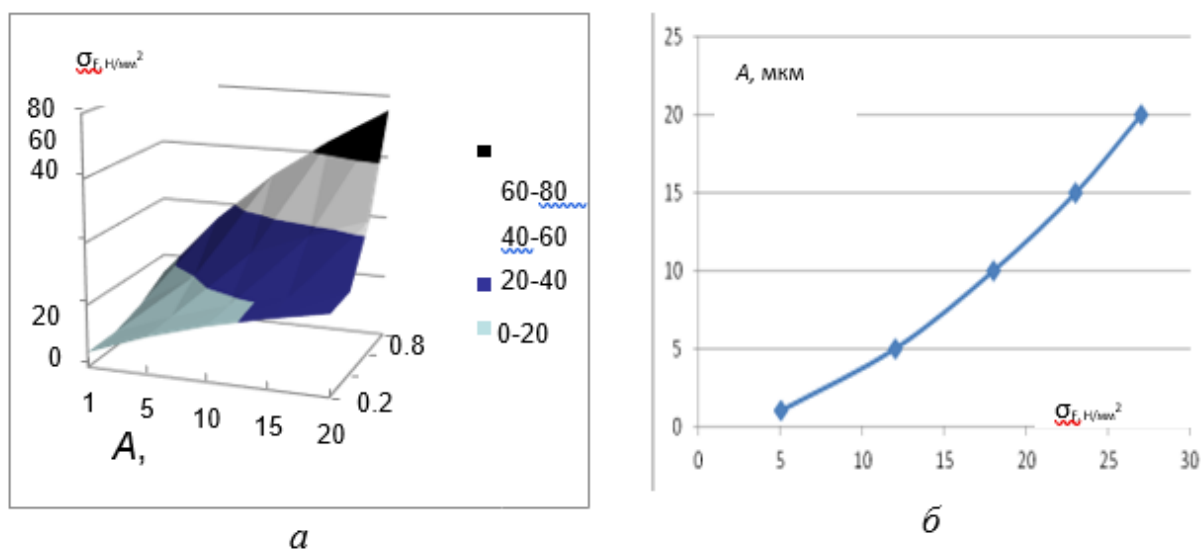


Рисунок 10. Изгибные напряжения  $\sigma_f$  (а) в трубчатой конфигурации, получившие воздействие ультразвука, в зависимости от размаха  $A$  и соотношения сечения канала и внутреннего размера оксидного слоя и соответствующее напряжениям средние значения размаху ультразвуковых волн (б)

Возьмем величину базового циклического нагружения  $N_B = 10^7$ , В следствие период времени цикла до предела выносливости преодоления предела поверхностного слоя, 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 периоде исследования при помощи комплекса ВК-01 (компьютерная акустика) и частота измерителя электрического ЧЗ-33 определена частота фактического значения ультразвуковая преобразователя, которое способна обеспечить амплитудное значение виброускорения приведённая в( таблице 1.6)  $f = 23350$  Гц.

Таблица 1. Зависимость виброускорения и частоты сигнала ультразвукового генератора

Частота $f$ , Гц	22480	22640	22850	23120	23230	23550	23600	23750
Виброускорение $a$ , м/с <sup>2</sup>	410	420	450	190	290	500	400	400

С учетом полученной волновой частоты цикл времени разрушения оксидного поверхностного слоя 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] выявлено, что время составляет 6-7 минут с увеличением проходного сечения в каналах в пресс-формах предложенном методом.

В ходе производственных испытаний метода на реальных пресс-формы при частоте и амплитуде ультразвуковых колебаний волновода соответственно 22,3 кГц и 9-10 мкм время восстановления пропускной способности каналов пресс-форм к комплексе составило 20 – 40 минут.

Из полученных данных, берем в значение существенный разброс в адгезионной прочности и толщине загрязнения оксидного слоя в литниковых системах пресс-форм, и их удаление совпадают с теоретическими с расчетными временем цикла при определенной по полученном нами условий ультразвуковых колебаний. По итогам мы принимаем данную зависимость для наших дальнейших расчётах амплитудно-частотной характеристики

ультразвуковой установке для очистки литниковых каналов пресс-форм, при применении методики контактных.

## **2.2 Определение рациональных частот колебаний частот пресс-форме на основе компьютерного моделирования**

Моделирование состояния напряженно-деформированного состояния и колеблющихся частот пресс-формы проводили в порядковом количестве этапов. В начале разработали в программе Компас-3D v.17 разработали чертежи пресс-форм в формате 3D. На следующем этапе к разработанным нами чертежами, проектировали их с твердотелой моделью для последующего анализа частот и формы колебаний под действием смешанной вынужденной периодической силой. Так же из-за сложившейся сложной конструкции и трудоемкости расчетов проводили методом моделирования путем приближения: центральное тело моделирование в виде полой конструкции с внешним фасадом. Для упрощения при моделирование мы представили пилоны в виде обычных стержней без радиальных отверстий. Так же отверстия не учитывали при моделирование центрального тела, так как их наличие является малозначимым фактором для сварочных швов пилон. На втором этапе мы уже производили моделирование воздействия вынужденной силы на один пилон с полным комплектом радиальных отверстий.

После окончания проектирования твердотелых моделей их разбор на простые элементы, Была принята за константу тетраэдра с размером от 0,5 мм до 1 мм объемной формы.

Модель с малым размером получилось максимально точной, но из-за большого количества точек порядка 2 миллионов, что не позволяет провести моделирование. Модель грубого типа оказалась, не пригодной для точных подсчетов. Поэтому было принято создать максимальную точную модель которая бы удовлетворяло и возможности оперативной системы

вычислительного компьютера, по итогам получилось грань равная 0,7 мм это оказалось достаточной точности и адекватное построения модели для дальнейшего анализа. (среднее время вычислений одного варианта при моделировании частотных диапазонов и нагрузжений составило 1,5 часа).

Результаты разработки чертежей концевика подачи РС в литниковые каналы устройства и твердотельного моделирования представлены на рис.

11

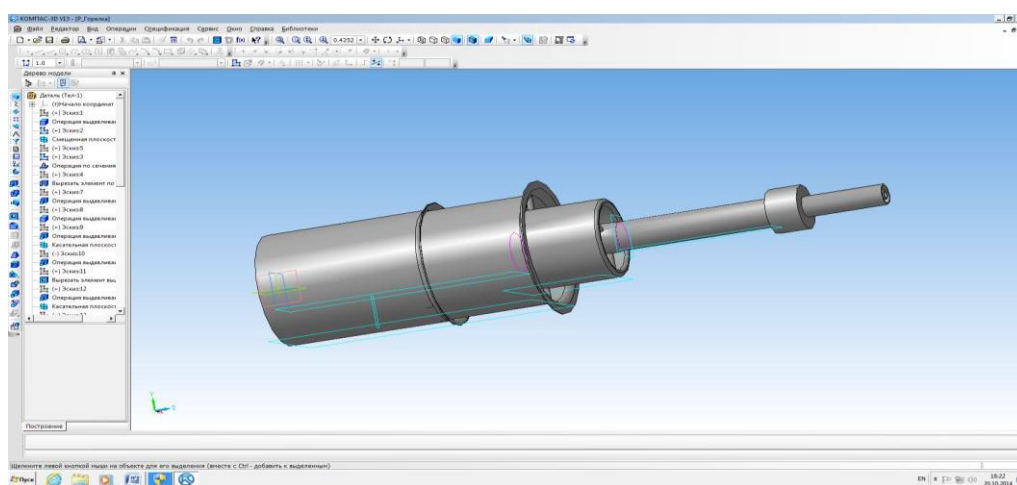


Рисунок 11. 3D чертеж наконечника подачи резиновой смеси в систему.

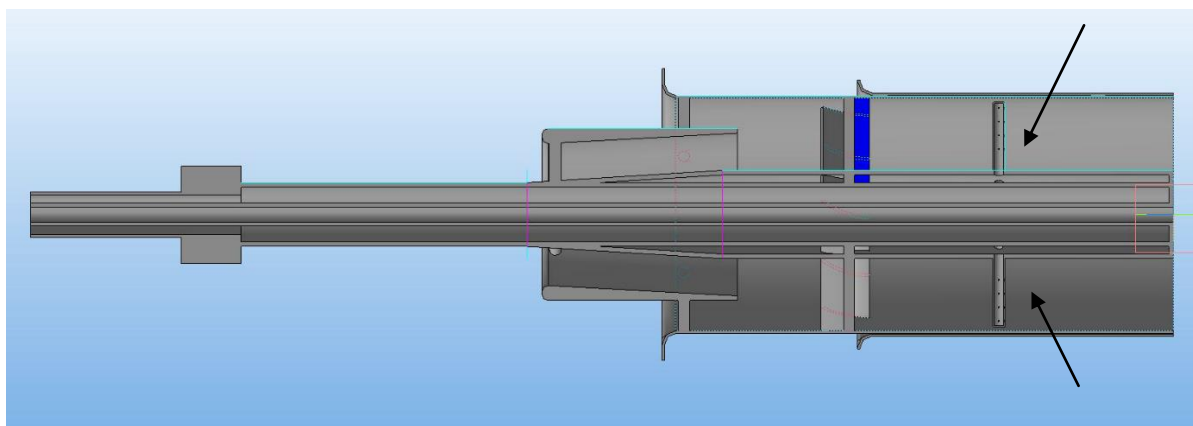


Рисунок 12. Осевой разрез модели наконечника подачи с выделенными областями скопления оксидных слоев

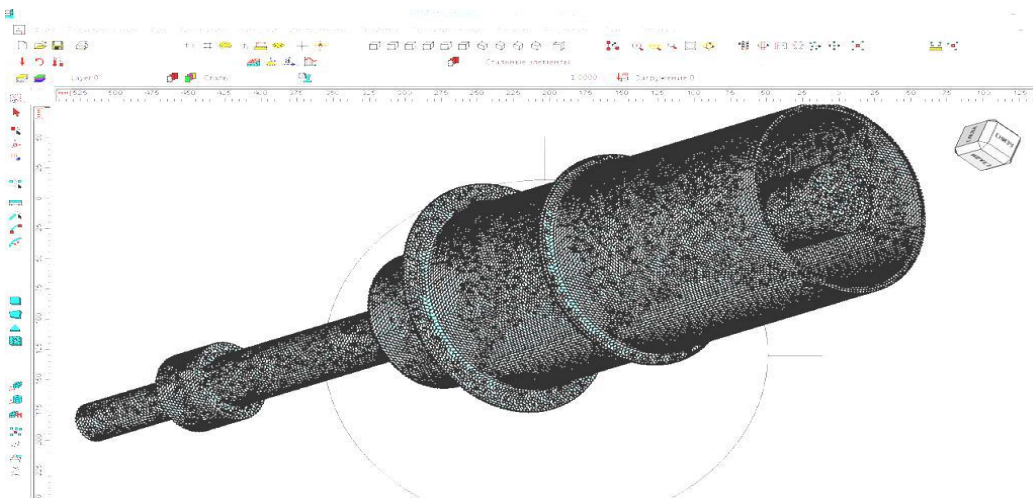


Рисунок 13. Твёрдотельная модель

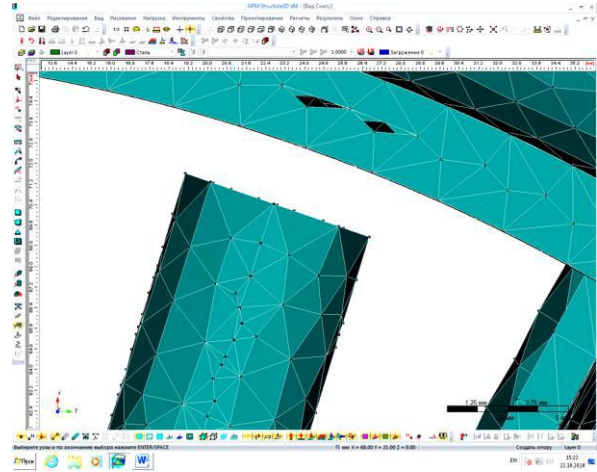
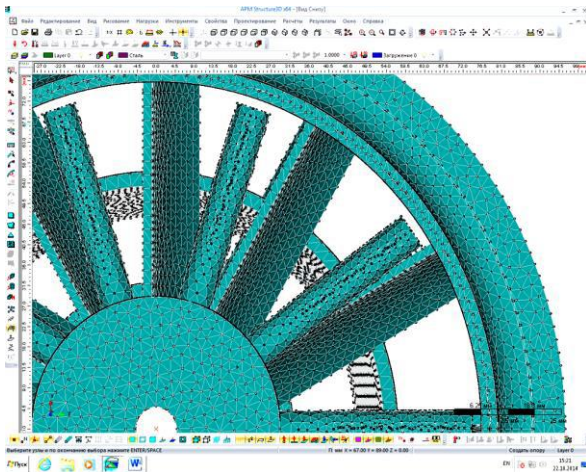


Рисунок 15. Вид конечно-элементной модели наконечника со стороны пилонов

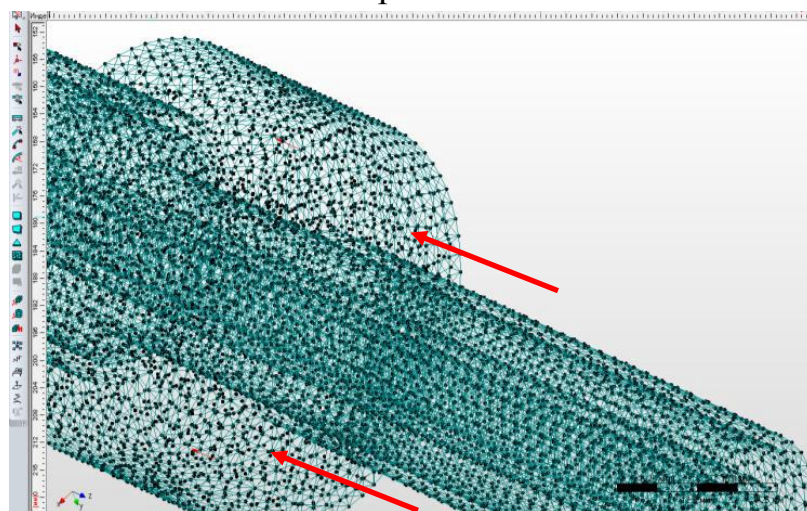


Рисунок 16. Приведенная к «прозрачному» виду твердотельная модель хвостовой части наконечник с приложенными нагрузками.

В момент моделирования расположения наконечников пресс-форм при наложенной нагрузке, на торце ультразвукового образователя неэффективную с точки зрения нагрузки схему расположения при погружение: масса объекта приложены на концы наконечников (консоль имеет максимальную длину), вес оси расположены как статичная нагрузка, на каждый действует динамичная сила пилонa, вызывая в результате колебаний излучателей.

В результате взвешивания определен вес литниковой системы , равный 8,5 кг или 85 Н.

Динамическая сила согласно [31,32,33,34] при нагрузки ультра звукового воздействия высчитывается по формуле:

$$P_{д} = 16,6 \cdot A_{np} \quad (14)$$

График напряжения нагрузок на волноводы представлен следующей схеме на рис.17.

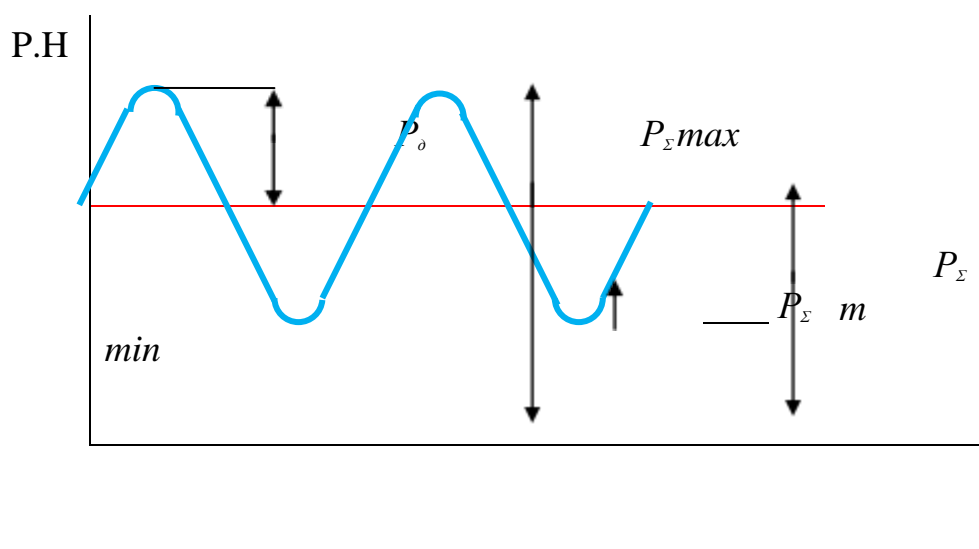


Рисунок 17. Нагрузки, действующие на пилоны

Диаграмма отображает одновременное воздействие постоянных нагрузок и знакопеременной (динамической силе вследствие колебания излучателя). В следствие суммарной нагрузки колебаний за цикл будет



изменяться от максимального  $P_{\Sigma} \max = P_{cm} + P_o$  до  $P_{\Sigma} \min = P_{cm} - P_o$  минимального [10,25,35]

В программе *APM Winmachine* проведён анализ твердотельной модели на расчет частот колебаний сложного объекта типа литниковой системы. Проанализировали два вида класса частот низкие (до 1000 Гц), высокие до (18000 Гц) . Было проведено моделирование порядка 750 сценариев. Сценарии на высоких частотах не рассматривались по причине, что нами было принята теория по методике и нам не было необходимости их анализа, и мы учитывали в теоретических расчетах мы рассматривали воздействие волн только на литниковую систему, нам нужен резонанс системы, совпадения частот как собственных и вынужденных. В том числе мы понимаем, что генерация от волноводов генератора находится в номинальной частоте 22кГц и может моневривоться в зависимости от габаритов оснастки на 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 на литниковой системе на низких и высоких частотах представлена.

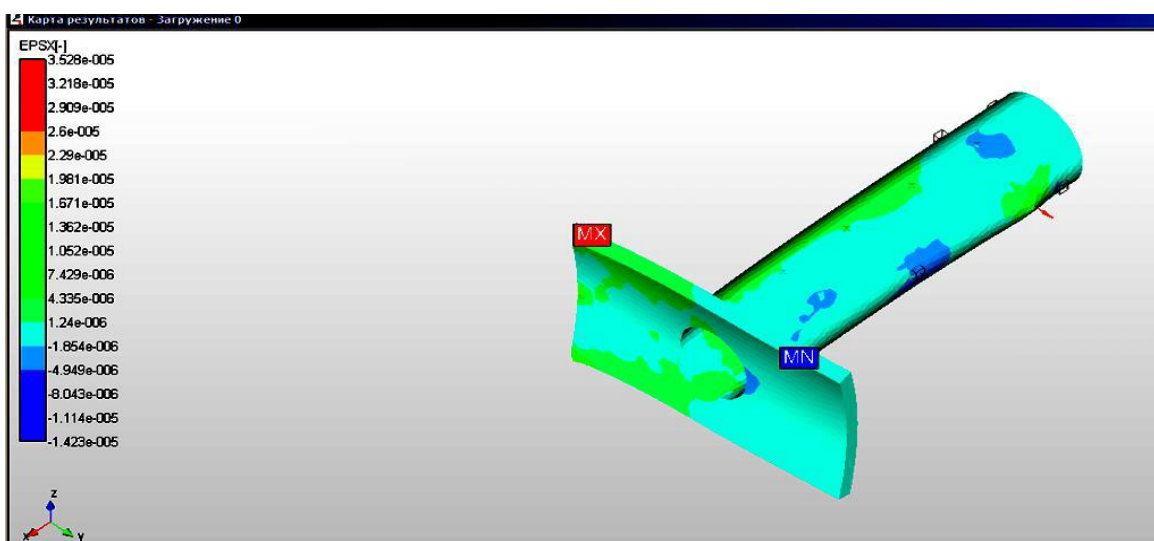


Рисунок 18. Колебания полной модели на частоте 379 Гц

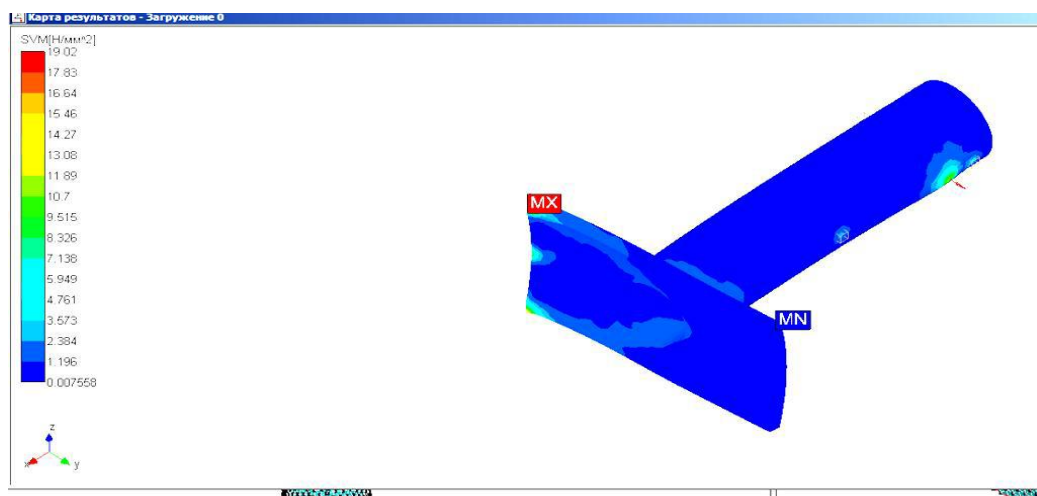


Рисунок 19. Колебания полной модели на частоте 18005 Гц

## 2.3 Выводы

1. В результате полученного выражения математического расчета, демонстрирует нам развал поверхностного слоя при контакте ультразвуковых волн с внутренними поверхностями в каналах при контактном воздействии. Отсюда следует что мы можем определить частотные колебания и величины амплитуды из связи параметров ультразвуковой установки и площади разрушенного оксидного слоя поверхности загрязнения с пропорции оксидного слоя. Отсюда мы теоретически получаем значения амплитуд и ультразвуковой частоты.

2. Произведя компьютерное моделирование наконечников пресс-форм, определили собственные колебания. Также определили максимальную кучность концентрации 50 образований при частоте находящиеся в зоне 22000 Гц, что является оптимальной частотой.

3. Произведено моделирование наконечников на действие деформации при постоянной нагрузки волн от ультразвуковой установки. Так же по итогам компьютерного моделирования было выявлено, что в критически хрупких местах при воздействии силы в 5 Мпа получили деформацию не более 2 мкм, что дает нам понять что у нашей конструкции хороший запас

прочности каждого элемента, который подвергается ультразвуковым колебаниям.

# ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

## 3.1. Постановка задачи моделирования

Приоритет нашей цели зависит в представлении применения ультразвука для увеличения эффективности процессов в жидкости, в котором будет происходить явления кавитации.

Основная цель управлять режимами кавитации, и установить стандартные значения жидких средств с данным условием распыления жидкости в зоне активизации. Так же нужно отметить, что необходимо от генератора получить необходимый диапазон и резерв для под настройки частотности и автоматическая настройка частоты. Следовательно, нужно добиться таких кавитационных параметров, при котором мы могли бы получить отслоение пузырьков разного размера в момент кавитации пузырьков. (рис. 20)

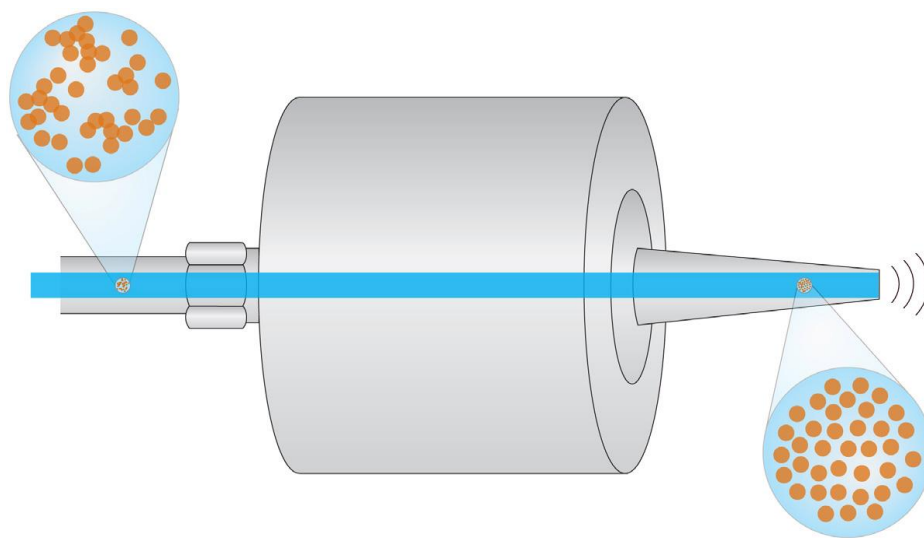


Рис. 20. Схема работы ультразвукового аппарата для распыления жидкости

Для проведения расчетов математических и описания систем гидравлики с учетом завихрения протекания жидкости воспользуемся так же формулой Для математического описания гидродинамических систем с

учётом уравнения Навье-Стокса: приведем доработку уравнения в систему дифференциального уравнения с применения частных производных, описывающие течения вязкой жидкости. Уравнение Навью-Стокса имеет важное значение в системах гидродинамики и берутся за основу построения моделирования многих примеров из жизни и для осуществления технических задач. [31]. Выстраиваем систему из двух уравнений: Первое это уравнение движения и второго уравнения неразрывности. В векторном виде для жидкости несжимаемой форме реализуется в следующем образе:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \mu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f} \\ \nabla \vec{v} = 0 \end{cases}, \quad (15)$$

где,  $\mu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости

$\rho$  – плотность жидкости

$p$  – давление

$\nabla$  – оператор Гамильтона  $\Delta$  – оператор Лапласа

$\vec{v}$  – векторное поле скоростей, для двухмерной постановки задачи

$$\vec{v} = (v^1, v^2), \quad (16)$$

$\vec{f}$  – векторное поле массовых сил.

Найти системное решение системы уравнения Навье-Стокса реально определить только в простых арифметических случаях. Обычно для каждого случая для определения системы уравнений применяется числовое моделирование. Для числового моделирования имеется база моделей завихрения жидкости. Чаще всего для реализации моделирования используется система инженерных целей является модель «k-ε». Для применения данной модели первую формулу адаптируем к виду, в которой прибавляем влияния флуктуацию средне скорости ( в виду энергии турбулентности жидкости) и уменьшения этого значения по отношению

вязкости жидкости. В «к-ε»-модели реализуется два уравнения дополнительных для транспортировки кинетической энергии завихрения и транспортировка диссипации завихрения. [32]

Далее проанализируем геометрического решения подачи очищающей жидкости в зону кавитации, которую нужно задать при моделировании с помощью функциональное моделирование прибегая к числовому методу. (рис. 21).

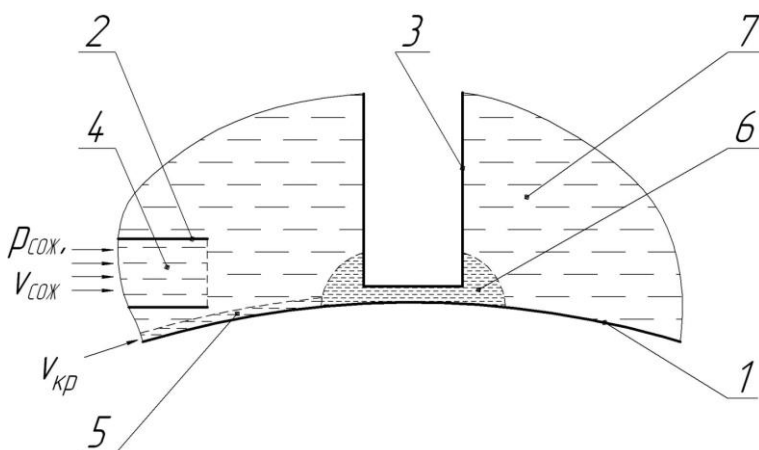


Рис. 21 Расчетная зона активации с помощью ультразвука:

1 – поверхность обрабатываемой детали или инструмента; 2 – трубка подачи жидкости; 3 – ультразвуковой излучатель; 4 – активлируемая жидкости; 5 – слой оксидного загрязнения; 6 – область кавитации; 7 – атмосферная зона давления

Обозначим для зоны геометрических параметров, очищающей жидкости активизации граничащей условий, для применения числового моделирования.

Нужные нам параметры системы, рассмотрены в виде эскиза с переменными геометрическими зонами (рисунок 1.30).

На схеме обозначено:  $D_{кр}$  – размер или диаметр обрабатываемой детали, мм;  $d_{ч.и.}$  – размер волновода-концентратора, мм;  $d_{COЖ}$  – размер шланга подвода жидкости, мм;  $\delta$  – расстояние зазора волновода и детали, мм;  $A_{з.о.}$ ,  $B_{з.о.}$  – условные зоны очистки, мм;  $A_1$  – расстояние от входного сечения

подвода жидкости до условного центра контакта, мм;  $L$  – расстояние от сопла трубки подвода жидкости до условного центра контакта, мм.

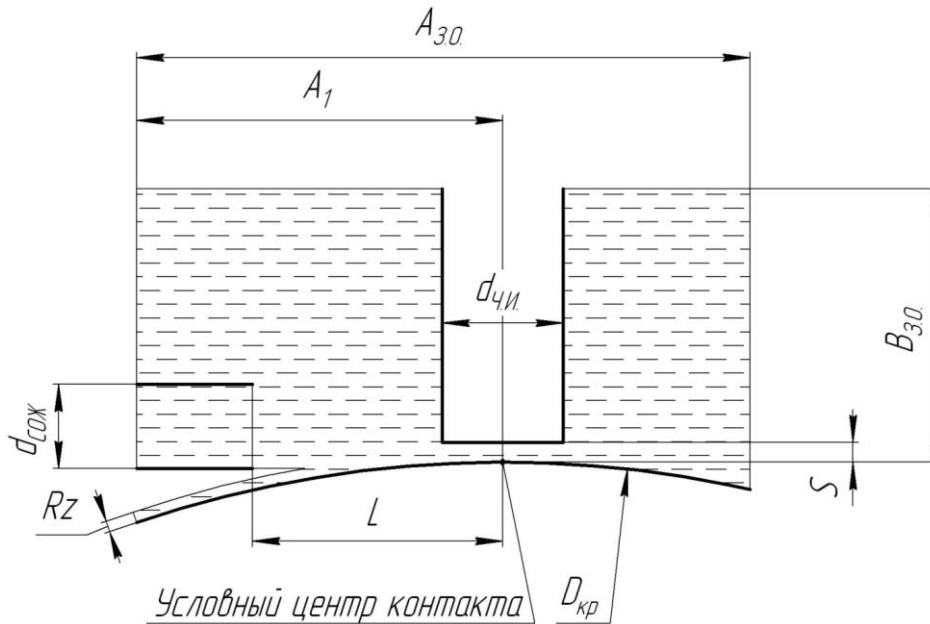


Рис. 22 Геометрия зоны активации

Допуска мат. модели нужно считать единицы параметров процесса (скорость или давления) на модельной области геометрических границах. Расположения элементов граничных в зонах кавитации процесса и приведены их обозначения параметров на рисунке 22.

На схеме (рисунок 23) обозначено:  $p_{вх1}$  – значение сложения давления на первом входе системы, Па; принимаем равным давлению подачи жидкости;  $v_{вх2}$  – скорость потока жидкости на втором входе системы;  $p_{вых}$  – значение давления среды на выходе системы, Па; принимаем равным атмосферному давлению при нормальных условиях.

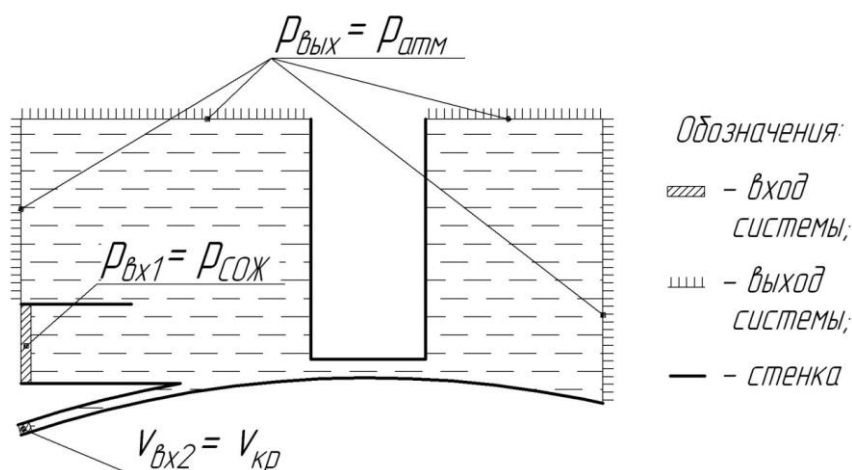


Рис. 23 Схема расположения и параметрические обозначения граничных условий математической модели ГДС

В вычислительной гидравлической системе решений уравнения Навье-Стокса для характерной системы можно осуществлять несколькими вариантами:

- способ конечных разностей;
- способ конечных объемов;
- способ конечных элементов;
- способ сглаженных частиц;
- способ с использованием функции распределения случайных вероятностей.

Более частое нашел метод конечных задач элементов получивший наибольшее применение инженерных задач. Разбивание пространства ванны, разделение геометрии задач на более количества несложных фигур простой формы, в этом заключается основной подход данного метода. В данный момент данный подход берет все большее применение, сложные геометрии со значительной степени позволит анализировать системы. Так же отслеживается разбитие, на поверхностях получается автоматизированное построение тетраэдрической формы, и на треугольные и четырехугольные фигуры для построения моделей.

Для построения системы моделирования сетки элементов конечных геометрических размеров (рисунок 22) и граничащую условия (рисунок 23)



периметральной модели. На данном моменте построения системы процесса удаления загрязнений на пресс-форме необходимо подобрать целесообразный варьировать формы рабочей поверхности излучателя волн и два ключевых параметра системы:

- расстояние между инструментом и оснасткой  $\delta$  в диапазоне от 0,05 до 0,2 мм;

- напор жидкости на входе в систему  $p_{жс}$  в диапазоне от 0,5 до 1 МПа.

Остальные характеристики параметров системы и их значения приведены в таблице 1.33 не имеют диапазона применений и установлены для формирования процесса данного исследования.

Таблица 2 Значения геометрических параметров и граничных условий

Параметр	<i>кр</i>	<i>d<sub>ч.п.</sub></i>	<i>d<sub>ж</sub></i>	<i>Rz</i>	<i>A<sub>з.о.</sub></i>	<i>A<sub>1</sub></i>	<i>L</i>	<i>B<sub>з.о.</sub></i>	<i>v<sub>вх2</sub></i>	<i>p<sub>вых</sub></i>
Ед. изм.	мм								м/с	Па
Значение	200	10	4	0,05	30	20	10	15	30	10 <sup>5</sup>

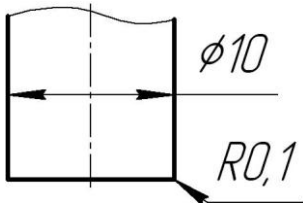
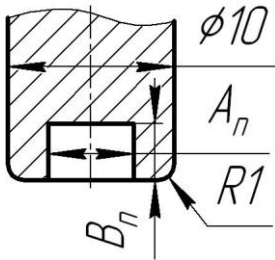
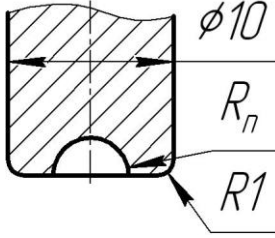
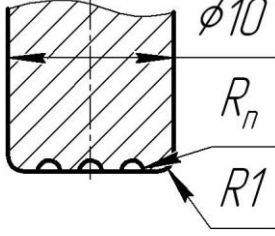
Параметр  $Rz$  в этой расчётной системе подразумевается равным половине высоты от допуска плоскостности пресс-формы. По итогам практических исследований мы определим этот параметр точнее после необходимого набора данных.

Нужно определить формы рабочей поверхности концентратора для определения различных вариантов. Для комплектности итоговой компоновки рабочих инструментов примем цилиндрические формы с заострёнными краями и плоской контактной поверхностью. В других случаях будут рассматриваться инструменты с округлыми формами кромок и с другими вариантами плоскости рабочих поверхностей очистки процессом интенсификации. Варианты конфигурации рабочей поверхности концентратора с параметрами и описанием приведены в таблице 2.

Строение компьютерной функциональной модели системы очистки

Общие описания моделирования программных средств. Для решения системы уравнений Навье-Стокса для вязкой жидкости, из приведённого ранее, как было сказано выше, нам нужно провести числовые вычисления моделирования систем гидродинамик для каждого случая значения параметров модели и инструмента.

Таблица 3 Исследуемые конфигурации рабочей поверхности волновода-концентратора

№ п/п	Эскиз	Параметры	Описание
1		$d_{ч.и.} = 10$ мм $R = 0,1$ мм	Исходная компоновка концентратора: сплошной цилиндр с острыми кромками
2		$d_{ч.и.} = 10$ мм $R = 1$ мм $A_n = 3$ мм $B_n = 1,5$ мм	Сечение с полостью прямоугольного профиля шириной $A_n$ , глубиной $B_n$ ; кромка наружной поверхности скруглена
3		$d_{ч.и.} = 10$ мм $R = 1,5$ мм $R_n = var$	Сечение с полостью полукруглого профиля радиусом $R_n$ ; кромка наружной поверхности скруглена. Рассмотрим несколько случаев с разными значениями $R_n$
4		$d_{ч.и.} = 10$ мм $R = 1$ мм $R_n = 1$ мм $N = 3$	Сечение с тремя последовательными полостями полукруглого профиля радиусом $R_n = 1$ мм;

			кромка наружной поверхности скруглена.
--	--	--	-------------------------------------------

### 3.2. Описание программного обеспечения для моделирования

В современном мире разработок и моделирования существует множество программ по моделированию гидродинамики. Конкретно в нашем случае было принято решение остановиться на программном обеспечении SALOME-MECA версии 5.1.3 с применением открытых исходных кодов, которые в свою очередь входят в дополнительный пакет программного обеспечения прикладных пакетов для расчёта научных и инженерных работ CAELinux 2015 года [102]. CAELinux-2015 Является набором программного обеспечения, существующая в системе Ubuntu, и вследствие чего получило огромный охват среди инженеров и научных работников, благодаря своей высокой производительности и не больших требований в ПК..

В пакетные комплекты инженерной программы SALOME-MECA 5.1.3 внедрены следующие программы такие как Salomé, Code\_Aster, Code\_Saturne и OpenFOAM. Первые две программ представляют из себя графические пре-/постпроцессор и реализация, моделирования прочностных моделирования конструкций. Продукты из второго пакета Code\_Saturne и OpenFOAM применяются для выполнения задач гидродинамики сред и распределения тепла в открытых средах.

Общий вид графического интерфейса программного комплекса показан на рисунке 24.

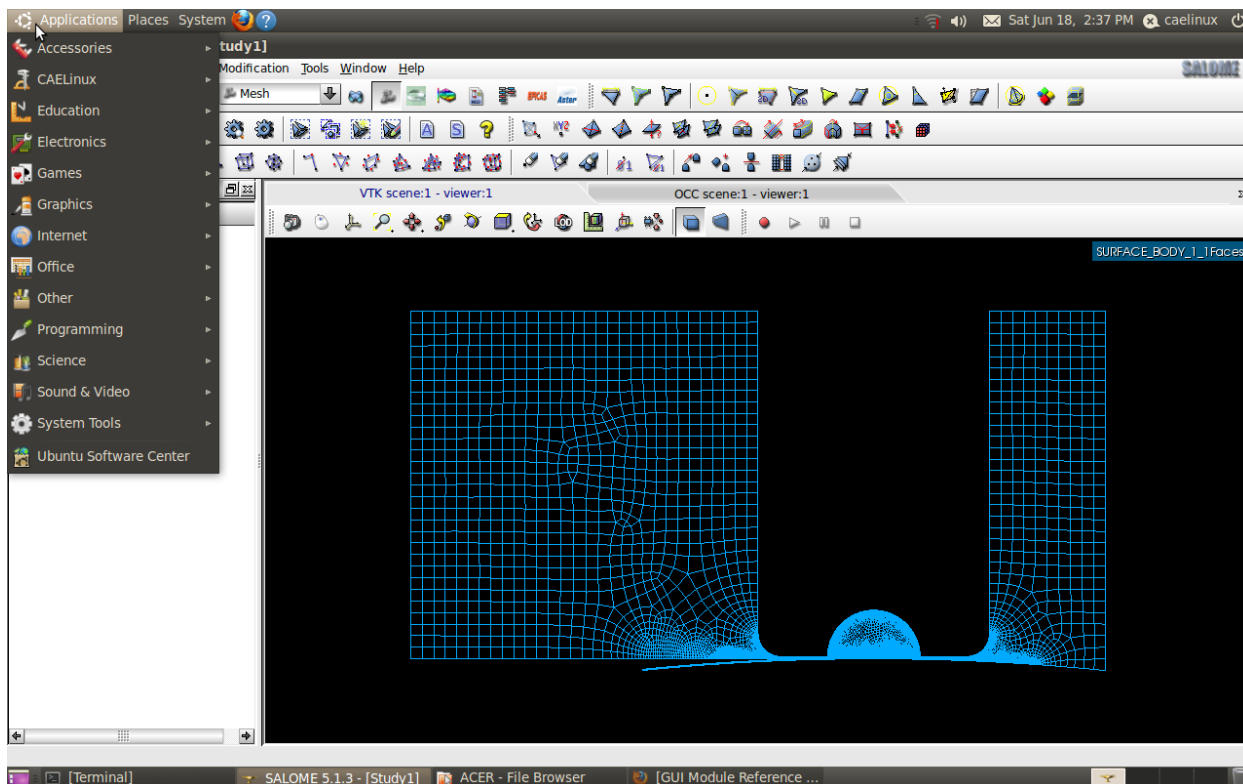


Рис. 24 Общий вид графического интерфейса *SALOME-MECA* 5.1.3

Задание параметров сетки конечных элементов. Построения сетки имеет ряд особенностей из-за конечных элементов решения задач вычисления гидродинамики. Пристеночные слои требуют высокие требования к качеству сетки, более высокого качества и мелкого размера. Так же требования к зонам образования жидкостных турбулентностей и газообразования (кавитации) в зоне волноводов, поэтому мы предъявляем требования и к зонам, поэтому для зоны №5, сетка конечных элементов из-за требований должна быть меньше. Данные замечания справедливы для каждого рассматриваемого случая моделирования поверхностей инструмента.

Принимаем для дальнейших расчётов шаг сетки конечных элементов равный  $t_1 = 0,7$  мм в зоне 7, и  $t_2 = 0,05$  мм в зонах 5 и 6.

Из справочных материалов берем параметры жидкой среды. Это нам потребуется для решения численного моделирования и решения уравнений, берем для решения жидкость плотностью и вязкостью равной:

- плотность  $\rho = 998,2$  кг/м<sup>3</sup>;
- кинематическая вязкость  $\mu = 0,001003$  кг/(м·с).

Константы, характеризующие « $k$ - $\varepsilon$ »-модель турбулентности и входящие в уравнения транспорта кинетической энергии турбулентности и транспорта диссипации турбулентности, принимаем равными стандартным для этой модели значениям, приведённым в литературе [44]:  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ;  $C_\mu = 0,09$ ;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .

Описание расчетной работы. В течение моделирования были выполнены моделирования расчетной системы с разными характеристиками. Данные параметров расположены в таблице 1.36 для системы расчетов для каждого случая. Расчётный случай 3, помимо первой серии экспериментов, входит также во все остальные. Теперь мы имеем 4 варианта испытаний, из которых 2 имеют по 4 опыта, а 2 из 3 опытов.

Обзор и анализ результатов моделирования. Принципиально интерес для анализа представляют следующие результаты моделирования:

– диаграммы расхождения давления в жидкостной системе – для построения зон высокого и низкого давлений, прогнозирования направления конвективных течений рабочей жидкости;

– диаграммы скоростей потоков жидкости, иллюстрирующие поле абсолютных или относительных амплитудных значений скоростей – для выявления зон наибольшей интенсивности движения среды в месте непосредственного контакта с очищаемым кругом;

– векторные диаграммы скорости течения, иллюстрирующие направление течения микро-струек жидкости в общем массиве потока – для выявления областей вихреобразования в зоне взаимодействия волновода-

концентратора и шлифовального круга и прогнозирования вымывания частиц шлама с поверхности абразива.

Таблица 4 Значения варьируемых параметров для расчётных случаев (матрица эксперимента)

Параметры	Значения параметров для эксперимента №										
	серия 1							серия 2	серия 3		серия 4
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Форма поверхности инструмента (таблица 2)	1	2	3	4	3	3	3	3	3	3	3
Зазор $\delta$ , мм	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,15	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Радиус полости $R_n$ , мм	-	-	2	0,75	2	2	2	1	3	2	2
Давление жидкости, $p_{COЖ}$ , кПа	500	500	500	500	500	500	500	500	500	250	750

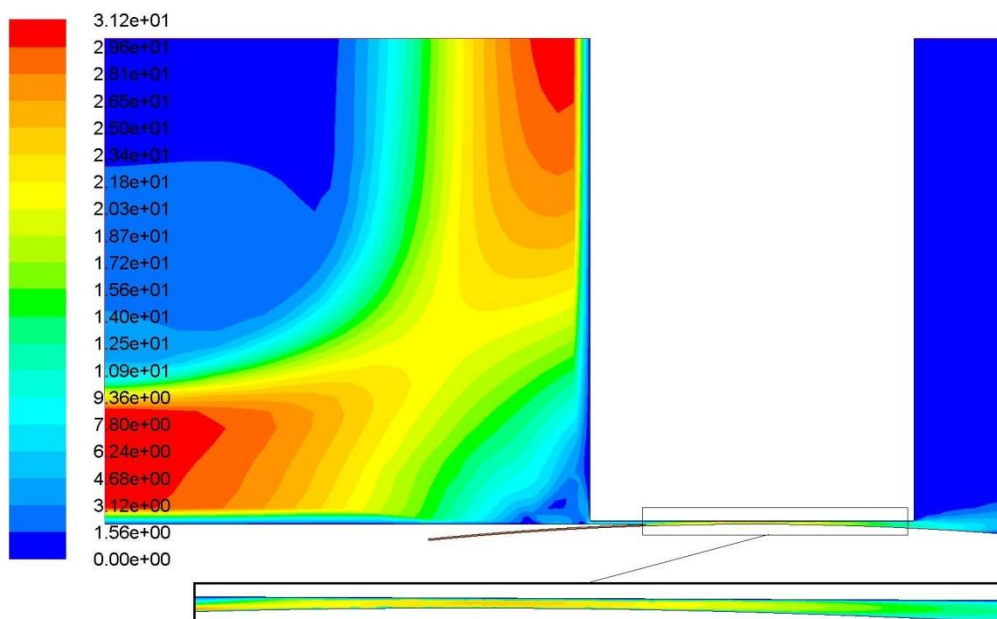
### 3.3. Результаты численного моделирования

Серия 1. Исследование свойств квитанционных режимов в жидкой среде зависит от форм обрабатываемых поверхностей генерирующего волновода. На рисунке 25 мы можем ознакомиться с диаграммами скоростей.

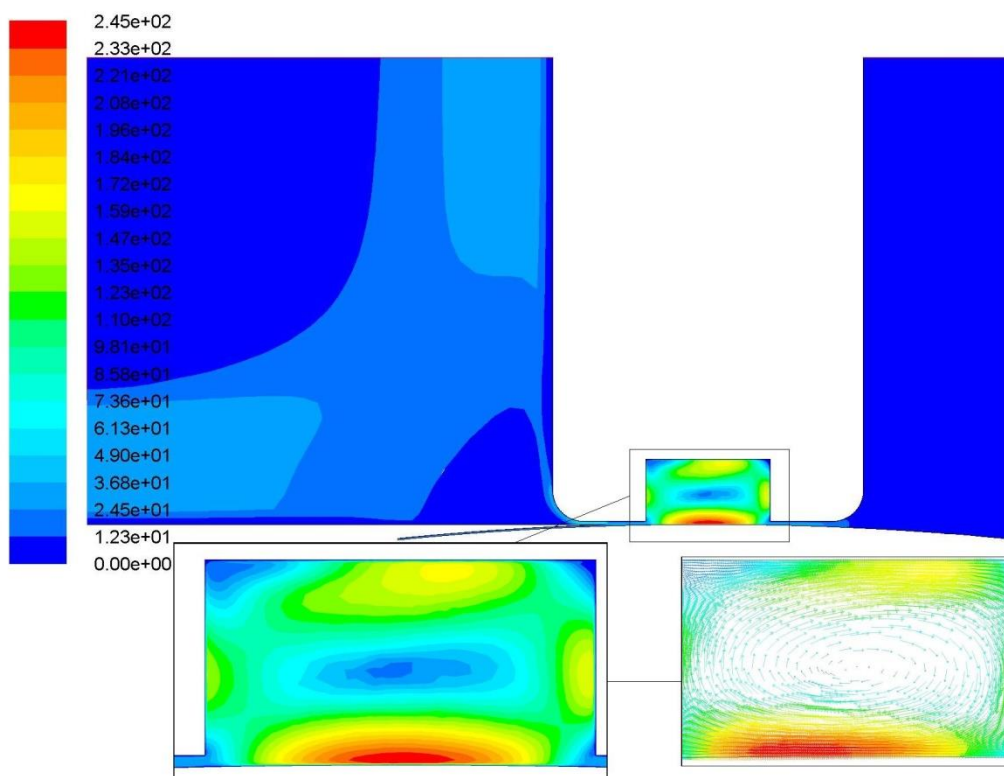
Как видно из результатов экспериментов скоростей из первых четырех мы видим следующие. В первом варианте наблюдается течение жидкости в системе, близкая к принципу ламинирования. В 4 опыте мы наблюдаем движение с малым попутным вихреобразованием, в доступно малых полостях генератора волн. В обоих случаях скорости протекания жидкости в зоне обработке не превышает скорости истечения жидкости из двух источников подачи в систем.

При анализе диаграмм скорости для двух других расчётных случаев (рисунок 25, б-в) мы наблюдаем противоположные результаты

экспериментов №2 и 3 их наличие более объемное, чем с результате 4 эксперимента, на рабочей полости и волноводом происходит высокое встречное образование воронок (направление движения жидкости противоположно направлению поступлению жидкости в зону б).

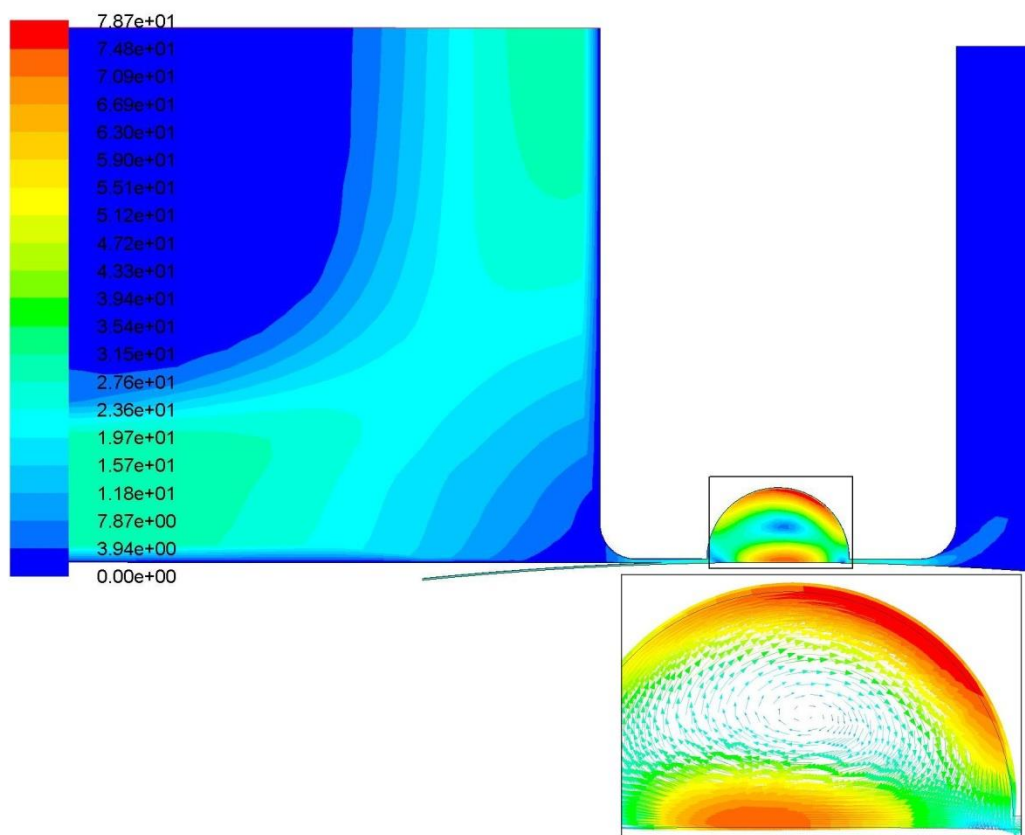


а) по результатам эксперимента №1

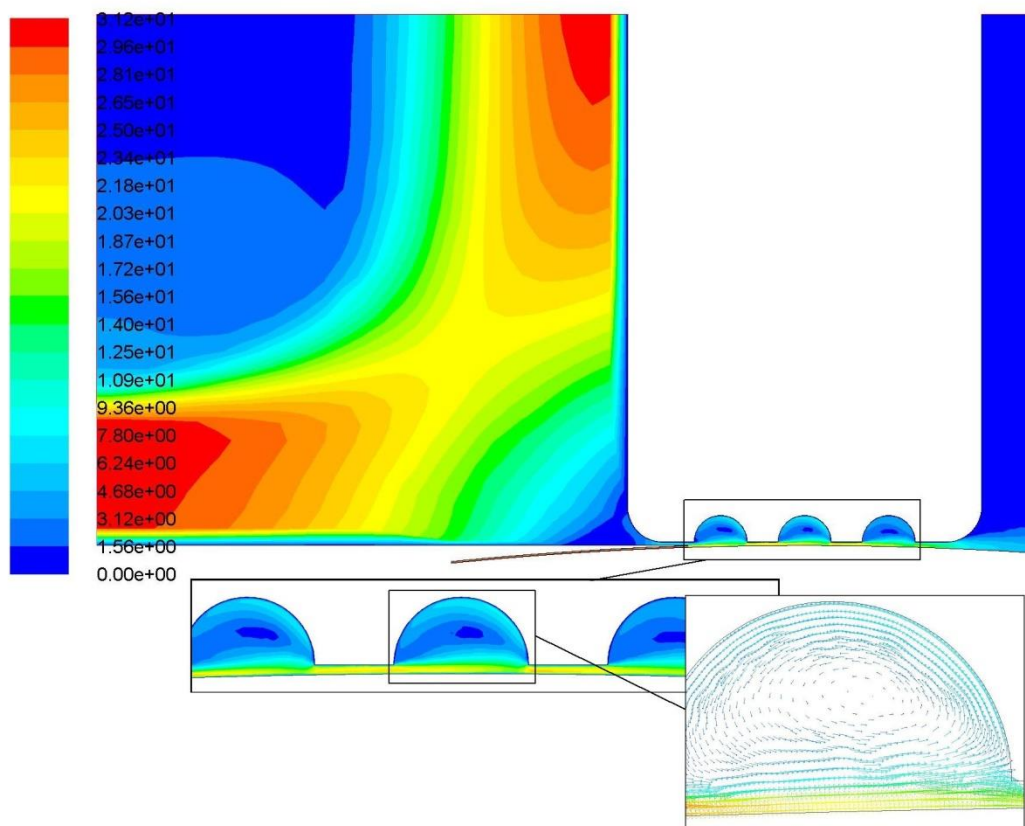


б) по результатам эксперимента №2

Рисунок 25 Диаграммы скоростей, м/с, экспериментов серии 1



в) по результатам эксперимента №3



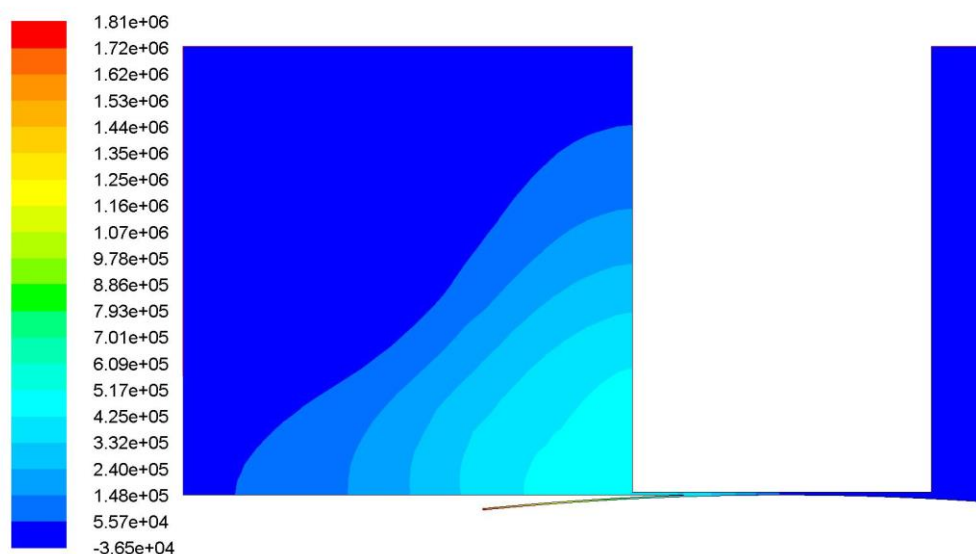


г) по результатам эксперимента №4

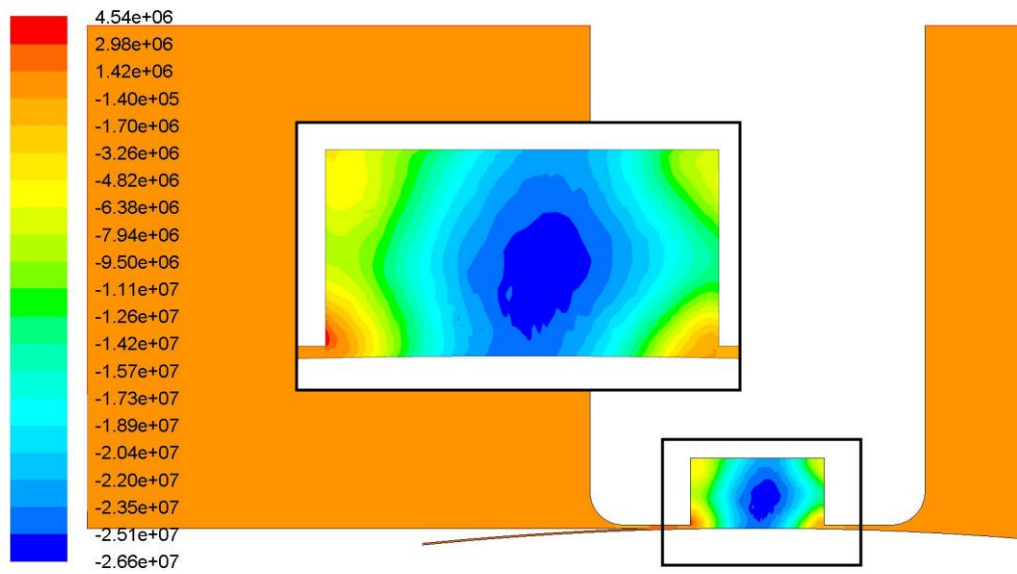
Рис. 25 Диаграммы скоростей, м/с, экспериментов серии 1

Так же замечаем ускорение потоков раствора на образование периферии значительных вихревых потоков: в 3 эксперименте скорость показало повышение более, чем в два раза по отношению к заданной скорости системы, равной скорости кавитации на обрабатываемой поверхности и составляет  $v_{max} = 69,9$  м/с; а в эксперименте №2 – превышает её практически в 3,5 раза на порядок выше эксперимента № 3.

В следствие составляем результаты полевых моделирований к статистическим давлениям жидкостей в системе подачи жидкости в первой системе экспериментальных исследований Диаграммы давлений представлены на рисунке 26.

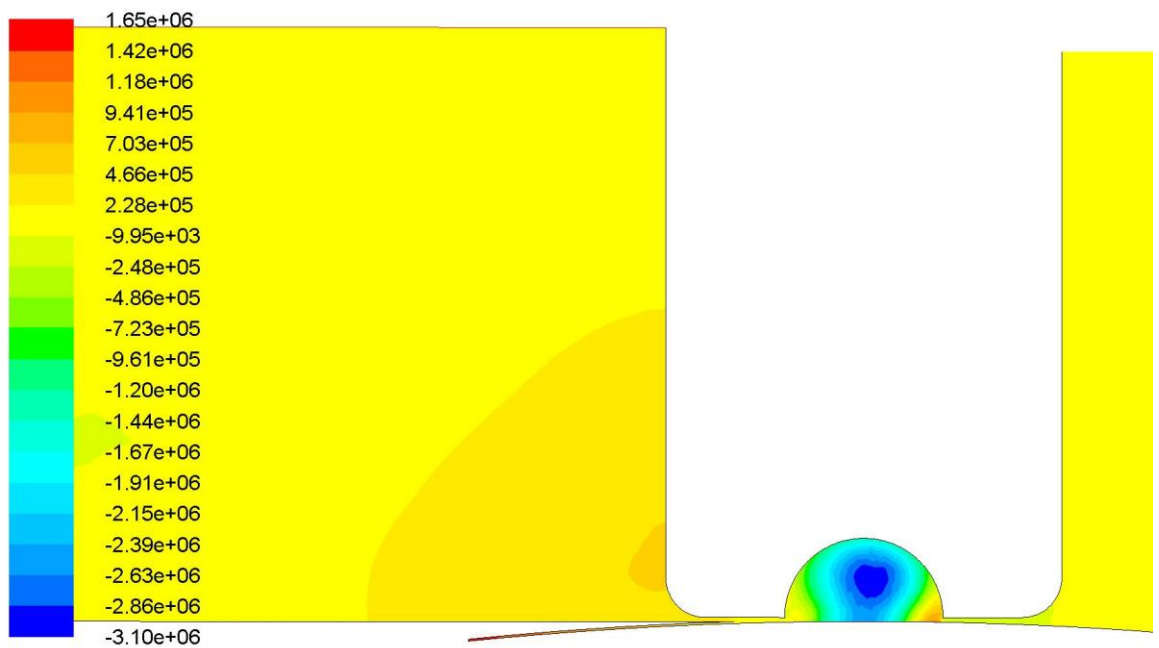


а) по результатам эксперимента №1

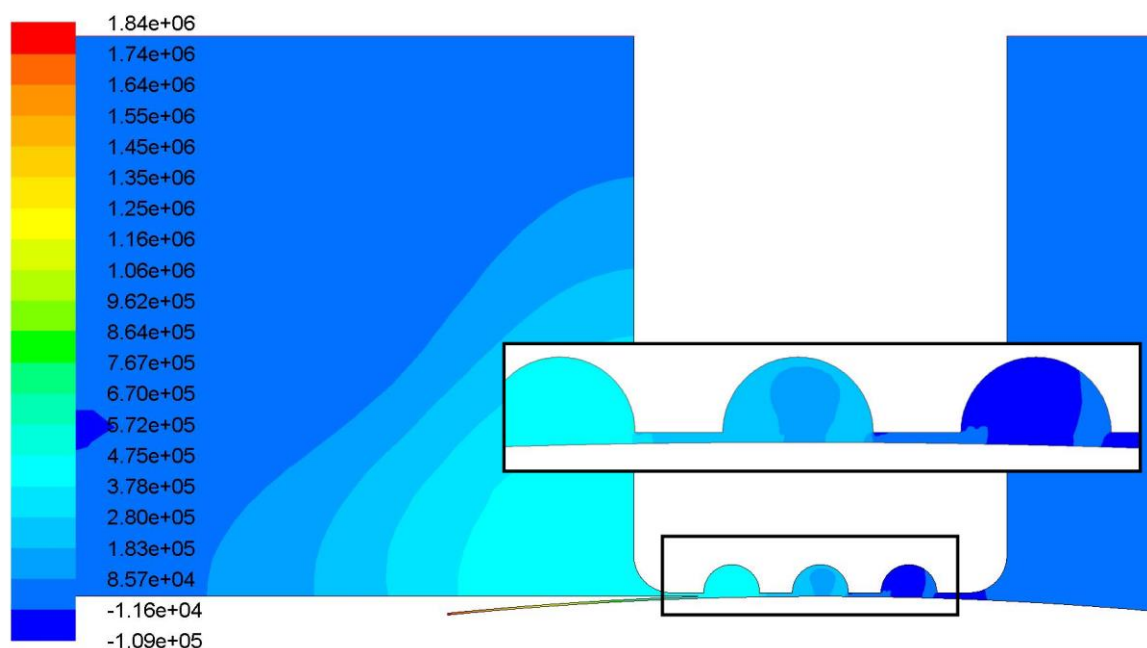


б) по результатам эксперимента №2

Рисунок 25. Диаграммы давлений, Па, экспериментов серии 1



в) по результатам эксперимента №3



г) по результатам эксперимента №4

Рис. 26 Диаграммы давлений, Па, экспериментов серии 1

Анализ результатов диаграмм давления, проведенных результатов первой серии визуального испытания, что различие значимости степени гидравлической системы так же как и скорость течения.

Самые любопытные результаты получены в диаграммах по 2 и 3 номером расчетных диаграмм (рисунок 26 б-в0) В полости, расположения рабочей поверхности коветационных установок, как показали результаты, что в зонах моделирования возникает сильное отрицательное давление. В зоне периферии жидкости происходит разрежения жидкости в эпицентре движения потоков. Происходит данное из-за разрежения среды в зоне действия жидкости движения замкнутой траектории под воздействием центробежной силы. В эксперименте №3 максимальное отрицательное давление составляет  $p_{\max 3} = 3,1$  МПа, во втором эксперименте –  $p_{\max 2} = 26,6$  МПа.

На других диорамах, мы видим явление локального возникновения области отрицательного давления не столь заметные. На 4 диаграмме они отличаются по уровню на третьем месте по значению давления жидкости в

площади волновода, и получаем результаты не превышающие одной атмосферы –  $p_{\max 4} = 0,1$  МПа. В базовой конструкции волноводов и генератора в виде сплошного изделия цилиндрической формы похожее явление не проявилось. По итогам результатом мы сводим все в диаграмму столбового вида значения максимальных отрицательных давлений все представлено на рисунке 27.

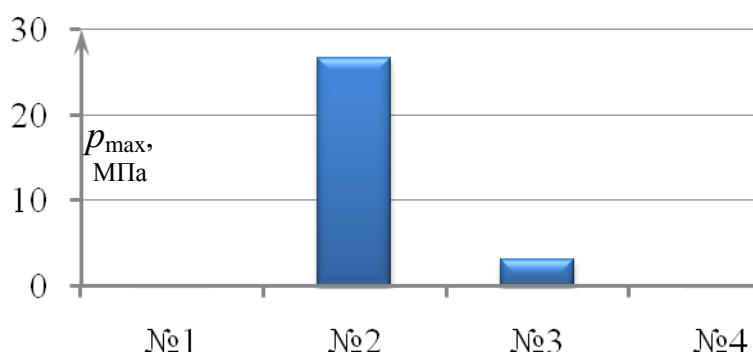


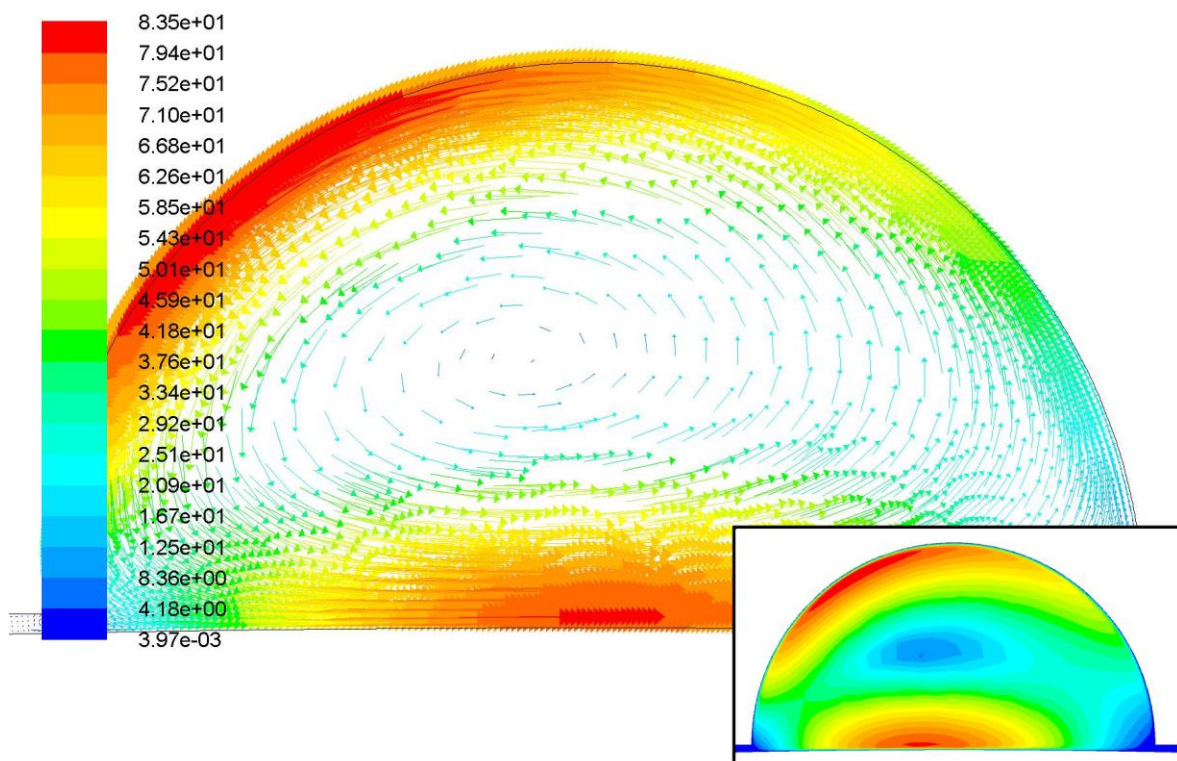
Рис. 27 Сравнение максимальных отрицательных давлений

Серия 2. Исследование характеристик кавитации в зависимости от зазора между инструментом и волноводом-концентратором. В базу берем исходные модели с конфигурацией инструментов полостными сечениями полукругами. Диаграммы скоростей жидкости в системе выносим на рисунке 28.

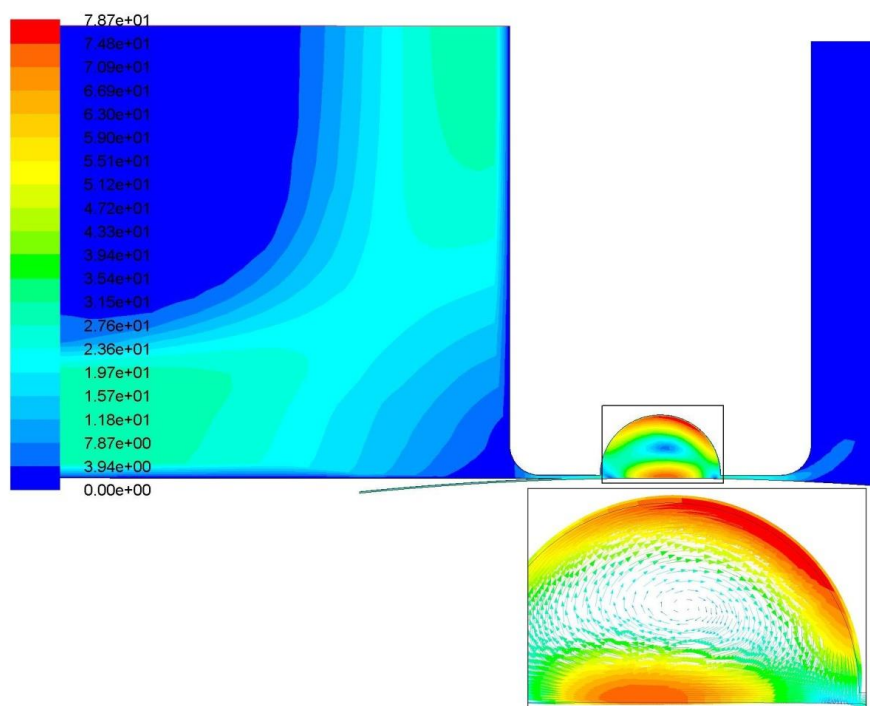
Из представленных результатов видим, что при увеличении зазора между обрабатываемой поверхностью и волноводами, происходит снижение ветреных сил и снижению интенсивности протекания жидкости. Отметим, что в моделирование с расстоянием зазоров 0,05 мм и 0,2 мм (рисунок 28, а, г) видется результат формирования попутных вихрей, с зазором 0,1 мм – встречного вихря (рисунок 28, б), расчётный случай с  $\delta = 0,15$  мм сочетает попутное и встречное закручивание потока (рисунок 28, в).

Итак, скорость течения жидкости во всех случаях имеет следующие результаты:

$v_{отн0,05} = 53,5 \text{ м/с}; v_{отн0,1} = 104,6 \text{ м/с}; v_{отн0,15} = 52,5 \text{ м/с}; v_{отн0,2} = 9 \text{ м/с}.$



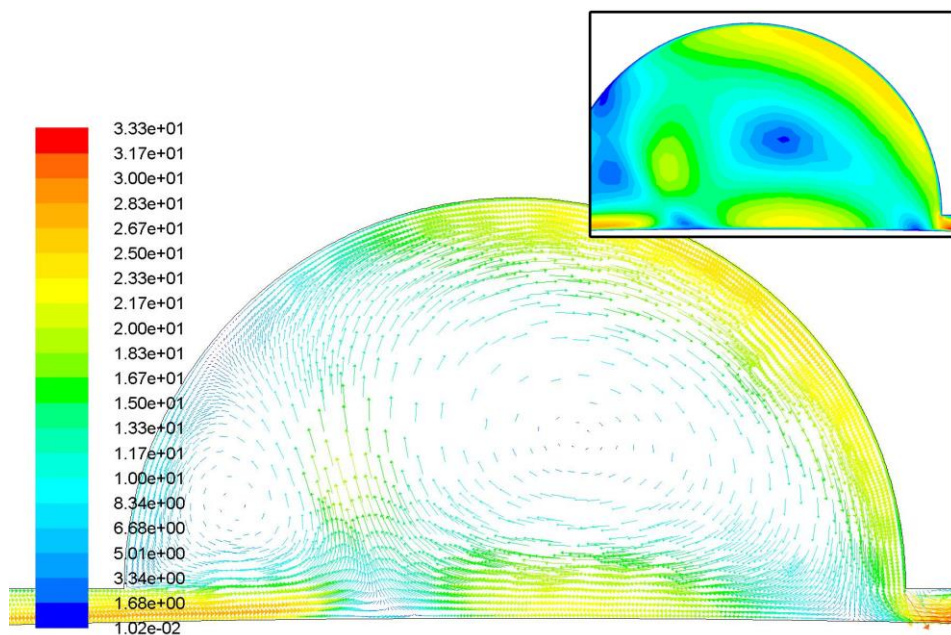
а) зазор  $\delta = 0,05 \text{ мм}$



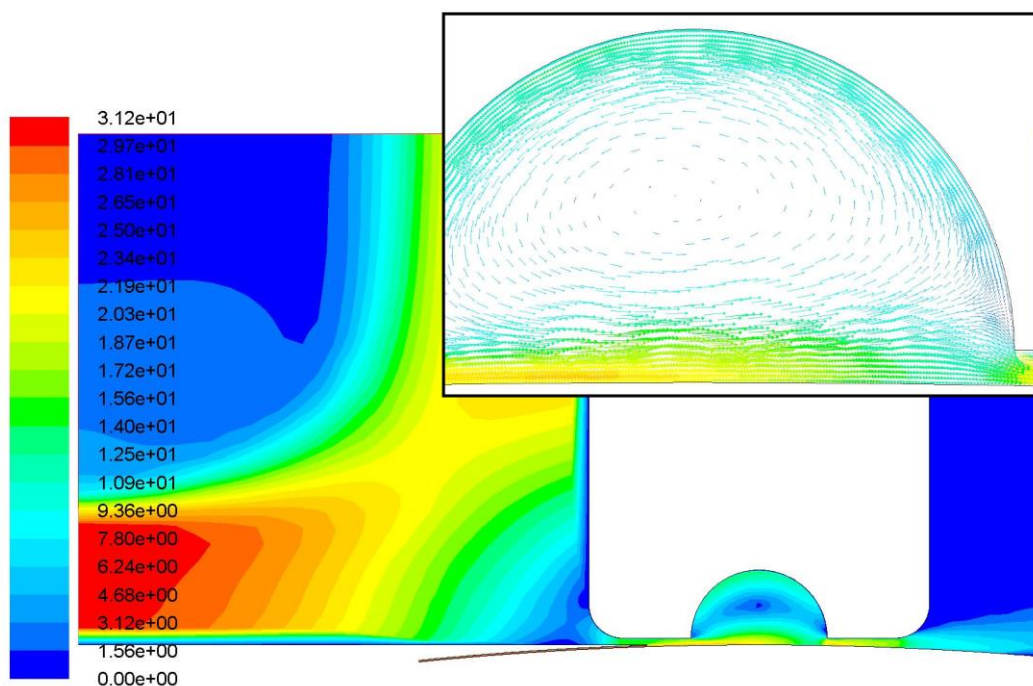
б) зазор  $\delta = 0,1 \text{ мм}$

Рис. 28 Диаграммы скоростей, м/с, экспериментов серии 2





в) зазор  $\delta = 0,15$  мм



г) зазор  $\delta = 0,2$  мм

Рис. 1.39 Диаграммы скоростей, м/с, экспериментов серии 2

График зависимости относительной скорости течения от зазора представлен на рисунке 28.

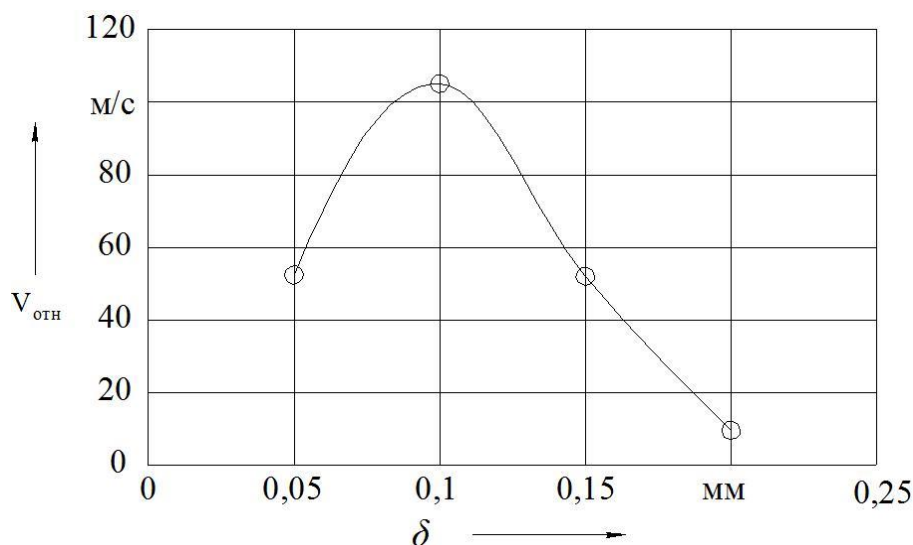


Рисунок 29 График зависимости относительной скорости течения от зазора

Далее мы рассмотрим влияние давления от величин зазора волноводов от поверхности деталей. Диаграммы отрицательных давлений, изображённые на рисунке 30.

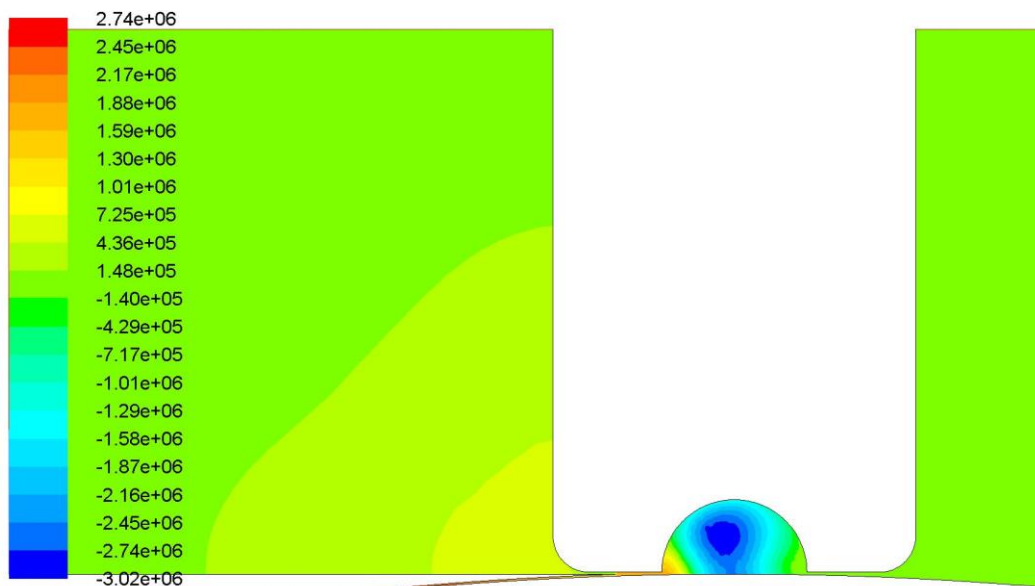
Из анализа диаграмм видно, что отрицательное давление при величине зазора  $\delta = 0,05$  мм и 0,1 мм расположены на одном уровне и примерно составляют 3 Мпа. В других случаях мы замечаем полное отсутствие давления.

График зависимости максимального отрицательного давления от зазора представлен на рисунке 30.

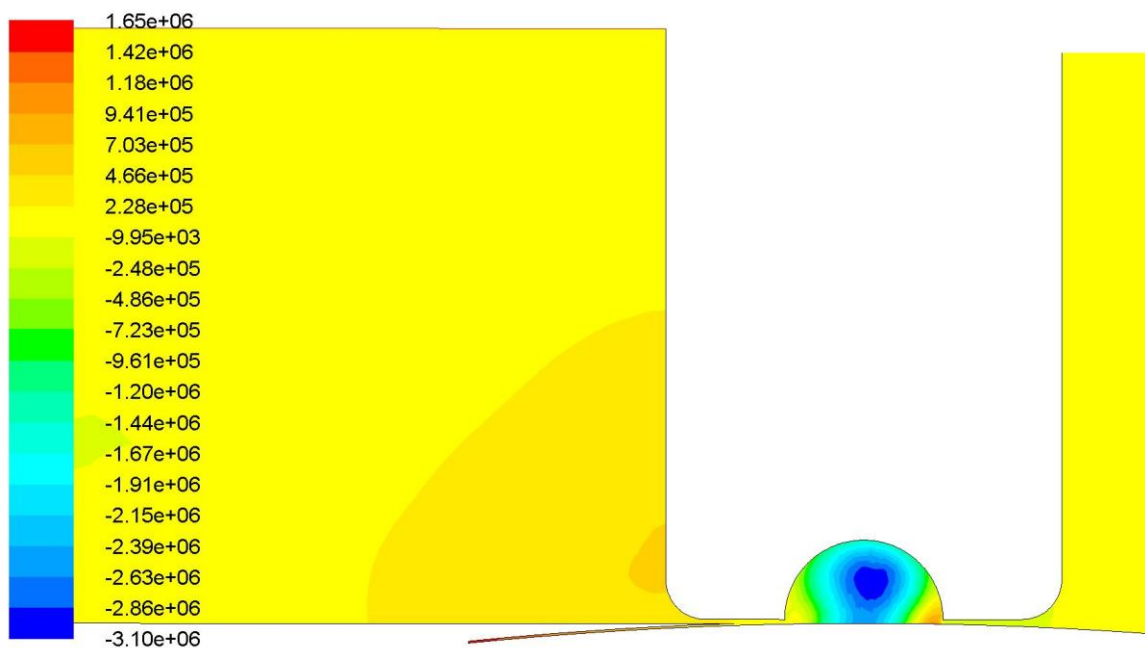
Подводя итоги эксперимента под номером 2: что существуют пороговые значения зазоров, при которых образуется давление, при увеличении которого мы замечаем, что проявляется отсутствие вихреобразования. В нашем случае порога, который нас устраивает со всех сторон равен 0,1 мм. Данное значение является лучшим со стороны скорости потока и эффективности кавитации.

Серия 3. Исследование характеристик системы по отношению. Очистки литниковой системы пресс-формы процесса очистки в зависимости от размера полости на поверхности волновода.

Диаграммы скоростей приведены на рисунке 3.10, диаграммы давлений – на рисунке 30.



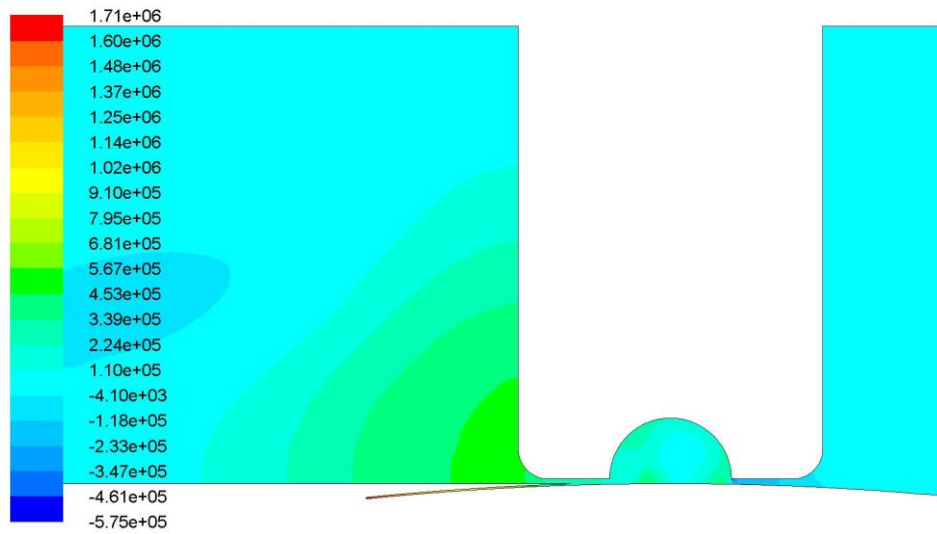
а) зазор  $\delta = 0,05$  мм



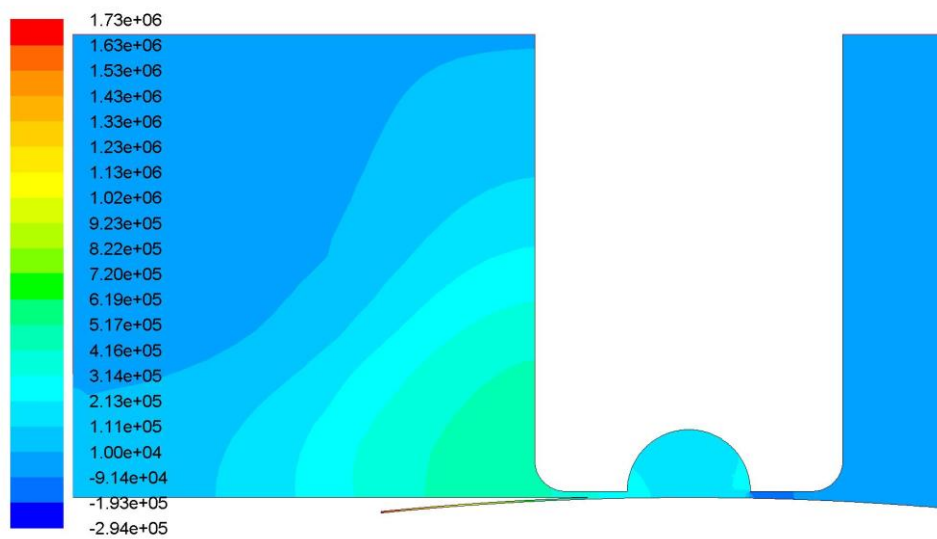
б) зазор  $\delta = 0,1$  мм

Рис. 30 Диаграммы давлений, Па, экспериментов серии 2





в) зазор  $\delta = 0,15$  мм



г) зазор  $\delta = 0,2$  мм

Рис. 30 Диаграммы давлений, Па, экспериментов серии 2

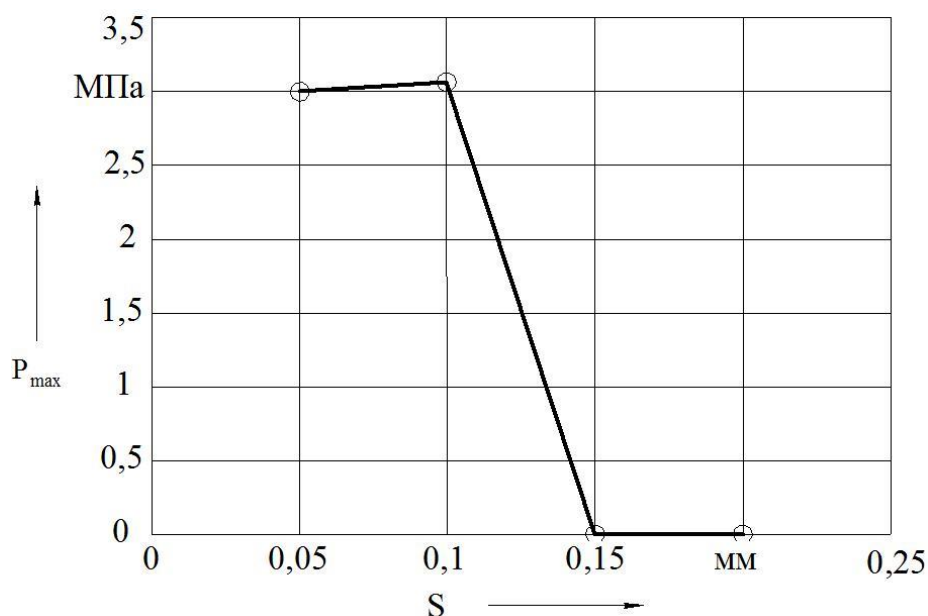


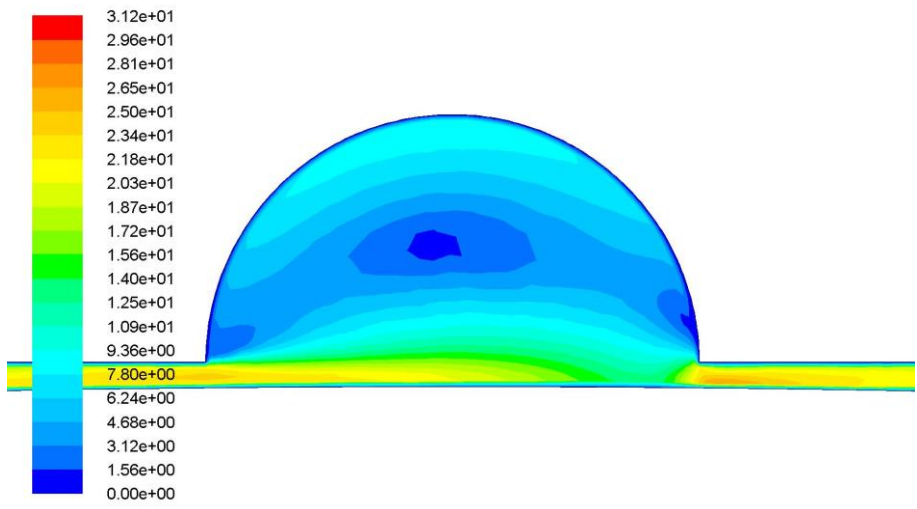
Рис. 31 График зависимости максимального отрицательного давления от зазора

Опираясь на результаты диаграмм построим графики эмпирических систем максимального отрицательного давления по отношению к скорости течения жидкости в зоне контакта от диаметра точки на поверхности волновода образующего волны ультразвука.

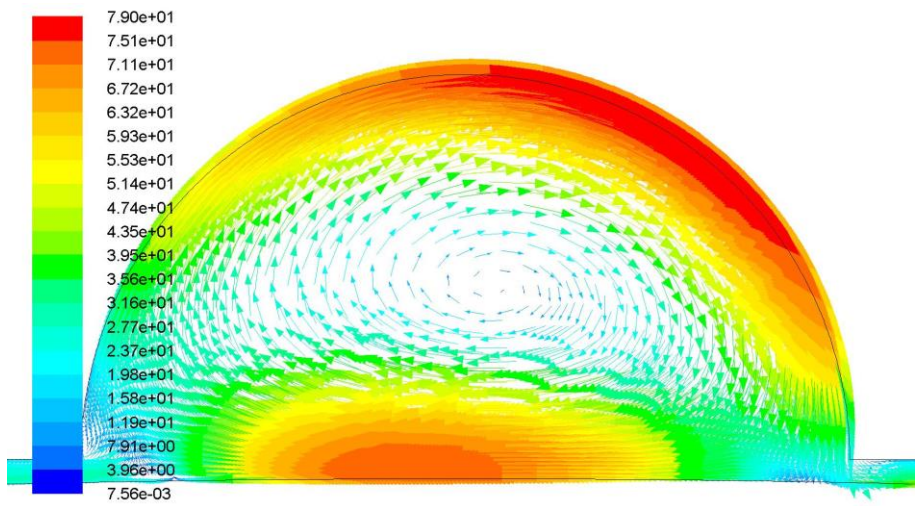
Вывод: зависимость между максимального отрицательного давления от полости диаметра и зависимости относительной скорости жидкости в зазоре расположенной на рабочей поверхности волновода-концентратора, носят характер только в области данного эксперимента.

Серия 4. Исследование характеристик кавитации в зависимости от давления подаваемой в зону жидкости.

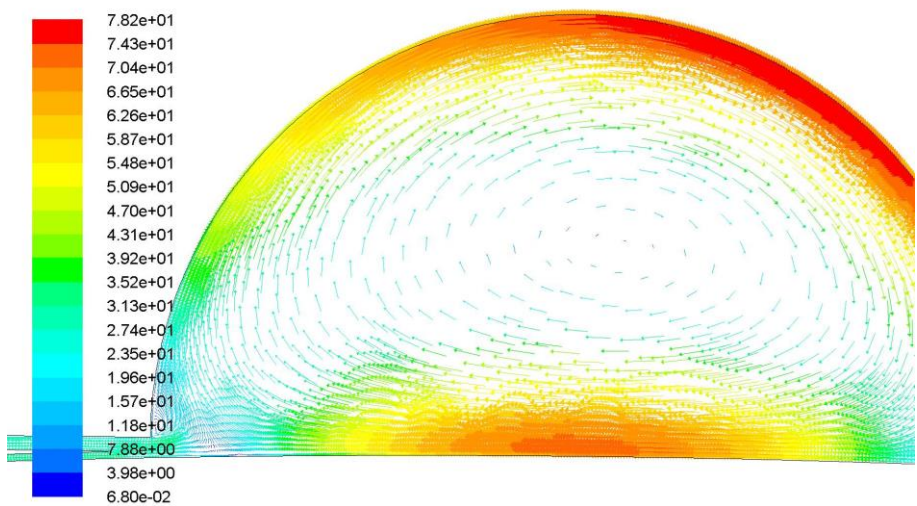
Серия 4 является заключительным этапом виртуальных испытаний модели гидродинамической системы очистки пресс-форм. На данном этапе эксперимента давления на входе в систему ультразвуковой установки работает в диапазоне от 150 кПа до 750 кПа с интервалом в 200 кПа.



а) диаметр полости 2 мм

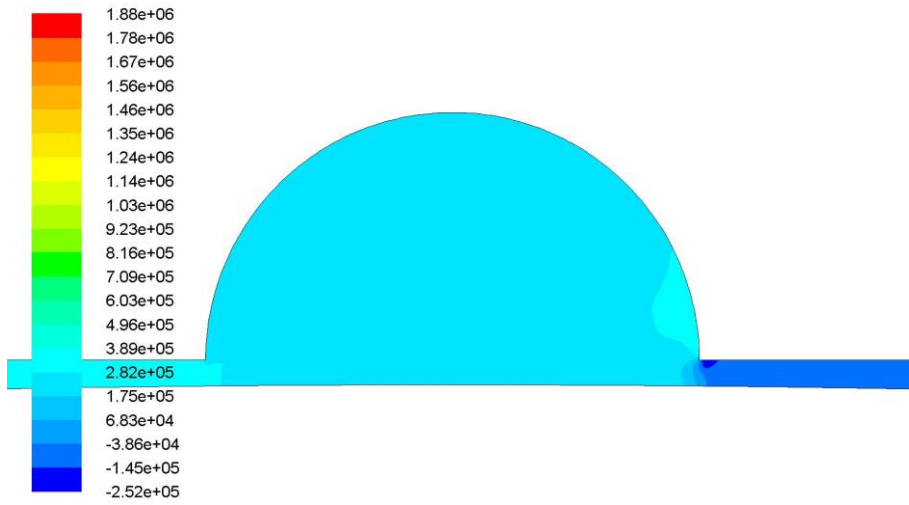


б) диаметр полости 4 мм

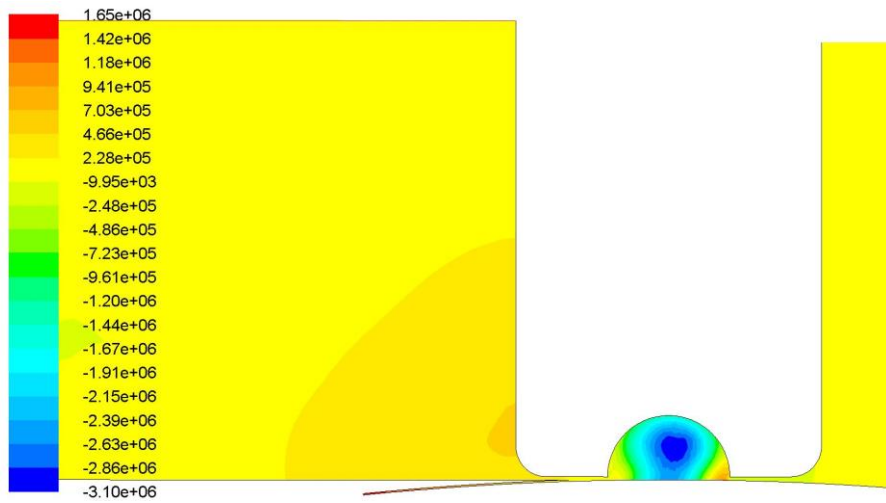


в) диаметр полости 6 мм

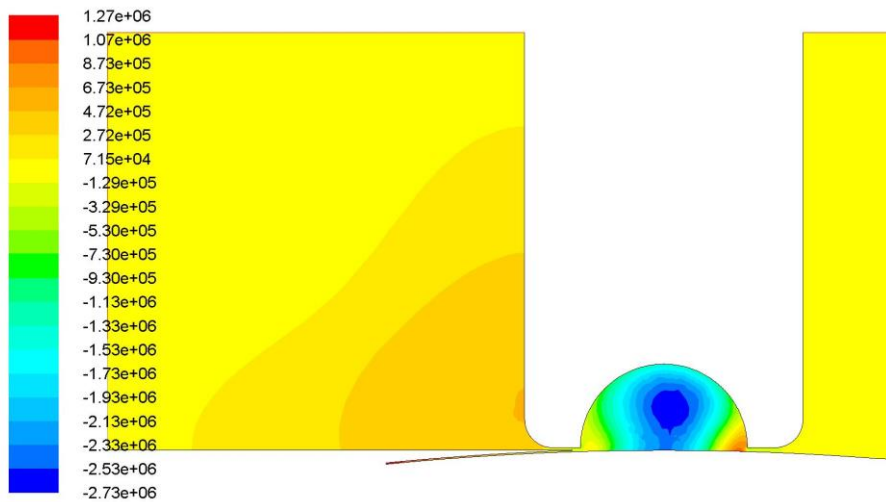
Рис. 32 Диаграммы скоростей при разных размерах полости



а) диаметр полости 2 мм



б) диаметр полости 4 мм



в) диаметр полости 6 мм

Рис. 32. Диаграммы давлений при разных размерах полости

Экспериментальные зависимости, аналогичные предыдущим сериям, представлены на рисунках 33, 34.

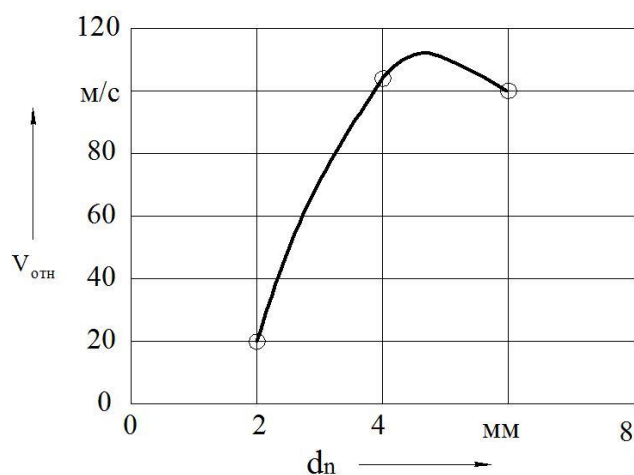


Рис. 33 График зависимости относительной скорости от диаметра лунки

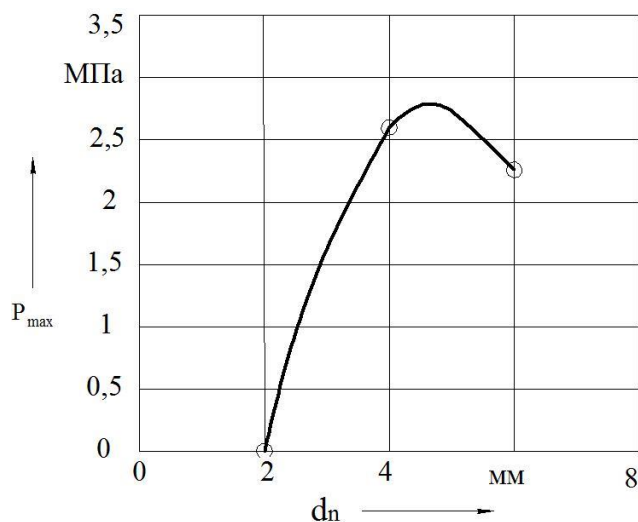


Рис. 34 График зависимости максимального отрицательного давления от диаметра лунки

### 3.4 Вывод

Полученные результаты характеристик кавитации от давления жидкости на входе получаем не нелинейный характер по возрастанию. По итогам графиков мы понимаем что получаем некое значение давления на

входе жидкости далее его повышение не дает нам никакого эффекта. По данным полученным ранее мы понимаем что значение напор жидкости несет постоянный характер, но для каждой системы ультразвуковой очистки он является своим. В связи с этим мы понимаем, что за счет этого параметра мы можем не только оптимизировать процесс очистки, но и подрегулировать его на нижние границы с целью оптимизации и экономии затрат на операцию и работы установки и получить высокое значение качества. Так же мы из графика мы подчёркиваем, что для нашего процесса это минимальный порог равен 400 к Па, при котором начинается процесс кавитации.

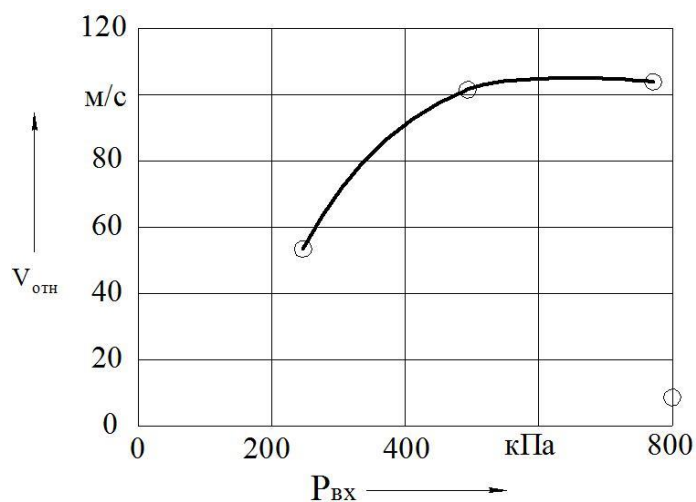


Рис. 35 График зависимости относительной скорости от давления подачи жидкости

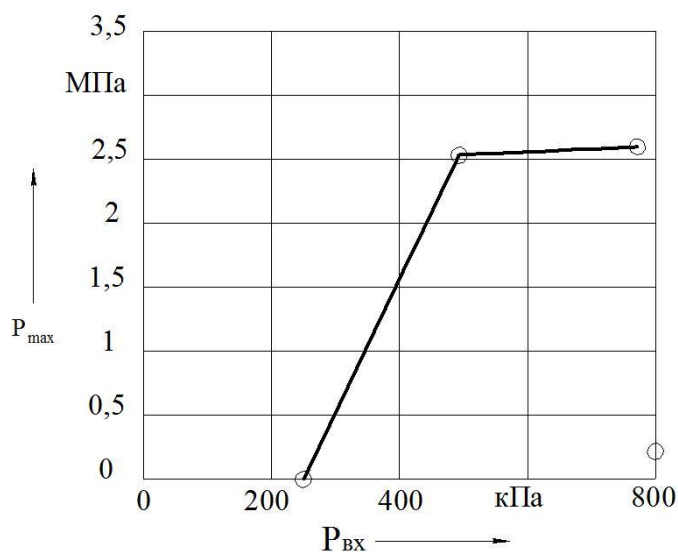


Рис. 36 График зависимости максимального отрицательного давления от давления подачи жидкости

Вихревые потоки жидкости возникают в свою очередь при подборе определённых параметров процесса очистки. Испытания моделирования показали, что подходящая для нас величина зазора между обрабатываемой поверхностью и наконечника волновода равняется диапазону от 0,1 мм до 0,15 мм. , а оптимальное значение давления жидкости на входе в в ультразвуковую установку равен  $p_{вх} = 500$  кПа. При больших значениях зазора формирования вихревых потоков практически не происходит, а меньших значений трудно достичь вследствие высокой шероховатости очищаемой поверхности оснастки. Если подводить итоги по давлению мы понимаем, что повышение его не целесообразно т.к. не приводит к никакому эффекту вихреобразования, но, а снижение вихревого потока. Также необходимым условием вихреобразования является наличие полости на рабочей поверхности очищающего инструмента. Для получения дополнительных данных по влиянию, геометрии полости на интенсивность образования турбулентностей, требует дополнительного изучения. Виртуальные эксперименты показали наличие экстремальной зависимости отрицательных давлений и скоростей от размеров входного сечения полости. Однако ряд экспериментов показал повышение интенсивности эффекта гидродинамической очистки при повышении объёма полости (серия 1, эксперимент 2) при одинаковом размере входного сечения полости. Это позволяет предположить, что имеется интегральный показатель, характеризующий геометрию полости и зависящий от её объёма и размера входного сечения, который влияет на вихреобразование в зоне очистки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного изучения научной литературы и по теме работы, выявлено моделирование и расчетный анализ воздействия волн ультразвуковой установки на воздействие поверхностей с оксидным загрязнением внутренних каналов литниковых систем в пресс-формах.

В ходе были разработаны иные методы использования очистных ванн ультразвука, для повышения эффективности работы оснастки для литья под давлением резино-технических изделий. Проведены расчеты оптимальных параметров работы волноводов и их формы. С учетом конструкции обрабатываемых изделий и их геометрические свойства.

В ходе работы и полученных результатов мы можем сформировать следующие выводы:

1. Разработанная методика очистки полностью удовлетворяет наши требования к качеству очистки изделий.
2. Методика моделирования дает нам точное понимание при каких параметрах и расположения оборудования и инструмента мы можем получить желаемый результат в очистке поверхности. Испытания моделирования показали, что подходящая для нас величина зазора между обрабатываемой поверхностью и наконечника волновода равняется диапазону от 0,1 мм до 0,15 мм. , а оптимальное значение давления жидкости на входе в ультразвуковую установку равен  $p_{вх} = 500$  кПа.
3. В нашем случае для поверхностей внутренних частей изделий, выдвинуто предложение по установке которые основаны для контактного действия излучателя колебаний с постоянной циркуляцией технической жидкости.
4. Расчёты динамических влияний на хрупкие и важные элементы оснастки которые влияют на их работу способность позволили нам



сделать вывод, что в критически хрупких местах при воздействии силы в 5 Мпа получили деформацию не более 2 мкм, что дает нам понять что у нашей конструкции хороший запас прочности каждого элемента, который подвергается ультразвуковым колебаниям.

5. Из приведенного моделирования, мы так же делаем вывод, что полученные результаты характеристик кавитации от давления жидкости на входе несут нелинейный характер по возрастанию. Из этого мы понимаем, что получаем некое значение давления на входе жидкости далее его повышение не дает нам никакого эффекта.

## Список используемой 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 АПИМ. 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, В.Ю. Карачаровский, Н.В. Бекренев // Производство, 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. // Научно-технические проблемы машиностроения. – 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 / Чернощечков 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. Экнадиосянц О.К. Получение аэрозолей / О.К. Экнадиосянц // 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: Саратов. 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).