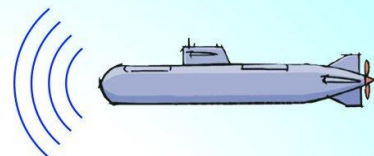
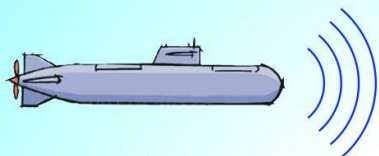


Хмелев В.Н.
Сливин А.Н.
Барсуков Р.В.
Цыганок С.Н.
Шалунов А.В.



ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Бийский технологический институт (филиал)
государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Алтайский государственный технический университет
имени И.И. Ползунова»

В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков,
С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Допущено научно-методическим советом БТИ АлтГТУ
для внутривузовского использования в качестве курса лекций
для студентов специальностей
240901 «Биотехнология», 240706 «Автоматизированное произ-
водство химических предприятий», 240701 «Химическая техно-
логия органических соединений азота», 240702 «Химическая
технология полимерных композиций, порохов и твердых ракет-
ных топлив», 260601 «Машины и аппараты пищевых произ-
водств»

Бийск
Издательство Алтайского государственного технического
университета им. И.И. Ползунова
2010

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 -- 2013 годы, ГК №П2518.

УДК 66.084.8

X-65

ББК 32.840

Рецензенты: профессор, член высшего экономического совета СФО, директор Ассоциации «Межрегиональный центр Наноиндустрии», к.т.н. Ю.И. Ладыгин; профессор кафедры ИУС, д.ф.-м.н В.Г. Ефимов

Хмелев, В.Н.

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

ISBN 978-5-9257-0187-4

Курс лекций посвящен применениям ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в различных отраслях промышленности и базируется на результатах современных научных исследований, проводимых предприятиями и организациями страны, а также на зарубежных научных публикациях последних лет.

В курсе изложены теоретические основы получения и распространения ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в жидких, твердых, газовых средах и полимерных термопластичных материалах. Практические результаты основаны на материалах исследований и разработок ультразвуковых аппаратов и технологий различного назначения, выполненных за последние двадцать лет авторами в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института (филиала) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Лекции предназначены для подготовки студентов специальностей и направлений: «Биотехнология», «Автоматизированное производство химических предприятий», «Химическая технология полимерных композиций, порохов и твердых ракетных топлив», «Химическая технология органических соединений азота», «Машины и аппараты пищевых производств», «Приборостроение», «Конструкторско-технологическое обеспечение автоматизированных машиностроительных производств», «Товароведение и экспертиза товаров (по областям применения)» – и могут быть рекомендованы для магистрантов, аспирантов и специалистов по материаловедению, машиностроению и приборостроению.

УДК 66.084.8

Рекомендовано и одобрено на заседании научно-методического совета Бийского технологического института Протокол № 7 от 1 июля 2010 г.

ISBN 978-5-9257-0187-4

© В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок,
А.В. Шалунов, 2010

© БТИ АлтГТУ, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ.....	8
1.1 Природа и свойства ультразвуковых колебаний.....	8
1.2 Отличительные особенности ультразвуковых колебаний.....	11
1.3 Использование ультразвуковых колебаний.....	11
1.4 Получение ультразвука человеком. Пьезоэффект.....	12
1.5 Области практического применения ультразвука.....	14
1.6 Практическое применение низкоэнергетических.....	14
ультразвуковых колебаний.....	15
1.7 Практическое применение высокоинтенсивных.....	17
ультразвуковых колебаний.....	17
2 ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ.....	22
2.1 Классификация ультразвуковых преобразователей.....	22
2.2 Пьезоэлектрические материалы.....	25
2.3 Пьезоэлектрические элементы.....	26
2.4 Пьезоэлектрические преобразователи.....	28
2.5 Концентраторы механических колебаний.....	29
2.6 Особенности ультразвукового технологического.....	31
оборудования.....	31
2.7 Ультразвуковые генераторы.....	32
2.8 Ультразвуковые колебательные системы.....	40
3 ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ.....	42
УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ.....	42
3.1 Ультразвуковая кавитация – основной действующий.....	43
фактор ускорения процессов в жидких средах.....	43
3.2 Процессы в химии.....	46
3.2.1 Зависимость скорости реакций от действия факторов.....	48
3.2.2 Эффект защиты.....	49
3.2.3 Процессы деполимеризации полимеров.....	50
3.2.4 Процессы полимеризации полимеров.....	51
3.3 Применение ультразвука в фармации.....	52
3.3.1 Процессы растворения.....	54
3.3.2 Процессы экстрагирования.....	55
3.3.3 Процессы эмульгирования.....	58
3.3.4 Процессы получения суспензий.....	59
3.4 Применение ультразвука в пищевых производствах.....	61
3.4.1 Процессы обработки мяса и рыбопродуктов.....	61
3.4.2 Процессы эмульгирования пищевых продуктов.....	63
3.4.3 Ультразвуковая обработка молока.....	66
3.4.4 Процессы приготовления сыров.....	67
3.4.5 Процессы приготовления соков.....	67
3.5 Применение ультразвука в сельском хозяйстве.....	69
3.6 Процессы ультразвукового осветления и очистки.....	70
жидкостей.....	70
3.7 Процессы кристаллизации.....	71
3.8 Процессы распыления жидкостей.....	72
3.9 Ультразвуковое распыление металлов и сплавов.....	75
3.10 Дегазация жидкостей.....	77
3.11 Ультразвуковое центрифугирование.....	77
3.12 Ультразвуковая очистка в жидкостях.....	78
3.13 Очистка сточных вод.....	80
3.14 Ультразвуковая стерилизация жидких сред.....	81
3.15 Процессы фильтрования.....	83
3.16 Процессы пропитки.....	83
3.17 Ультразвуковые аппараты и оборудование для ускорения процессов в жидких средах.....	84
3.17.1 Ультразвуковые аппараты для мелкодисперсного.....	88
распыления жидкостей.....	88

3.18 Ультразвуковые колебательные системы для ускорения процессов в жидких средах	89
4 ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДЫХ СРЕДАХ.....	97
4.1 Процессы размерной обработки и сверления	97
4.2 Безобразивная ультразвуковая финишная обработка металлов Шлифовка. Полировка	101
4.3 Процессы диспергирования.....	101
4.4 Ультразвуковые аппараты и оборудование для ускорения процессов в твердых средах	102
4.5 Ультразвуковые колебательные системы для ускорения процессов в твердых средах	103
5 ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССОВ В ПОЛИМЕРНЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ.....	108
5.1 Процессы сварки	108
5.2 Процессы формования и экструзии	112
5.3 Процессы прессования полимеров	114
5.4 Ультразвуковые аппараты и оборудование.....	115
для соединения полимерных материалов.....	115
5.5 Ультразвуковые колебательные системы для сварки и резки термопластичных материалов	117
6 ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ	122
6.1 Источники УЗ колебаний в газовых средах	122
6.2 Процессы коагуляции аэрозолей.....	123
6.3 Процессы массообмена. Абсорбция	126
6.4 Процессы акустической сушки	127
6.5 Процессы горения	131
6.6 Процессы пеногашения.....	133
6.7 Ультразвуковые аппараты и оборудование для ускорения процессов в газовых средах.....	135
6.8 Ультразвуковые колебательные системы для ускорения процессов в газовых средах.....	136
7 ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ЖИВЫЕ СИСТЕМЫ	141
7.1 Ультразвук и биологические системы	141
7.2 Предпосевная обработка семян.....	146
7.3 Применение ультразвука в медицине	148
7.3.1 Физиотерапевтическое воздействие ультразвука	148
7.3.2 Влияние ультразвука на молочную железу и лечение ее заболеваний	152
7.3.3 Ультразвук в офтальмологии	153
7.3.4 Влияние ультразвука на внутренние органы.....	154
7.3.5 Ультразвуковое лечение опухолей	155
7.3.6 Применение ультразвука в хирургии.....	156
7.3.7 Ультразвуковая липосакция	159
7.3.8 Ультразвуковые ингаляционные аппараты	163
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	172
ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	176

ВВЕДЕНИЕ

Двадцать первый век – век био- и нанотехнологий, всеобщей информатизации, электроники и ультразвука.

Ультразвук представляет собой волнообразно распространяющееся колебательное движение частиц среды и характеризуется рядом отличительных особенностей по сравнению с колебаниями слышимого диапазона. В ультразвуковом диапазоне частот сравнительно легко получить направленное излучение; ультразвуковые колебания хорошо поддаются фокусировке, в результате чего повышается интенсивность ультразвуковых колебаний в определенных зонах воздействия. При распространении в газах, жидкостях и твердых телах ультразвук порождает уникальные явления, многие из которых нашли практическое применение в различных областях науки и техники.

Прошло чуть более ста лет с начала исследований в области применения ультразвуковых колебаний. Первые лабораторные работы по исследованию ультразвука были проведены великим русским ученым-физиком П.Н.Лебедевым в конце XIX века, а за прошедшие сто лет развитием и применением ультразвуковых технологий занимались многие видные ученые в различных странах.

За это время в активе человечества появились десятки высокоэффективных, ресурсосберегающих и экологически безопасных ультразвуковых технологий. К их числу относятся: технологии закалки, лужения и пайки металлов, предотвращения образования накипи на теплообменных поверхностях, сверления хрупких и особо твердых материалов, сушки термолабильных веществ, экстрагирования животного и растительного сырья, растворения, стерилизации жидких веществ, мелкодисперсного распыления лекарственных препаратов, тяжелых топлив, получения эмульсий и сверхтонких суспензий, диспергирования красителей, сварки металлов и полимеров, мойки, очистки деталей без применения горючих и токсичных растворителей.

В последние годы ультразвук начинает играть все большую роль в промышленности и научных исследованиях. Успешно проведены теоретические и экспериментальные исследования в области ультразвуковой кавитации и акустических течений, позволившие разработать новые технологические процессы, протекающие при распространении ультразвука в жидкой фазе. В настоящее время формируется новое направление химии – ультразвуковая химия, позволяющая ускорить многие химико-технологические процессы и получить новые вещества. Научные исследования способствовали зарождению нового раздела акустики – молекулярной акустики, изучающей молекулярное взаимодействие звуковых волн с веществом. Возникли новые области применения ультразвука: интроскопия, голография, квантовая акустика, ультразвуковая фазометрия, акустоэлектроника.

Наряду с теоретическими и экспериментальными исследованиями в области ультразвука выполнено много практических работ. Разработаны универсальные и специальные ультразвуковые станки, установки, работающие под повышенным статическим давлением, ультразвуковые механизированные установки для очистки деталей, генераторы с повышенной частотой и новой системой охлаждения, преобразователи с равномерно распределенным полем. Созданы и внедрены в производство автоматические ультразвуковые установки, которые включаются в поточные линии, позволяющие значительно повысить производительность труда.

Развитие и применение ультразвуковых технологий открывает в настоящее время новые перспективы в создании новых веществ и материалов, в придании известным материалам и средам новых свойств (стерильность, наноразмерность и т.п.) и поэтому требует понимания явлений и процессов, происходящих под действием ультразвука, возможностей новых технологий и перспектив их применения.

Учебное пособие призвано предоставить читателю информацию о свойствах и возможностях ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, особенностях применения ультразвуковых колебаний для интенсификации процессов, протекающих в жидких, твердых, газообразных средах, полимерных материалах, применительно к решению проблем химической, биотехнологической, пищевой промышленности и смежных отраслей промышленности.

В курсе лекций рассматриваются вопросы получения и распространения ультразвуковых колебаний в различных средах, изучаются теоретические основы процессов, ускоряемых под воздействием ультразвуковых колебаний, исследуются практические конструкции применяемых источников ультразвуковых колебаний и ультразвуковых аппаратов, анализируются их функциональные возможности для решения практических проблем различных производств.

Большинство разработок, исследований и представленных достижений основываются на работах, проведенных авторами в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института (филиала) Алтайского Государственного технического университета имени И.И. Ползунова.

Курс лекций предназначен для студентов, магистрантов, аспирантов, инженеров и технологов, разрабатывающих и эксплуатирующих современное ультразвуковое оборудование, а также специалистов, занимающихся разработкой и реализацией новых технологий.

Лекции будут полезны для всех желающих приобрести новые знания об интереснейших физических явлениях, связанных с получением и применением ультразвуковых колебаний.

Авторы выражают благодарность директору Бийского технологического института д.т.н., профессору Леонову Геннадию Валентиновичу и декану факультета химической технологии и машиностроения Бийского технологического института к.х.н., профессору Севодину Валерию Павловичу за понимание

необходимости подготовки специалистов, обладающих современными знаниями по ультразвуковым технологиям, и включение в учебные планы специальностей факультета курсов, связанных с применением ультразвука.

Авторы благодарят всех сотрудников лаборатории акустических процессов и аппаратов, принимавших участие в подготовке учебного курса, изготовлении лабораторных стендов и проведении исследований, результаты которых использованы в качестве примеров, подтверждающих эффективность различных ультразвуковых технологий.

1 УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ

1.1 Природа и свойства ультразвуковых колебаний

Если в сплошной среде – газах, жидкостях или твердых телах – частицы среды окажутся выведенными из положения равновесия, то упругие силы, действующие на них со стороны других частиц, будут возвращать их в положение равновесия. При этом частицы будут совершать колебательное движение. Распространение упругих колебаний в сплошной среде представляет собой волнообразный процесс.

Колебания с частотой от единиц Герц (Гц) до 20 Герц называются инфразвуковыми, при частоте от 20 Гц до 16–20 кГц колебания создают слышимые звуки. Ультразвуковые колебания соответствуют частотам от 16–20 кГц до 10^8 Гц, а колебания с частотой более 10^8 Гц получили название гиперзвуков [1]. На рисунке 1.1 показана логарифмическая шкала частот, выполненная на основе выражения $lg_2 f = 1, 2, 3 \dots, n$, где 1, 2, 3 ..., n – номера октав.

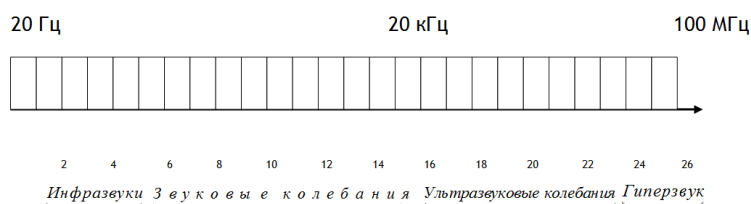
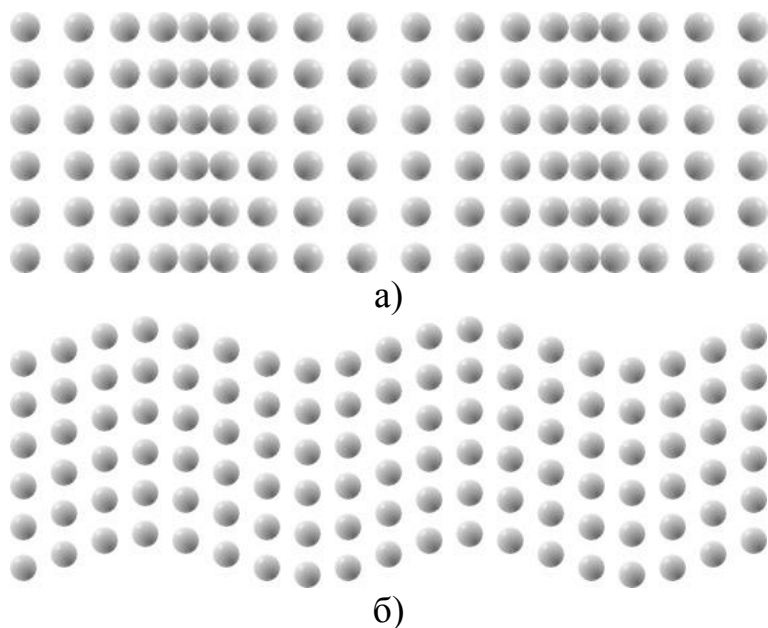


Рисунок 1.1 – Диапазоны упругих колебаний в материальных средах

Физическая природа упругих колебаний одинакова во всем диапазоне частот. Для понимания природы упругих колебаний рассмотрим их свойства.

Форма волны – это форма волнового фронта, т.е. совокупности точек, обладающих одинаковой фазой. Колебания плоскости создают плоскую звуковую волну, если излучателем служит цилиндр, периодически сжимающийся и расширяющийся по направлению своего радиуса, то возникает цилиндрическая волна. Точечный излучатель, или пульсирующий шарик, размеры которого малы по сравнению с длиной излучаемой волны, воздает сферическую волну.

Звуковые волны подразделяются по *типу волн*: они могут быть продольными, поперечными, изгибными, крутильными в зависимости от условий возбуждения и распространения. В жидкостях и газах распространяются только продольные волны, в твердых телах могут возникать также поперечные и другие из перечисленных типов волн. В продольной волне направление колебаний частиц совпадает с направлением распространения волны (рисунок 1.2, а), поперечная волна распространяется перпендикулярно направлению колебаний частиц (рисунок 1.2, б) [2].



а) – движение частиц среды при распространении продольной волны; б) – движение частиц среды при распространении поперечной волны
 Рисунок 1.2 – Движение частиц при распространении волны

Любая волна как колебание, распространяющееся во времени и в пространстве, может быть охарактеризована *частотой*, *длиной волны* и *амплитудой* (рисунок 1.3) [3]. При этом длина волны λ связана с частотой f через скорость распространения волны в данном материале c :

$$\lambda = c/f.$$

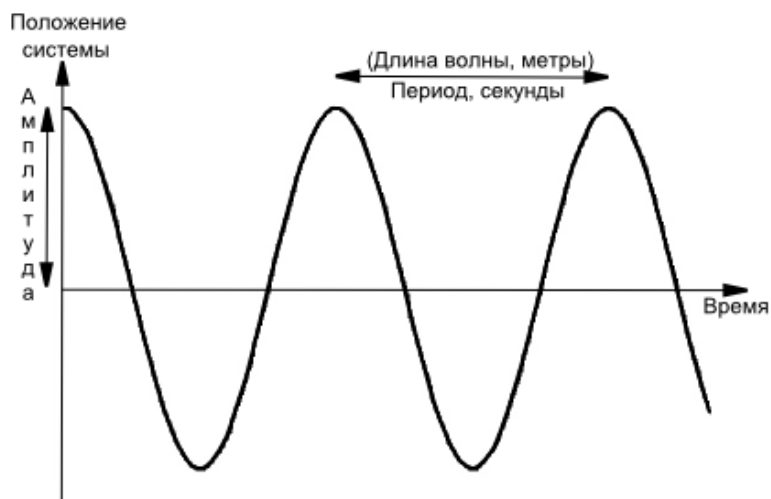


Рисунок 1.3 – Характеристики колебательного процесса

Частота – это количество колебаний, совершаемых системой в единицу времени; длина волны – это расстояние, которое проходит волна за время, рав-

ное периоду колебаний T ($T = 1/f$), т.е. за время, затраченное на одно колебание; амплитуда колебаний – это максимальное отклонение колебательной системы от положения равновесия.

По своей физической природе звуковые и ультразвуковые колебания ничем друг от друга не отличаются. Это упругие колебания в материальных средах. Рассмотрим, какими параметрами можно охарактеризовать волну.

Длина волны λ – это расстояние, которое проходит волна, пока частица среды совершает одно колебательное движение. Расстояние между соседними максимумами или минимумами возмущения считают длиной волны.

Амплитуда колебаний A представляет собой максимальное смещение частицы из положения равновесия во время ее колебательного движения, вызванного возбуждением частиц среды.

Частота колебаний f – это число колебаний, совершаемых частицей среды за одну секунду. Единицей частоты является Герц (Гц). Для звуковых волн, генерируемых средой, характерен непрерывный ряд или диапазон частот. Самая низкая частота волны называется основной, или собственной, а остальные являются гармониками, или обертонами. Частота второй гармоники в два раза превышает собственную частоту системы. Аналогично частота третьей гармоники превышает ее в три раза и т.д.

Период колебаний T – это время, необходимое частице для совершения одного колебательного движения. По определению время, за которое волна производит f колебаний, равно 1 секунде.

Колебание – это возвратно-поступательное движение из одного крайнего положения в другое и обратно через положение равновесия.

Фаза колебаний φ – это отношение смещения колеблющейся частицы в данный момент времени к его амплитудному значению. Если точки колебательного процесса находятся в одной фазе (их разность фаз составляет 2π), то расстояние между этими двумя точками равно одной длине волны λ .

Скорость распространения колебаний C – это расстояние, пройденное волной за одну секунду.

Рассмотрим особенности ультразвуковых колебаний.

Обычно границей начала ультразвукового диапазона частот принято считать 16–20 кГц. Следует отметить, что столь большой диапазон выбран по той причине, что для каждого человека граница ультразвука (неслышимости звука) своя. Для некоторых это 10 кГц, для других – 20 кГц, а встречаются уникальные люди способные воспринимать и 25 кГц.

Еще более сложная проблема с определением верхней границы ультразвукового диапазона. Возможности человеческого уха здесь не играют роли, и приходится отталкиваться от физической природы упругих колебаний, которые могут распространяться в материальной среде при условии, длина волны больше межатомных расстояний.

Длина их волны пропорциональна $1/f$. $\lambda = c/f$. На основании исследований установлено существование УЗ колебаний с частотой, большей чем 100 МГц. УЗ более высокой частоты затухает настолько, что колебания поглощаются непосредственно у поверхности излучателя.

На практике используются УЗ колебания с частотой до 25 МГц [2, 3]. Колебания таких высоких частот могут распространяться только в кристаллах.

Рассмотрим далее отличительные особенности ультразвуковых колебаний.

1.2 Отличительные особенности ультразвуковых колебаний

1. Ультразвуковые колебания, имея большую частоту f , в сравнении со звуковыми колебаниями при одинаковой скорости распространения, характеризуются значительно более короткими длинами волн. Ультразвуковые колебания в различных средах с длиной волны, не превышающей 1...10 мм, по своим свойствам аналогичны световым лучам. Это позволяет не только фокусировать колебания, но и формировать направленное излучение, то есть направлять энергию в нужном направлении и сосредотачивать ее в нужном объеме.

2. УЗ колебания могут распространяться в любых материальных средах (в прозрачных и непрозрачных средах, проводниках и диэлектриках и т.п.), что позволяет использовать их для исследования и воздействия на полимеры, металлы, жидкости, газы и др.

3. Мощность ультразвуковых колебаний, распространяемых в средах, пропорциональна квадрату частоты, и поэтому, в отличие от мощности звуковых колебаний очень велика. Мощность ультразвуковых колебаний может достигать сотен киловатт, а интенсивность (энергия, распространяемая через единицу площади в единицу времени) – 1...1000 Вт/см². При таких интенсивностях ультразвукового воздействия внутри материальных тел может распространяться очень большая энергия механических колебаний. В ходе распространения волны (в колебательном процессе) возникают перепады звукового давления, превышающие десятки МПа.

Кроме того, не следует забывать, что это давление меняет свой знак, переходя в разрежение с частотой, большей 20 тысяч раз в секунду.

Возможность ввода огромных энергий позволяет повышать эффективность множества различных технологических процессов [4], создавать новые материалы, получать новые вещества, решать многие вопросы технологического контроля и измерений. Эти свойства положены в основу применения УЗ.

1.3 Использование ультразвуковых колебаний

В настоящее время активно развивается новая область знаний – биоакустика, изучающая формы, способы и системы звукового общения [1]. Оказывается, многие живые существа в процессе эволюции научились использовать ультразвуковые колебания для ориентации в пространстве.

Ученые выявили множество различных примеров использования ультразвука животными. Чаще всего это сигналы предупреждения об опасности, выражения угрозы, удовлетворения, победы и т.д.

Развитие биоакустики подогревается не праздным любопытством, а требованиями практики. Знания, добываемые биоакустикой, используются при проектировании новых приборов.

Примеры использования полученных знаний: охрана от птиц аэродромов, защита полей от вредителей, управление поведением стадных животных.

Наиболее широко ультразвук используется обитателями морей. Установлено, что в воде УЗ распространяется со скоростью 5300 км/ч. Ничто не может двигаться в воде быстрее, чем УЗ колебания. Если в воздухе источник мощностью в 100 кВт слышен на расстоянии 15 км, то в воде источник мощностью 1 кВт распространяется до 100 км. Вода прозрачна для ультразвука, как воздух для света. Колебания, излучаемые рыбами, креветками и другими морскими животными, позволяют обнаруживать их рыбакам. Эти же излучения позволяют определять местонахождение косяка рыб и его размеры.

Многие представители животного мира имеют возможность принимать и воспроизводить УЗ. Так, например, морская свинка, сова, серая мышь, барсук, водяные жуки, некоторые ночные бабочки воспринимают звуки с частотой до 100 кГц. Собаки и лошади слышат УЗ. Летучие мыши, дельфины, киты не могут существовать без использования ультразвука – он заменяет им зрение.

Принцип ориентации летучих мышей и дельфинов – эхолокация. Летучая мышь способна обнаруживать в полете препятствия в виде проволочек диаметром 0,08 мм (в 24 раза меньше по размерам, чем допускают теоретические расчеты). Дельфин на расстоянии 20 метров безошибочно подплывает к брошенной в воду дробишке.

Механизмы эхолокации, созданные природой очень сложны и до конца не исследованы. Сегодняшний уровень техники позволяет смоделировать эхолокатор дельфина. Но если у дельфина он весит 200 г, то созданный человеком аппарат весит более 100 кг.

1.4 Получение ультразвука человеком. Пьезоэффект

Практическое использование человеком ультразвука начато после открытия в 1880 году братьями Жаком и Пьером Кюри пьезоэлектрического эффекта («пьезо» по-гречески «дарить») [1]. Впервые этот эффект обнаружен у горного хрусталя (разновидности кварца).

Сущность пьезоэффекта заключается в следующем: если деформировать пластину кварца, то на ее гранях появляются противоположные по знаку электрические заряды, это явление называется прямым пьезоэффектом.

Механизм прямого пьезоэффекта объясняется возникновением и изменением дипольного момента элементарной ячейки кристаллической решетки в результате смещения зарядов под действием механического напряжения. Таким образом, на гранях пьезоэлектрического материала возникают электрические заряды.

Но оказалось, что существует и обратный пьезоэффект. Если прикладывать к пластине переменное электрическое напряжение, то кристалл начинает сжиматься и расширяться (изменять геометрические размеры) с частотой прикладываемого напряжения. Механизм обратного пьезоэффекта заключается в следующем. При действии электрического поля на элементарные заряды в ячейке происходит их перемещение и, как следствие, изменение средних расстояний между ними, то есть деформация всего кристалла.

Изготовленная из пьезоэлектрического материала деталь простой геометрической формы (стержень, пластина, диск, цилиндр и т.п.) с нанесенными на ее определенные поверхности электродами называется пьезоэлементом.

Пьезоэлементы входят в состав пьезоэлектрического преобразователя. Преобразователь обеспечивает преобразование энергии электрических колебаний в энергию механических колебаний и вводит ее в обрабатываемую среду.

Естественный кварц дорог, и поэтому были созданы искусственные пьезоматериалы на основе титаната бария и цирконата титаната свинца. У этих материалов пьезоэффект в 100 раз больше, чем у кварца. Аналогичные материалы были обнаружены среди магнитных материалов и получили название магнито-стрикционных материалов. Оказалось, что помещение магнито-стрикционного стержня в направленное вдоль него магнитное поле приводит к изменению геометрических размеров стержня.

На основе магнито-стрикционных и пьезокерамических материалов разрабатываются ультразвуковые преобразователи. Преобразователи – устройства, обеспечивающие преобразование энергии электрических колебаний в механические упругие колебания.

Для чего же можно использовать УЗ колебания? Одно из основных применений ультразвука связано с возможностью переноса в материальных средах огромных энергий, направленных на развитие и совершенствование промышленных технологий.

Перспективным направлением интенсификации технологических процессов является использование энергии механических колебаний ультразвуковой частоты высокой интенсивности.

Эффективность УЗ воздействий на различные технологические процессы подтверждена многочисленными исследованиями и опытом, позволившими установить следующее:

1. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности обеспечивает 10...1000-кратное ускорение процессов, протекающих между двумя или несколькими неоднородными средами (растворение, очистка, обезжиривание, дегазация, крашение, измельчение, пропитка, эмульгирование, экстрагирование, кристаллизация, полимеризация, предотвращение образования накипи, гомогенизация, эрозия, химические и электрохимические реакции и многое другое). При этом увеличивается выход полезных продуктов (например, экстрактов), и им придаются дополнительные свойства (например, биологическая активность и стерильность), а также удается получить вещества с новыми свойствами (например, тонкодисперсные эмульсии и суспензии).

2. Использование ультразвуковых колебаний позволяет осуществлять технологические процессы, не реализуемые или сложно реализуемые традиционными методами - обеспечивать размерную обработку (сверление, снятие фасок, выполнение пазов) хрупких и твердых материалов, таких как керамики, полупроводниковые материалы, стекло, самоцветы, ферриты, сверхтвердые сплавы и стали.

3. Ультразвуковые колебания позволяют интенсифицировать многие процессы, происходящие на границе контакта материалов (сварку полимерных материалов, склеивание, пропитку различных материалов), ускоряя технологические процессы и повышая качество получаемых изделий.

Несомненные и уникальные достоинства УЗ технологий должны были обеспечить их широчайшее использование при решении сложных проблем современных производств, ориентированных на выпуск конкурентоспособной продукции.

К сожалению, отмеченные выше достижения ультразвуковых технологий до настоящего времени мало известны широкому сообществу промышленников и достаточно редко используются в практической производственной и бытовой деятельности.

1.5 Области практического применения ультразвука

Практическое применение УЗ развивается в двух направлениях:

1. Применение волн малой интенсивности (низкоэнергетические колебания, не приводящие к необратимым изменениям в материалах и телах, через которые они распространяются) для контроля, измерений, исследований внутренней структуры материалов и изделий (уровнемеры, расходомеры, анализаторы состава газов, жидкости и твердых веществ, дефектоскопы) [1].

2. Применение высокоэнергетических колебаний – волн высокой интенсивности – для активного воздействия на вещества и изменения их структуры и свойств [4].

1.6 Практическое применение низкоэнергетических

ультразвуковых колебаний

Область применения УЗ колебаний низкой интенсивности (условно до 1 Вт/см^2) очень обширна, и мы поочередно рассмотрим несколько основных применений УЗ колебаний малой интенсивности.

1. УЗ приборы для контроля химических характеристик различных материалов и сред. Все они основаны на изменении скорости УЗ колебаний в среде и позволяют определять:

- концентрацию бинарных смесей;
- плотность растворов;
- степень полимеризации полимеров;
- наличие в растворах примесей, газовых пузырьков;
- скорость протекания химических реакций;
- жирность молока, сливок, сметаны;
- дисперсность в гетерогенных системах и др.

Разрешающая способность современных УЗ приборов $0,05 \%$, точность измерений скорости распространения на образцах длиной 1 м составляет $0,5\text{--}1 \text{ м/с}$ (скорость в металле более 5000 м/с). Практически все измерения проводятся методом сравнения с эталоном.

2. Приборы для контроля физико-химических характеристик, основанные на измерении затухания ультразвука. Такие приборы позволяют осуществлять измерение вязкости, измерение плотности, состав, содержание примесей, газов и т.п. Используемые методики также основаны на методах сравнения с эталоном.

3. УЗ расходомеры жидкостей в трубопроводах. Их действие также основано на измерении скорости распространения УЗ колебаний вдоль потока жидкости и против потока. Сравнение двух скоростей позволяет определить скорость потока, а при известном сечении трубопровода расход. Пример одного из расходомеров (№15183 в Госреестре Средств Измерений) представлен на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Стационарный ультразвуковой расходомер «АКРОН»

Такой расходомер обеспечивает измерение объемного расхода и суммарного объема (количества) жидкостей, протекающих в напорных трубопроводах систем водоснабжения, канализации и нефтепродуктоснабжения без врезки в действующий трубопровод. Принцип действия расходомера заключается в измерении разности времени прохождения ультразвуковой волны по потоку и против потока контролируемой жидкости, пересчете ее в мгновенное значение расхода с последующим интегрированием.

Погрешность прибора составляет 2 % от верхнего предела измерения. Верхний и нижний пределы измерения устанавливает оператор. Расходомер включает в себя блок датчиков (состоит из двух ультразвуковых датчиков и устройства для их крепления на трубе) и электронный блок, соединенные радиочастотным кабелем длиной до 50 м (стандартно – 10 м). Датчики устанавливаются на прямолинейном участке трубопровода на наружной поверхности, очищенной от грязи, краски и ржавчины. Условие правильной установки датчиков – наличие прямого участка трубы не менее 10 диаметров трубы – перед, и 5 диаметров – после датчиков.

4. Сигнализаторы уровней. Принцип действия основан на локации уровня жидких или сыпучих материалов ультразвуковыми импульсами, проходящими через газовую среду, и на явлении отражения этих импульсов от границы раздела газ–контролируемая среда.

Мерой уровня при этом является время распространения звуковых колебаний от излучателя до контролируемой границы раздела сред и обратно до приемника. Результат измерения выводится на персональный компьютер, где все измерения запоминаются, с последующей возможностью их просмотра и анализа, а также подключения к системе автоматизированного сбора и обработки данных. Уровнемер в составе системы может включать конечные автоматы, насосы и другие устройства при уровне выше максимального и ниже минимального значения, что позволяет автоматизировать технологический процесс. Дополнительно формируется токовый выход (0,5 мА, 0–20 мА) для самопишущих приборов.

Сигнализатор уровня позволяет контролировать температуру среды в резервуарах. Основным форматом выводимых данных является расстояние от вершины резервуара до поверхности содержащегося в нем вещества. По желанию заказчика, при предоставлении необходимой информации возможна доработка устройства для вывода высоты, массы либо объема вещества в резервуаре.

5. УЗ анализаторы состава газов основаны на использовании зависимости скорости УЗ в смеси газов от скоростей в каждом из составляющих эту смесь газов.

6. Охранные УЗ устройства основаны на измерении различных параметров УЗ полей (амплитуды колебаний при перекрытии пространства между излучателем и приемником, изменении частоты при отражении от движущегося объекта и т.п.).

7. Измерители температуры газов и пожарные сигнализаторы, основанные на изменении скорости распространения при изменении температуры среды или появлении дыма.

8. Приборы ультразвукового неразрушающего контроля. Неразрушающий контроль является одним из основных технологических приёмов обеспечения качества материалов и изделий. Ни одно изделие не должно эксплуатироваться без проверки. Можно проверку осуществить путем испытаний, но так можно испытать 1- 10 изделий, но нельзя проверить 100 % всех изделий, т.к. проверить – это значит испортить все изделия. Поэтому проверять необходимо, не разрушая.

Одни из наиболее дешевых, простых и чувствительных является УЗ метод неразрушающего контроля. Главными достоинствами по сравнению с другими методами неразрушающих испытаний являются:

- обнаружение дефектов, находящихся глубоко внутри материала, что стало возможным благодаря улучшенной проникающей способности. Ультразвуковое обследование проводится до глубины нескольких метров. Контролю подвергаются различные изделия, например, длинные стальные стержни, роторные штамповки и т.д.;

- высокая чувствительность при обнаружении чрезвычайно малых дефектов длиной несколько миллиметров;

- точное определение местоположения внутренних дефектов, оценка их размера, характеристика направления, формы и природы;

- достаточность доступа только к одной из сторон изделия;

- контроль процесса электронными средствами, что обеспечивает почти мгновенное выявление дефектов;

- объемное сканирование, что позволяет обследовать объем материала;

- отсутствие требований по мерам предосторожности, связанным со здоровьем;

- портативность оборудования.

1.7 Практическое применение высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний

На сегодняшний день основные процессы, реализуемые и интенсифицируемые при помощи высокоэнергетических ультразвуковых колебаний, приня-

то разделять на три основные подгруппы в зависимости от вида среды, в которой они реализуются (рисунок 1.5) [5, 6].

В зависимости от вида среды процессы условно делятся на процессы в жидких, твердых, термопластичных материалах и газообразных (воздушных) средах. В последующих разделах будут более подробно рассмотрены процессы и аппараты для интенсификации процессов в жидких, твердых, термопластичных материалах и газообразных средах [4, 5].



Рисунок 1.5 – Применение высокоэнергетических ультразвуковых колебаний

Далее рассмотрим примеры основных технологий, реализуемых с использованием высокоэнергетических ультразвуковых колебаний.

1. Размерная обработка. Ультразвуковые колебания применяются для обработки хрупких и особо твердых материалов и металлов.

Основные технологические процессы, интенсифицируемые ультразвуковыми колебаниями – это сверление, зенкование, нарезание резьб, волочение проволоки, полировка, шлифовка, сверление отверстий сложной формы. Интенсификация этих технологических процессов происходит благодаря наложению на инструмент ультразвуковых колебаний.

2. УЗ очистка. Сегодня существует множество способов очистки поверхностей от различных загрязнений. УЗ очистка более быстрая, обеспечивает высокое качество и отмывает труднодоступные участки. При этом обеспечивается замена высокотоксичных, огнеопасных и дорогих растворителей обычной водой.

С помощью высокочастотных ультразвуковых колебаний производится очистка автомобильных карбюраторов и инжекторов за несколько минут.

Причина ускорения очистки в кавитации, особом явлении, при котором в жидкости образуются мельчайшие газовые пузырьки. Эти пузырьки лопаются (взрываются) и создают мощные гидротоки, которые вымывают всю грязь. На этом принципе существуют сегодня стиральные машины и малые установки мойки. Особенности реализации кавитационного процесса и его потенциальные возможности будут рассмотрены отдельно. УЗ очищает металлы от полировочных паст, прокат от окалины, драгоценные камни от полировочных мест. Очистка печатных форм, стирка тканей, мойка ампул. Очистка трубопроводов сложной формы. Кроме очистки, ультразвук способен производить удаление мелких заусенец, полировку.

Ультразвуковое воздействие в жидких средах уничтожает микроорганизмы и поэтому широко используется в медицине и микробиологии.

Возможна и другая реализация УЗ очистки – очистка дыма от твердых частиц в воздухе. Для этого также используется ультразвуковое воздействие. Частицы в УЗ поле начинают активно двигаться, соударяются и слипаются, осаждаются под действием силы тяжести. Это явление называется ультразвуковой коагуляцией и используется для борьбы с туманом на аэродромах, на дорогах и в морских портах.

3. УЗ сварка. В настоящее время с помощью ультразвуковых колебаний высокой интенсивности производится сварка полимерных термопластичных материалов. Сварка полиэтиленовых тубиков, коробок, банок обеспечивает отличную герметичность. В отличие от других способов, с помощью ультразвука можно варить загрязненные пластмассы, трубки с жидкостью и т.д. При этом содержимое стерилизуется.

С помощью ультразвуковой сварки производится сварка тончайшей фольги или проволоки к металлической детали. Причем УЗ сварка является холодной сваркой, поскольку шов формируется при температуре ниже температуры плавления. Таким образом, соединяются сваркой алюминий, тантал, цирконий, ниобий, молибден и т.п.

В настоящее время ультразвуковая сварка нашла наибольшее применение для высокоскоростных процессов упаковки и производства полимерных упаковочных материалов.

4. Пайка и лужение. С помощью высокочастотных ультразвуковых колебаний производится пайка алюминия. С помощью УЗ можно лудить, а затем паять керамику, стекло, что ранее было невозможно. Ферриты, припайка полу-

проводниковых кристаллов к позолоченным корпусам реализуются сегодня с применением ультразвуковой технологии.

5. Ультразвук в современной химии. В настоящее время, как следует из литературных источников сформировано новое направление в химии – УЗ химия. Изучая химические превращения, происходящие под действием УЗ, ученые установили, что УЗ не только ускоряет окисление, но в некоторых случаях обеспечивает восстанавливающее действие. Таким образом, восстанавливается железо из окислов и солей.

Получены положительные результаты по интенсификации УЗ следующих химико-технологических процессов: электроосаждения, полимеризации, деполмеризации, окисления, восстановления, диспергирования, эмульгирования, коагуляции аэрозолей, гомогенизации, пропитки, растворения, распыления, сушки, горения, дубления и др.

Электроосаждение – процесс, при котором осаждающийся металл приобретает мелкокристаллическую структуру, уменьшается его пористость. Таким образом, осуществляется меднение, лужение, серебрение. Процесс идет быстрее и качество покрытия выше, чем в обычных технологиях.

При получении эмульсий вода и жир, вода и эфирные масла, вода и ртуть, барьер несмешиваемости преодолевается благодаря УЗ.

Полимеризация – это соединение молекул в одну, Степень полимеризации регулируется частотой УЗ.

Диспергирование – получение сверхтонких пигментов для получения красителей.

Сушка осуществляется без нагревания биологически активных веществ, в пищевой, фармакологической промышленности.

Распыление жидкостей и расплавов. Интенсификация процессов в распылительных сушках. Получение металлического порошка из расплавов. Эти распылительные устройства исключают вращающиеся и трущиеся детали.

УЗ усиливает эффективность горения в 20 раз жидких и твердых топлив.

Пропитка. В сотни раз быстрее проходит жидкость через капилляры пропитываемого материала. Используется при производстве рубероида, шпал, цементных плит, текстолита, гетинакса, пропитке древесины модифицированными смолами.

6. УЗ в металлургии. Известно, что металлы при плавлении поглощают газы алюминия и его сплавы. 80 % всех газов в расплавленном металле приходится на долю H_2 . Это приводит к ухудшению качества металла. Газы удаётся удалять с помощью УЗ, что позволило в нашей стране создать специальный технологический цикл и широко использовать его при производстве металлов.

УЗ способствует закалке металлов. В порошковой металлургии УЗ способствует слипанию частичек изготавливаемого материала. При этом отпадает необходимость в уплотнении большим давлением.

7. УЗ в горном деле. Применение ультразвука позволяет реализовать следующие технологии:

- удаление парафина со стенок нефтяных скважин;
- исключение взрывов метана в шахтах за счет его распыления;
- УЗ обогащение руд (флотационный метод с применением УЗ).

8. УЗ в сельском хозяйстве. Ультразвуковые колебания благоприятно влияют на семена и зерна перед их посадкой. Так, обработка семян томатов перед посадкой обеспечивает увеличение численности плодов, сокращает время созревания и увеличение количества витаминов.

Обработка УЗ семян дыни и кукурузы приводит к повышению урожайности на 40 %.

При обработке УЗ семян можно обеспечить дезинфекцию и ввести необходимые микроэлементы из жидкости.

9. Пищевая промышленность. На практике уже сегодня реализуются следующие технологии:

- обработка молока для гомогенизации, стерилизации;
- обработка для увеличения сроков хранения и качества молока в замороженном виде;
- получение высококачественного порошкового молока;
- получение эмульсий для хлебопечения;
- обработка дрожжей на 15 % повышает их бродильную силу;
- получение ароматических веществ, пюре, извлечение жира из печени;
- выделение винного камня;
- экстрагирование растительного и животного сырья;
- производство духов (6...8 часов вместо года).

10. УЗ в биологии. Большие дозы ультразвука убивают микроорганизмы (стафилококки, стрептококки, вирусы); малые интенсивности ультразвукового воздействия способствуют росту колоний микроорганизмов.

11. Влияние на человека. Ультразвуковое воздействие с интенсивностью до 0,1–0,4 Вт/см² носит лечебное воздействие. В Америке лечебным считается воздействие с интенсивностью до 0,8 Вт/см².

12. В медицине. Ультразвуковые скальпели, устройства для внешней и внутренней липосакции, лапороскопические инструменты, ингаляторы, массажеры находят самое широчайшее применение и позволяют лечить различные болезни.

Изложенный далее курс лекций предназначен для предварительного ознакомления студентов, аспирантов, инженеров и технологов различных производств с основами ультразвуковых технологий и призван дать основополагающие знания по теории формирования ультразвуковых колебаний и практике применения УЗ колебаний высокой интенсивности.

2 ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Для реализации технологических процессов под действием ультразвуковых колебаний в различных средах необходимы источники ультразвукового излучения, способные работать в различных средах и создавать колебания с требуемыми параметрами по частоте и интенсивности. К настоящему времени создано большое количество различных источников ультразвуковых колебаний, так называемых УЗ преобразователей [3, 7].

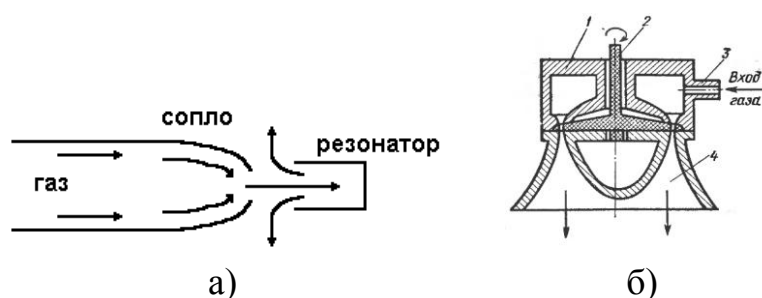
УЗ преобразователь – это устройство, обеспечивающее преобразование подводимой энергии какого-либо вида в энергию УЗ колебаний. Поскольку конечным результатом преобразования является энергия механических колебаний УЗ частоты, а подводимая энергия имеет различную природу, то и классификацию преобразователей произведем с точки зрения природы подводимой энергии, преобразование которой обеспечивает формирование УЗК.

2.1 Классификация ультразвуковых преобразователей

1. Аэродинамические преобразователи обеспечивают преобразование энергии потока газа в ультразвуковые колебания газовой среды.

По характеру преобразования энергии потока газа аэродинамические преобразователи делятся:

- а) на статические сирены или газоструйные излучатели;
- б) динамические сирены (рисунок 2.1).



1 – камера; 2 – ротор; 3 – входной патрубок; 4 – ротор

а) – статическая сирена; б) – динамическая сирена

Рисунок 2.1 – Аэродинамические преобразователи

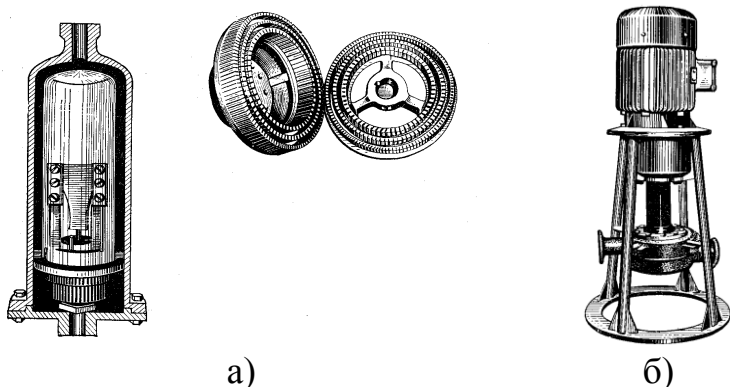
Газоструйные излучатели – это генераторы звуковых и ультразвуковых колебаний, не имеющие движущихся частей, источником энергии служит кинетическая энергия движения газовой струи. Динамические сирены представляют собой газоструйные излучатели с возможностью периодического открывания и закрывания отверстий резонаторов за счет вращения роторного устройства.

Аэродинамические преобразователи обеспечивают возбуждение УЗ колебаний в газовых средах и могут быть использованы для ускорения процессов в газовых средах. Рабочие частоты аэродинамических преобразователей не превышают 20–50 кГц [8].

2. Гидродинамические излучатели обеспечивают преобразование энергии струи жидкости в энергию ультразвуковых колебаний. Их действие основано на генерировании ультразвуковых колебаний в жидкой среде при взаимодействии вытекающей из сопла струи с препятствием определённой формы и размеров либо при принудительном периодическом прерывании струи. Действие газоструйных излучателей основано на вихреобразовании, резонансе, автоколебаниях и других физических эффектах [7].

В зависимости от характера преобразования энергии гидродинамические излучатели делятся:

а) на пластинчатые излучатели (рисунок 2.2, а) ;



а) – пластинчатые гидродинамические излучатели; б) – роторный гидродинамический излучатель

Рисунок 2.2 – Гидродинамические преобразователи

- б) клапанные;
- в) вихревые;
- г) пульсационные;
- д) роторные (рисунок 2.2, б).

Рабочие частоты гидродинамических излучателей не превышают 20 кГц.

3. Электромеханические преобразователи – низкочастотные вибраторы, обеспечивающие воздействие с большой амплитудой на объекты большой массы.

Электромеханические преобразователи делятся:

- 1) на электромагнитные, с подвижным железным якорем, основанные на преобразовании энергии электрического тока в магнитном поле (рисунок 2.3);
- 2) на электродинамические излучатели, основанные на преобразовании энергии электрического тока в магнитном поле;

3) механические вибраторы, основанные на преобразование механической энергии одного вида (энергии вращения кривошипно-шатунных механизмов) в продольные колебания.

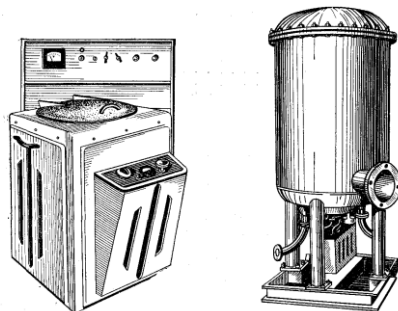


Рисунок 2.3 – Электромагнитные преобразователи

Акустические волны в электромеханическом преобразователе создаются в результате колебаний механической системы в жидкости.

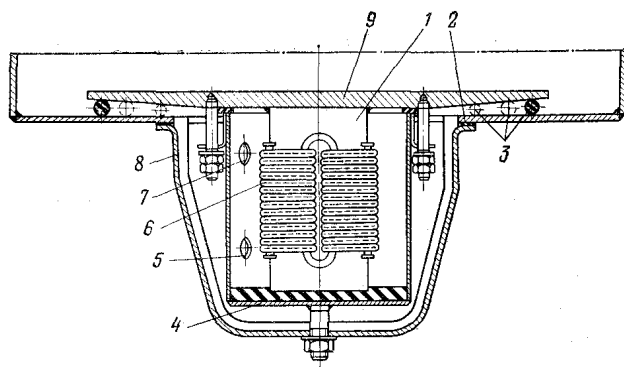
Основным недостатком преобразователей такого типа является невозможность работы на частотах выше 1 кГц, так как при повышении частоты резко возрастают электрические потери на вихревые токи и гистерезис.

4. Импульсные источники. Действие таких источников основано на преобразовании различных видов энергии для создания коротких широкополосных сигналов. Различаются:

- 1) взрывные, обеспечивающие преобразование энергии взрыва в звуковые колебания;
- 2) ударные, преобразующие энергию механического удара;
- 3) тепловые, основанные на тепловом ударе;
- 4) электроразрядные, преобразующие энергию электрического разряда в жидкости;
- 5) импульсные электродинамические.

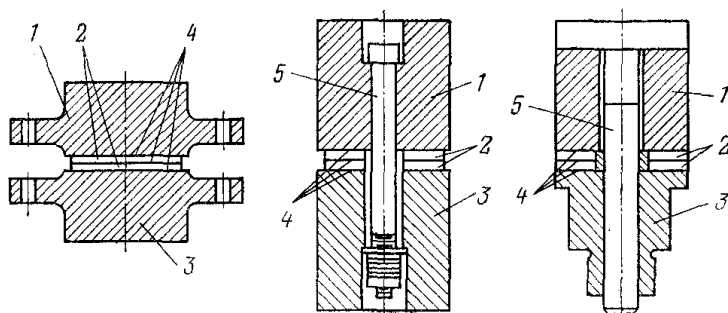
5. Магнитострикционные преобразователи обеспечивают преобразование энергии магнитного поля в механические колебания УЗ частоты. Используются для возбуждения колебаний в жидких и твердых телах (рисунок 2.4).

Рабочие частоты импульсных источников до 100 кГц. Основным недостатком является необходимость водяного охлаждения, поскольку магнитострикционные материалы характеризуются низкой температурой Кюри, температурой потери магнито-стрикционных свойств материалом [4].



1 – пакет пластин пермендюра; 2 – прокладка; 3 – уплотнения;
 4 – бачок для охлаждения; 5 – вход воды; 6 – обмотка пакета;
 7 – слив воды; 8 – кронштейн; 9 – диафрагма
 Рисунок 2.4 – Плоский магнестрикционный излучатель

6. Пьезоэлектрические преобразователи (рисунок 2.5) обеспечивают преобразование энергии электрического поля в механические колебания УЗ частоты.



1 – излучающая накладка; 2 – пьезокерамические пластины; 3 – отражающая накладка; 4 – электроды; 5 – крепежный болт
 Рисунок 2.5 – Конструкции составных пакетных пьезокерамических преобразователей

Используются для формирования УЗК в жидких, твердых и газообразных веществах. Рабочие частоты от 20 кГц до 1000 кГц.

Этот вид преобразователей получил наибольшее распространение, практически вытеснив из практики все остальные преобразователи. Поэтому основное внимание при рассмотрении вопроса об источниках ультразвуковых колебаний мы посвятим преобразователям, основанным на использовании пьезоэлектрического эффекта.

2.2 Пьезоэлектрические материалы

В качестве материалов для преобразователей используются более 150 различных материалов, обладающих пьезоэффектом – способностью материалов менять свои геометрические размеры под действием электрического поля [9].

Наибольшее распространение среди материалов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, получили:

- кварц, природный материал, благодаря прочности и устойчивости параметров нашедший самое широкое применение в радиоэлектронике. Свои пьезосвойства кварц сохраняет до 570 °С. Но природный материал характеризуется высокой стоимостью, поскольку используется только определенный срез кристалла. Основной недостаток заключается в необходимости использования высоких напряжений для работы (~1кВ/мм);

- пьезокерамический искусственный материал на основе титаната бария с добавлением титаната свинца и циркония. Материал называется ЦТС, поскольку в основе выполнен из цирконата титаната свинца. Имеет КПД в сотни раз больше, чем кварц. Работает при напряжениях, не превышающих сотен Вольт на мм. Прост в изготовлении и поэтому относительно не дорог.

Пьезокерамические материалы делятся на следующие классы:

- материалы для высокочувствительных элементов, работающих в режиме приема и излучения (типа ЦТС-13, ЦТБС-1);
- материалы, используемые для технологических аппаратов, в которых преобразователи работают в режиме сильных электрических и механических напряжений (типа ЦТС-23, ЦТС-24);
- материалы для УЗП с повышенной стабильностью частотных характеристик в заданном интервале температур (типа ЦТС-22);
- материалы для работы при температурах, превышающих 250°С и обладающих стабильностью пьезоэлектрических характеристик (типа ЦТС-21).

Пьезоматериалы характеризуются различной рабочей температурой, то есть могут работать только до определенной температуры, называемой температурой Кюри. При достижении этой температуры пьезоэффект пропадает и не восстанавливается.

Из пьезоэлектрических материалов изготавливают изделия различной формы и назначения, называемые пьезоэлектрическими элементами.

2.3 Пьезоэлектрические элементы

1. Прямоугольная пластина (рисунок 2.6) обычно используется для возбуждения колебаний на резонансной частоте, определяемой толщиной пьезоэлемента.

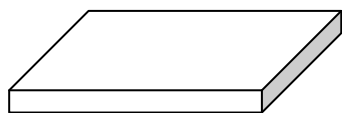


Рисунок 2.6 – Пьезоэлемент в виде пластины

2. При работе в диапазоне низких частот часто используются изгибные моды колебаний. В этом случае две пьезопластины склеиваются механически по большим граням, образуя так называемый биморфный элемент (рисунок 2.7). Электроды биморфного элемента включаются так, что при подаче на его электроды напряжения один из пьезоэлементов сжимается, другой расширяется. При этом вся конструкция изгибается и резонансная частота определяется собственной частотой изгиба колеблющейся мембраны.

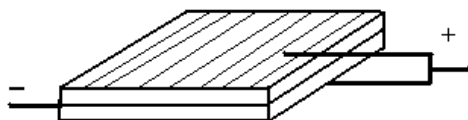


Рисунок 2.7 – Биморфный пьезоэлемент

3. Круглые пьезоэлементы (рисунок 2.8) работают либо на толщинных, либо на радиальных модах колебаний. В этом случае пьезоэлемент имеет две резонансные частоты, определяемые диаметром и толщиной пьезоэлемента: $f_1=C/2h$ и $f_2=C/2D$

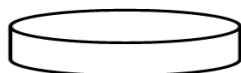


Рисунок 2.8 – Круглый пьезоэлемент

4. Трапецеидальные пьезоэлементы (рисунок 2.9) применяются в качестве деталей составных колец, работающих на колебаниях в НЧ диапазоне.



Рисунок 2.9 – Трапецеидальный пьезоэлемент

5. Прямоугольные и круглые стержни обычно работают на продольных колебаниях, то есть их длина соответствует половине длине волны возбуждающей колебания. Иногда используют поперечные колебания стержня и очень часто крутильные колебания.

6. Цилиндрические и сферические пьезоэлементы (рисунок 2.10) используются на радиальных модах колебаний. Рассмотрим, как происходят колебания на примере сферы и цилиндра.

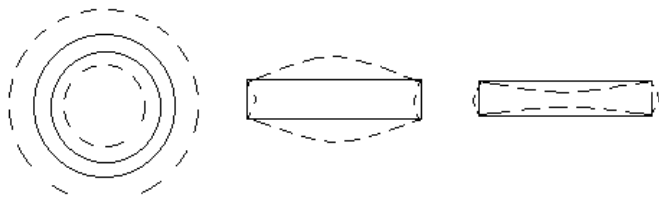


Рисунок 2.10 – Цилиндрические и сферические пьезоэлементы

7. Пьезоэлементы в виде кольца (рисунок 2.11) имеют три резонансные частоты и используются в режиме толщинного резонанса.



Рисунок 2.11 – Пьезоэлемент кольцевого типа

Электроды на поверхности пьезоэлементов наносятся разными способами – напылением в вакууме, приклеиванием серебряной или золотой фольги, вжиганием серебряной пасты.

Основные требования к электродам:

- 1). высокая адгезионная прочность к керамике (наилучшие результаты получают методом вжигания);
- 2). неокисляемость на воздухе, то есть изготовление из неокисляющихся металлов.

2.4 Пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэлектрический преобразователь – электроакустический преобразователь, действие которого основано на пьезоэффекте.

На практике, для решения технологических вопросов, связанных с применением ультразвука, чаще используются преобразователи из пьезоэлемента в виде кольца, пьезоэлемента и металла, многослойных пластин.

Рассмотрим возможность использования пьезоэлектрических кольцевых элементов.

Для работы на частоте 22 кГц из формулы $f=C/2l$ следует, что толщина пьезоэлемента должна быть $L = C/2f = 3000\text{м/с}/44000 = 7\text{см}$.

Изготовить такой пьезоэлемент возможно, но для его поляризации необходима напряженность поля 2000 В/мм, то есть 140000 В, что практически реализовать невозможно.

Поэтому чаще всего используются пьезоэлементы в сочетании с одно- и двухсторонней металлическими частотопонижающими накладками [10] (рисунок 2.12).

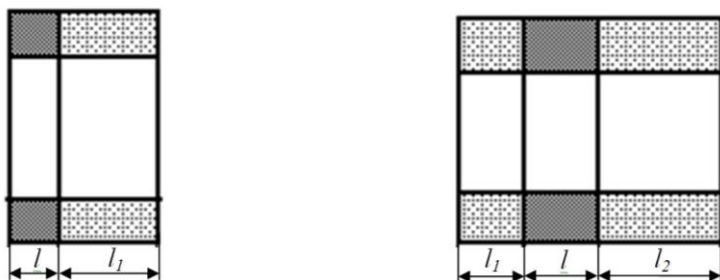


Рисунок 2.12 – Схемы преобразователей на пьезоэлементах

В таком случае резонансная частота определяется общей длиной преобразователя, то есть $l+l_1+l_2 = \lambda/2$.

Металлические накладки на пьезоэлементы обеспечивают понижение рабочей частоты пьезоэлемента и поэтому называются частотопонижающими.

2.5 Концентраторы механических колебаний

Концентраторы обеспечивают передачу сформированных колебаний от пьезоэлектрических преобразователей к инструментам и ввод колебаний в обрабатываемые технологические среды. Концентраторы являются механическими трансформаторами скоростей или смещений и представляют собой стержни переменного сечения, в которых плотность энергии колебаний распределена неравномерно по длине.

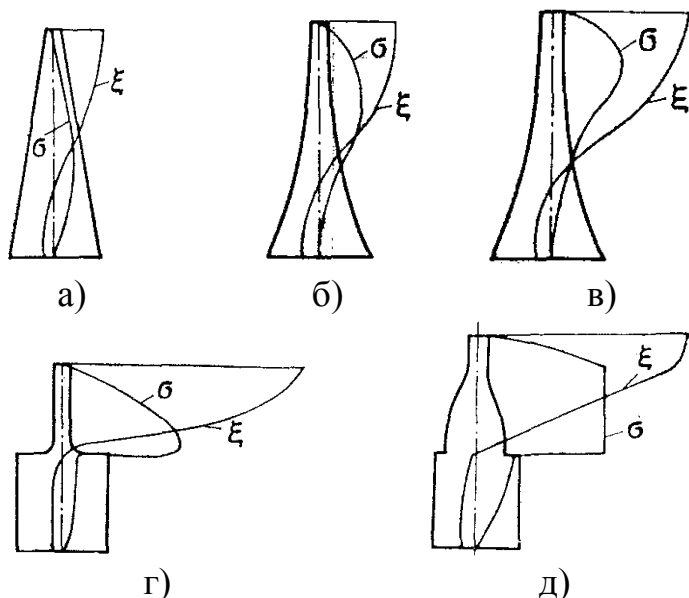
На малом выходном сечении скорость понижается, следовательно, амплитуда смещения получается значительно больше, чем на большом входном сечении стержня.

В зависимости от формы образующей концентратора (рисунок 2.13) и отношения размеров его входного и выходного сечений коэффициент усиления принимает различные значения.

Под коэффициентом усиления понимают отношение амплитудного значения колебаний на выходе к ее значению на входе. Таким образом, коэффициент трансформации скорости

$$K = V_1 / V_0, \tag{2.10}$$

где V_1 – скорость на выходе, V_0 – на входе концентратора.



а) – конусный; б) – экспоненциальный; в) – катеноидальный;

г) – ступенчатый; д) – ампульно-ступенчатый

Рисунок 2.13 – Форма распределения колебаний ξ и механических напряжений σ ультразвуковых концентраторов

Концентраторы разделяются по форме образующей на конусные, экспоненциальные, катеноидальные, ступенчатые и ампульные.

Применяют также сложные составные концентраторы. На рисунке 2.13 показаны зависимости распределения амплитуды ξ и внутренних механических напряжений $\sigma_{вн}$ по длине концентраторов.

Концентраторы характеризуются следующими свойствами:

- конические концентраторы дают минимальный из всех концентраторов коэффициент трансформации, но они просты в изготовлении и расчете, надежны в эксплуатации;

- экспоненциальные и катеноидальные концентраторы обеспечивают больший коэффициент трансформации, являются хорошими трансформаторами механических сопротивлений и могут выдержать значительные механические напряжения в течение длительного времени. Недостаток их заключается в сложности изготовления;

- ступенчатые концентраторы дают максимальный из всех концентраторов коэффициент трансформации на холостом ходу и при малых нагрузках, просты в расчете и изготовлении. Однако большие амплитуды колебаний вызывают и максимальные механические напряжения. Чтобы они не привели к разрушению концентратора, ограничивают максимальную амплитуду на его выходном торце;

- ампульные концентраторы имеют почти постоянное по длине механическое напряжение и могут быть использованы при работе с

наибольшими амплитудами смещения. Недостаток их заключается в сложности изготовления.

2.6 Особенности ультразвукового технологического оборудования

Существующее УЗ технологическое оборудование различной мощности, степени сложности и назначения базируется на общих принципах работы и сходно по своей структуре. На рисунке 2.14 представлена структурная схема УЗ технологического аппарата, который состоит из сетевого источника питания, транзисторного усилителя (инвертора), задающего генератора УЗ частоты, устройства контроля и управления, устройства согласования, колебательной системы (пьезопреобразователя и концентратора), технологической среды.

УЗ электронные генераторы предназначены для преобразования тока промышленной частоты в ток высокой частоты и применяются для питания электроакустических преобразователей [10]. В настоящее время УЗ генераторы выполняются на полупроводниковых приборах – транзисторах и тиристорах. Применение тиристорных инверторов ограничено из-за низких частотных свойств тиристоров и сложности схемы управления. Наиболее широко в настоящее время применяются УЗ генераторы на транзисторах. Так как параметры транзисторов непрерывно улучшаются, они являются наиболее перспективными приборами и для новых разработок УЗ генераторов.

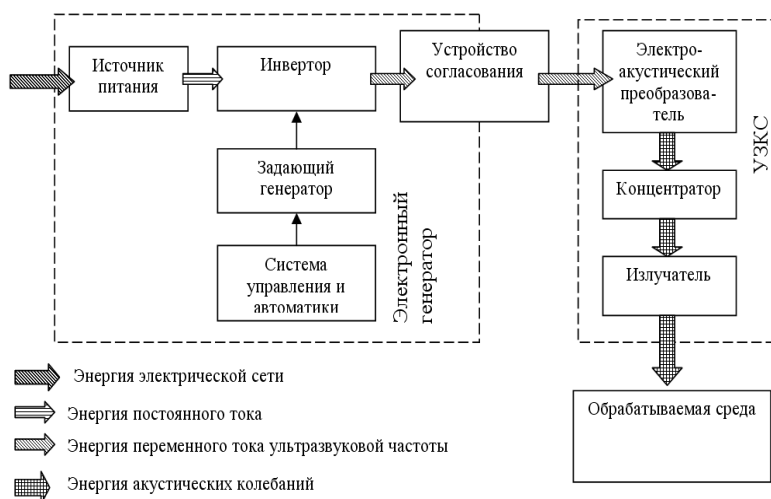


Рисунок 2.14 – Структурная схема ультразвукового технологического аппарата

По схемному решению генераторы могут быть с независимым возбуждением, с самовозбуждением, с электрической или акустической автоподстройкой частоты [10]. По своим техническим возможностям УЗ аппараты могут быть универсального применения и специализированные. Универсальные рассчита-

ны на работу с различными технологическими средами, допускают широкую вариацию выходных параметров (мощности, частоты, напряжения и т.п.) и условий согласования с нагрузкой. Примерами универсальных аппаратов могут служить: погружной УЗ аппарат, разработанный ООО «Сапфир» [11] и состоящий из излучателя и генератора УЗГ-500М2, выполненных в отдельных корпусах и соединённых между собой высокочастотным кабелем. Корпус излучателя выполнен герметичным из нержавеющей стали. Подобные аппараты разработаны швейцарской фирмой ACTIVE ULTRASONIC [12]. Они комплектуются стержневыми излучателями, позволяющими эффективно выводить УЗ энергию в жидкие среды. Излучатели могут быть использованы для оснащения УЗ химических реакторов и технологических ванн различной мощности. Мощность отдельного излучателя лежит в пределах от 600 Вт до 2000 Вт. Специализированные аппараты рассчитаны на питание одной или нескольких определенных нагрузок. Эти генераторы имеют неизменяемые выходные параметры (рабочую частоту, выходную мощность и т.д.). Универсальные генераторы предназначены для использования в лабораториях, на опытных производствах, для питания устройств, где не происходит изменения параметров технологического воздействия. При применении в массовом производстве, где выходные параметры генератора остаются неизменными, предпочтительны специализированные ультразвуковые аппараты.

Характеристики аппаратов, как электрические, так и неэлектрические обусловлены характеристиками ультразвуковой технологической установки, в состав которой они входят.

Наличие взаимного влияния параметров среды и преобразователя [10] приводит к влиянию параметров технологической среды на электрические параметры УЗ колебательных систем и электронных генераторов. Это объясняется тем, что УЗ колебательная система, являясь частью технологического аппарата, одновременно входит в состав генератора электрических колебаний, являясь его электрической нагрузкой. УЗ колебательная система представляет собой электромеханическую резонансную систему, к главным характеристикам которой относятся резонансная частота и добротность [10]. Параметры такой системы очень чувствительны к влиянию на неё различных факторов. В связи с этим любое воздействие на колебательную систему изменяет её основные характеристики, что приводит к изменению параметров генератора. Таким образом, на работу генератора электрических колебаний УЗ частоты оказывает влияние изменение параметров колебательной системы.

2.7 Ультразвуковые генераторы

Одной из ответственных частей УЗ аппарата является электронный генератор – устройство, предназначенное для преобразования энергии электрической

промышленной сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты.

Решение проблемы автоматической подстройки параметров генератора при всех возможных изменениях параметров обрабатываемых сред и разработка электрического генератора для специализированного ультразвукового станка является сложной задачей.

Наиболее интересной и перспективной является схема генератора с независимым возбуждением и автоматической подстройкой частоты.

К достоинству таких схем относятся все достоинства схем генераторов с независимым возбуждением, плюс к этому добавляется возможность автоматической подстройки частоты в соответствии с изменением механической частоты колебательной системы.

Однако у всех разработанных к настоящему времени генераторов с автоподстройкой частоты есть следующие общие недостатки:

- ограничение по максимальной развиваемой мощности, обусловленное длительным временем рассасывания зарядов в базах современных высоковольтных транзисторов при протекании больших токов;
- диапазон перестройки рабочей частоты генератора меньше возможного диапазона изменения собственной рабочей частоты колебательной системы;
- ограниченный диапазон изменения или полное отсутствие регулировок выходной мощности генераторов;
- полное отсутствие или недостаточное быстроедействие систем автоматического поддержания амплитуды механических колебаний колебательной системы;
- отсутствие систем защиты от нерегламентных режимов работы;
- отсутствие ультразвуковых колебательных систем, способных обеспечить максимально эффективное согласование выходного электрического сопротивления электрического генератора и механического сопротивления обрабатываемых сред в широком диапазоне;
- снижение производительности (эффективности ультразвукового воздействия) при изменении влияния обрабатываемых сред даже при наличии системы автоматической подстройки рабочей частоты.

На основании результатов создания электронных генераторов для ультразвуковых аппаратов был разработан электрический генератор, позволяющий исключить перечисленные недостатки.

Это стало возможным за счет обеспечения автоматической подстройки режимов работы электронной схемы генератора при всех возможных изменениях условий ультразвукового технологического воздействия при использовании различных колебательных систем с большим числом разнообразных инструментов [13,14].

Рассмотрим структурную схему, представленную на рисунке 2.15.

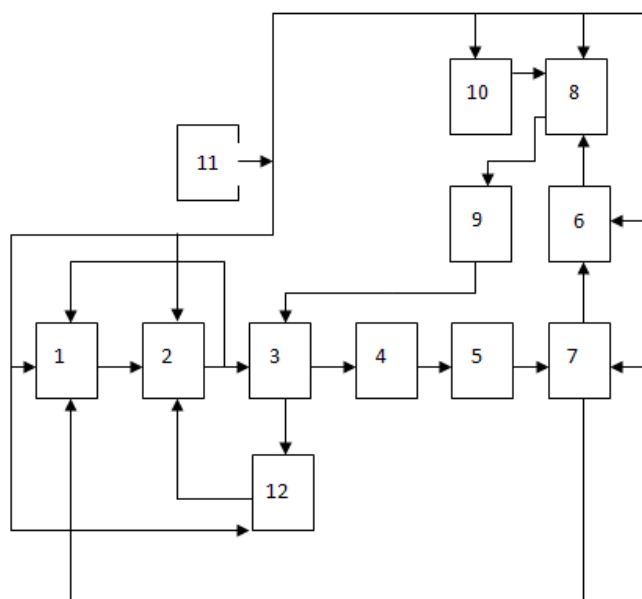


Рисунок 2.15 – Блок-схема ультразвукового технологического аппарата

Электронный генератор включает в себя:

- 1 – фазовый компаратор;
- 2 – генератор, управляемый напряжением;
- 3 – выходные каскады УЗ генератора;
- 4 – электрический LC контур;
- 5 – ультразвуковую колебательную систему;
- 6 – устройство, фиксирующее амплитуду напряжения на колебательной системе;
- 7 – датчики для снятия сигналов обратной связи;
- 8 – регулятор;
- 9 – тиристорный регулятор;
- 10 – устройство для формирования уставки, задающей стабилизируемую мощность;
- 11 – блок питания низковольтной части;
- 12 – устройство защиты и автоматики.

При включении УЗ станка низковольтная часть его питается с помощью источника питания 11, блок автоматики 12 запускает генератор 2 на максимально возможной частоте из диапазона перестройки генератора, и тот начинает поиск резонансной частоты колебательной системы. Это происходит следующим образом: сигнал с выхода генератора 2 подается на выходные ключевые каскады 3, этот же сигнал (опорный) поступает на один из входов фазового компаратора 1, на ключевые каскады нагружен колебательный контур 4, резонанс которого близок к резонансной частоте механической колебательной системы. Работая как фильтр, контур 4 выдает первую гармонику прямоугольного сигнала,

который на него подается, то есть на колебательную систему подается синусоидальное напряжение.

В электрическую цепь питания колебательной системы включены датчики 7 для снятия сигналов обратной связи. Один из датчиков включен таким образом, что сигнал (ток), снимаемый с него, имеет ту же частоту и фазу, что и ток в механической ветви ультразвуковой колебательной системы. Сигнал с этого датчика подается на второй вход фазового компаратора 1.

При неравенстве фаз и частот на входах фазового компаратора на его выходе формируется соответствующее напряжение, подаваемое на ГУН 2, который перестраивается в соответствии с подаваемым напряжением.

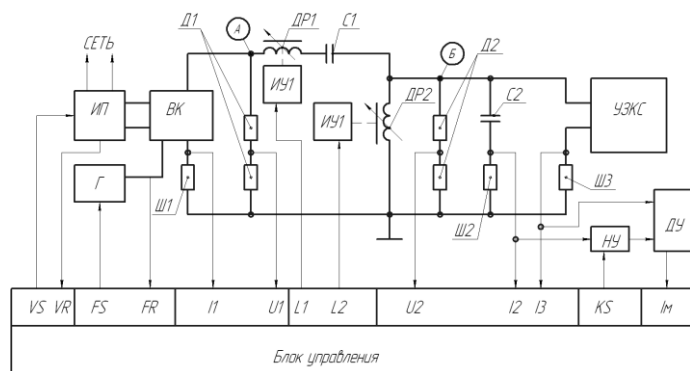
Когда равенство фаз и частот будет достигнуто, данный генератор будет работать в условии резонанса и любое изменение фазы и частоты будет скомпенсировано.

Выходные каскады 3 питаются постоянным напряжением, которое поступает с тиристорного регулятора 9. Напряжение, которым питаются выходные каскады, определяется видом работы и устанавливается устройством 10.

В результате работы на различные среды и при смене нагрузок происходит изменение напряжения на колебательной системе. Для стабилизации этого напряжения, а следовательно, для стабилизации амплитуды механических колебаний системы, напряжение на колебательной системе отслеживается датчиком 7, затем в блоке 6 фиксируется его амплитуда, и этот сигнал, пропорциональный амплитуде питающего напряжения колебательной системы, подается на пропорциональный регулятор 8. Это регулятор, сравнивая уровень, задаваемый устройством 10, с приходящим от блока 6 сигналом, вырабатывает управляющий сигнал для тиристорного регулятора. В результате происходит автоматическая стабилизация амплитуды механических колебаний системы.

Устройство защиты и автоматики 12 служит для ручного пуска генератора, выключения его при аварийных ситуациях, повторного перезапуска генератора при срыве частоты и при срабатывании токовой защиты.

Полная автоматизация подстройки параметров УЗ генератора, автоматическая защита электронной части от перегрузок позволяет свести к минимуму действия оператора, связанные с перестройкой генератора и аварийными ситуациями. При проведении определенной работы от оператора требуется лишь включить в сеть аппарат, выставить требуемую для данного процесса мощность и кнопкой пуска запустить на работу данный генератор. Далее обеспечение ультразвукового воздействия происходит в автоматическом режиме. На рисунке 2.16 представлена структурная схема управления ультразвуковым технологическим аппаратом.



- ИП – регулируемый источник питания постоянного тока;
- ВК – выходной каскад инвертора; Г – задающий генератор;
- ДР1 и ДР2 – регулируемые дроссели; ИУ1, ИУ2 – исполнительные устройства, регулирующие индуктивность дросселей;
- УЗКС – ультразвуковая колебательная система;
- НУ – нормирующий усилитель; ДУ – дифференциальный усилитель; Д1, Д2 – делители напряжений; Ш1, Ш2, Ш3 – токоизмерительные шунты

Рисунок 2.16 – Структурная схема управления работой технологического аппарата для оптимизации ультразвукового воздействия

Информацию о степени согласования колебательной системы и технологической среды несет величина разности фаз выходного напряжения и тока генератора. Изменение напряжений, токов и их фазовых соотношений осуществляется средствами, рассмотренными ранее.

Согласно предлагаемому способу управления регулировка амплитуды выходного напряжения электронного генератора осуществляется за счет изменения постоянного напряжения питания выходного каскада инвертора (блок ВК на схеме) [15, 16]. Постоянное напряжение питания выходного каскада инвертора поступает от регулируемого источника питания (блок ИП). Величина напряжения устанавливается управляющим сигналом VS. Контроль напряжения осуществляется с помощью сигнала VR. Частота выходного напряжения электронного генератора определяется частотой тактовых импульсов задающего генератора (блок ЗГ). Частота тактовых импульсов задающего генератора устанавливается сигналом FS. Контроль тактовой частоты осуществляется сигналом FR. Значение индуктивности дросселя ДР1 устанавливается сигналом L1. Значение индуктивности дросселя ДР2 устанавливается сигналом L2. Коэффи-

циент передачи нормирующего усилителя (блок НУ) устанавливается сигналом KS.

Для контроля значений напряжений и токов в различных участках электроакустической системы используются два делителя напряжения Д1 и Д2 и три токоизмерительных шунта Ш1–Ш3. Выделение сигнала, пропорционального эквивалентному току через «механическую ветвь» УЗКС, осуществляется дифференциальным усилителем (блок ДУ) и нормирующим усилителем (блок НУ). Обработка измерительных сигналов и выработка управляющих воздействий осуществляется блоком управления в соответствии с предлагаемым способом управления. Блок управления целесообразно выполнять с использованием микроконтроллеров, т.к. алгоритм управления сопряжен с выполнением вычислительных операций и гибким изменением логики. Подходы к регулированию параметров УЗТА в режиме осуществления ультразвукового воздействия и в режиме запуска существенно отличаются.

В режиме осуществления УЗ воздействия требуется лишь компенсировать влияние изменения параметров технологических сред на режим преобразования и передачи энергии. Знание абсолютных значений параметров компонентов генератора, колебательной системы и технологической среды здесь не требуется, достаточно следящего режима регулирования [17].

В режиме запуска УЗТА начальные параметры компонентов электроакустического тракта ультразвукового аппарата и технологических сред неизвестны. Поэтому перед запуском УЗТА в работу они должны быть определены.

Фактически для полной автоматизации управления работой УЗТА требуются два различных способа [17]. Первый способ должен обеспечивать установку начальных значений параметров компонентов генератора, обеспечивающих его запуск в работу. Второй способ управления должен обеспечивать оптимальный режим ввода энергии ультразвуковых колебаний в технологическую среду в условиях изменения ее параметров.

В режиме запуска УЗТА в работу необходимо обеспечить скоординированное регулирование его основных параметров. Поскольку УЗТА второго типа практически не чувствительны к величине, приведенной к электрическому входу УЗКС активной составляющей общего акустического сопротивления системы УЗКС – технологическая среда, то для установления начальных условий согласования необходимо определить значение собственной электрической емкости пьезопреобразователя и резонансной частоты УЗКС. Другие параметры системы известны. Для измерения электрической емкости использована схема выделения сигнала, пропорционального эквивалентному току «механической ветви» ЗКС, которая фактически представляет собой измерительный мост. Определение начального значения резонансной частоты УЗКС обычно выполняется сканированием диапазона рабочих частот электронного генератора. При этом производится плавное увеличение частоты выходного напряжения элек-

тронного генератора до тех пор, пока она не станет равной резонансной частоте УЗКС (или пока не достигнет верхней границы диапазона).

В процессе изменения частоты выходного напряжения электронного генератора производится изменение индуктивностей дросселей ДР1 и ДР2 таким образом, чтобы обеспечить равенство резонансных частот колебательного контура последовательного питания (ДР1С1), колебательного контура параллельного питания (ДР2С2+Сэ) и частоты выходного напряжения генератора.

Если в процессе сканирования удастся обнаружить резонансную частоту УЗКС, то осуществляется переход блока управления в основной режим работы. В основном режиме работы осуществляется следящее управление параметрами УЗТА таким образом, чтобы обеспечить наилучшие условия ввода энергии ультразвуковых колебаний в технологическую среду. Фактически в основном режиме работы организуется четыре независимых контура регулирования.

Первый контур регулирования осуществляет автоматическую подстройку частоты выходного напряжения генератора. Для этого осуществляется непрерывный контроль разности фаз переменного напряжения питания УЗКС и переменного тока «механической ветви» на основании информации о фазах сигналов U_2 и I_m и минимизация этой разности фаз за счет изменения выходной частоты генератора (используя управляющий сигнал FS).

Второй контур регулирования осуществляет поддержание заданного значения выходной мощности. Для этого применяется произведение амплитудных значений сигналов U_2 и I_m , которое в процессе регулирования обеспечивается равным заданной уставке за счет изменения напряжения питания выходных каскадов электронного генератора (используя сигнал VS).

Третий контур регулирования обеспечивает работу электронного генератора с максимальным коэффициентом мощности нагрузки. Для этого производится контроль разности фаз сигналов U_1 и I_1 и ее минимизация за счет изменения индуктивности дросселя ДР1 (используя сигнал L1).

Четвертый контур регулирования обеспечивает компенсацию емкостной составляющей входного сопротивления УЗКС. Для этого производится контроль разности фаз сигналов U_2 и I_1 и ее минимизация за счет изменения индуктивности дросселя ДР2 (используя сигнал L2).

Структурная схема ультразвукового аппарата (электронного генератора и колебательной системы) показана на рисунке 2.17.

На структурной схеме линиями нормальной толщины представлены цепи прохождения аналоговых сигналов, а утолщенными линиями – цепи прохождения цифровых сигналов.

Источник питания (ИП) преобразует переменное напряжение электрической сети в регулируемое постоянное напряжение 0–300 В, преобразуемое транзисторным ключевым преобразователем (ПР) с выходным повышающим трансформатором в переменное напряжение прямоугольной формы. Возбуждение преобразователя обеспечивается от маломощного генератора, управляе-

мого напряжением (ГУН). Сопротивление токовых шунтов (Ш1–Ш3) 0,1 Ом. Для увеличения амплитуды снимаемого с них напряжения (0–0,25 В) применяются три одинаковых усилителя У1–У3 (коэффициент усиления 20). Напряжение, снимаемое с резистивных делителей, не нуждается в усилении (его амплитуда изменяется в пределах 0–5 В). Сигналы с делителей напряжений поступают на входы амплитудных детекторов (АД1–АД4) и формирователей прямоугольных импульсов (Ф1–Ф4). Напряжение сигнала с выхода усилителя У2 делится цифроаналоговым преобразователем (коэффициент деления задается основным микроконтроллером) и вместе с сигналом с выхода усилителя У3 поступает на вход дифференциального усилителя ДУ, с выхода которого снимается напряжение, пропорциональное амплитуде и совпадающее по фазе с током «механической ветви» УЗКС.

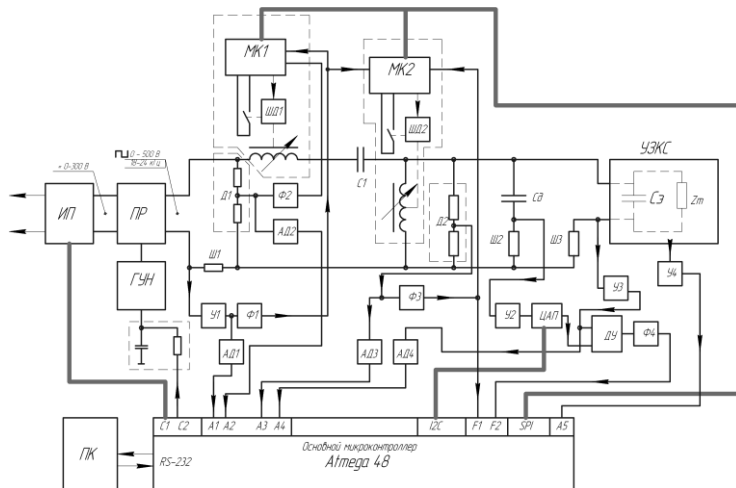


Рисунок 2.17 – Структурная схема ультразвукового аппарата

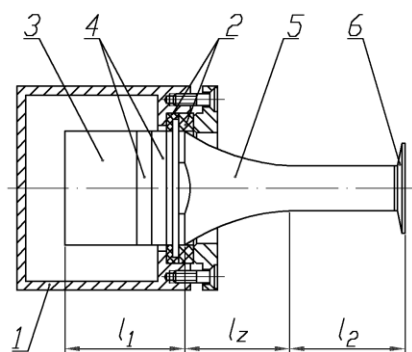
Микроконтроллер (МК1) дросселя последовательного колебательного контура на основании сигналов с выходов формирователей Ф1 и Ф2 вычисляет значение фазового угла между током и напряжением на выходе инвертора и его минимизацию. Микроконтроллер (МК2) дросселя параллельного колебательного контура на основании сигналов с выходов формирователей Ф3 и Ф1 вычисляет значение фазового угла между током и напряжением на параллельном колебательном контуре и общим током через контур и осуществляет минимизацию этого фазового угла (обеспечивая компенсацию емкостной составляющей комплексного электрического сопротивления УЗКС).

Устройство, реализованное по рассмотренной структурной схеме [17], позволяет осуществлять автоматическое согласование выходных каскадов электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы при всевозможных изменениях в акустической нагрузке (технологической среды) и в самой ультразвуковой колебательной системе (изменение электрической емкости пьезоэлектрических элементов в процессе нагрева колебательной системы).

2.8 Ультразвуковые колебательные системы

Ультразвуковая колебательная система (УЗКС) представляет собой устройство, которое обеспечивает преобразование энергии электрических колебаний, поступающих от генератора, в упругие колебания резонансной колебательной системы и ввод сформированных колебаний в обрабатываемые технологические среды. УЗКС является основным узлом любого технологического аппарата, поскольку обеспечивает не только формирование УЗ колебаний, но и их усиление до величин, необходимых для реализации различных процессов при помощи резонансных концентраторов, а также ввод усиленных УЗ колебаний в технологические среды через различные по площади и форме излучающей поверхности рабочие инструменты [18].

УЗКС технологического назначения состоит из пьезоэлектрических элементов 4, отражающей накладки 3, концентратора 5, рабочего инструмента 6 с излучающей поверхностью (рисунок 2.18).



1 – корпус; 2 – опора; 3 – отражающая металлическая накладка;

4 – пьезоэлектрические элементы;

5 – излучающая накладка-концентратор; 6 – рабочий инструмент;

l_1 – длина цилиндрического участка отражающей накладки

с пьезоэлементами;

l_2 – длина участка переменного сечения (радиальный переход);

l_2 – длина излучающего цилиндрического участка концентратора.

Рисунок 2.18 – Конструктивная схема полуволновой ультразвуковой колебательной системы

Важнейшей характеристикой колебательной системы является резонансная частота, так как при работе на резонансной частоте достигаются наибольшие значения колебательных смещений и скоростей, определяющих эффективность

процесса. Рабочая частота, или диапазон частот, устанавливается в зависимости от рабочих частот УЗ установок.

3 ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

Современные технологии наиболее часто основываются на реализации гетерогенных процессов, протекающих между двумя или несколькими неоднородными средами в системах жидкость – жидкость и жидкость–твердое тело [19]. Это процессы массообмена, процессы диспергирования, разделения жидкостей и суспензий, кристаллизации, предотвращения накипеобразования на поверхностях теплообменных аппаратов и трубопроводов, полимеризации и деполимеризации и т.д., а также различные химические и электрохимические реакции. Скорость протекания большинства гетерогенных процессов в обычных условиях очень мала и определяется величиной поверхности соприкосновения реагирующих компонентов (рисунок 3.1).

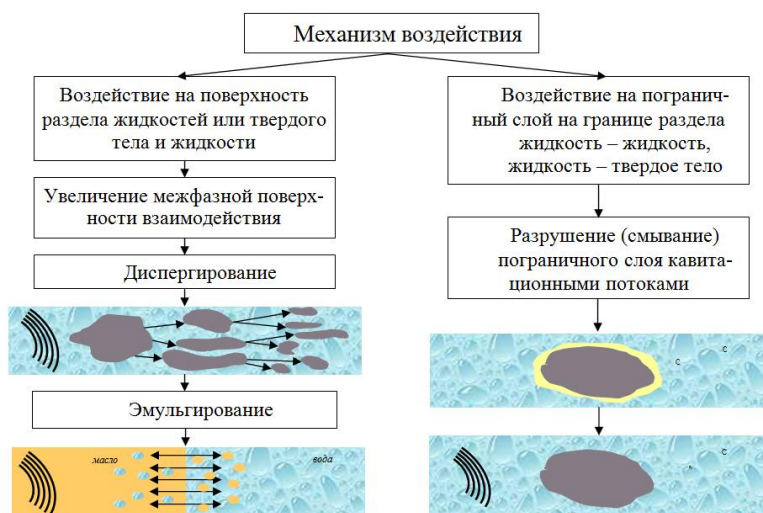


Рисунок 3.1 – Механизмы ускорения процессов в гетерогенных средах

УЗ колебания обеспечивают сверхтонкое диспергирование (не реализуемое другими способами), увеличивая межфазную поверхность реагирующих элементов. Таков один из механизмов интенсификации процессов в жидких средах. Возникающая под действием колебаний в жидкости кавитация и сопровождающие ее мощнейшие микропотоки, звуковое давление и звуковой ветер воздействуют на пограничный слой и «смывают» его. Таким образом, устраняется сопротивление переносу реагирующих веществ и интенсифицируется технологический процесс.

Наиболее интересными из гетерогенных процессов являются процессы УЗ эмульгирования (диспергирование жидкостей в жидкостях) и диспергирования (получения тонкодисперсных суспензий). Эти процессы связаны с увеличением поверхности взаимодействия и поэтому лежат в основе интенсификации множества других процессов.

Высокая эффективность ультразвуковых технологий в жидких средах обусловлена следующими причинами:

1. Условия ввода УЗ колебаний из колебательных систем с помощью металлических рабочих инструментов в жидкости наиболее благоприятные, по сравнению с введением УЗ колебаний, например, в газовые среды. Обусловлено это тем, что удельное волновое сопротивление жидких сред значительно (для воды в 3500 раз) больше, чем у газов и поэтому, большая мощность излучается из колебательной системы в жидкость при одинаковой амплитуде колебаний инструмента колебательной системы [10].

2. В жидких средах возникает и протекает специфический физический процесс – ультразвуковая кавитация, обеспечивающий максимальные энергетические воздействия, как на сами жидкости, так и на твердые тела в жидкостях [19]. Аналогичного по эффективности воздействия физического процесса нет в твердых телах и газовых средах.

3. Ультразвуковая кавитация порождает большое количество эффектов второго порядка, которые, в свою очередь, также обеспечивают интенсификацию протекающих технологических процессов.

Эти обстоятельства привели к тому, что ультразвуковое воздействие получило наиболее широкое распространение при реализации технологических процессов, связанных с жидким состоянием реагентов. В следующих подразделах рассмотрены примеры и особенности реализации процессов, ускоряемых под воздействием ультразвуковых колебаний в жидких средах.

3.1 Ультразвуковая кавитация – основной действующий фактор ускорения процессов в жидких средах

УЗ кавитация – основной инициатор физико-химических процессов, возникающих в жидкости под действием УЗ. Она реализуется за счет трансформации низкой плотности энергии УЗ в высокую плотность энергии вблизи и внутри газового пузырька.

Кавитация – образование в жидкости пульсирующих пузырьков (каверн, полостей), заполненных паром, газом или их смесью. В ультразвуковой волне во время полупериодов разрежения возникают кавитационные пузырьки, которые резко захлопываются после перехода в область повышенного давления, порождая сильные гидродинамические возмущения в жидкости, интенсивное излучение акустических волн. При этом в жидкости происходит разрушение поверхностей твердых тел, граничащих с кавитирующей жидкостью.

Как происходит процесс образования кавитации в жидкости? Рассмотрим возникновение эффекта и протекание по стадиям.

1. Действуем на жидкость УЗ колебаниями малой интенсивности. Как известно, УЗ волна, проходя через жидкость, создает зоны сжатия и зоны разре-

жения, меняющиеся местами в каждый полупериод волны. Возникающее при этом знакопеременное давление можно подсчитать по формуле:

$$P = \sqrt{\rho \cdot C \cdot I} \cdot 4,6 \cdot 10^{-3}, \quad (3.1)$$

где ρ – плотность [г/см³]; C – скорость распространения УЗ [м/с], I – интенсивность УЗ [Вт/см²].

При этом частицы среды колеблются с малыми амплитудами (доли микрометра) и громадными ускорениями, порядка $10^5 \cdot g$.

2. Увеличиваем интенсивность до 1 Вт/см². Появится нарушение однородности жидкости. Что же происходит? В фазу разряжения (пониженного давления) в наиболее слабых местах начинается выделение растворенных газов с образованием одного долгоживущего пузырька.

При этом образующийся пузырек стабилизируется монослоем органических веществ и линейно колеблется с частотой УЗ относительно своего равновесного R . Очевидно, что максимальная амплитуда A у резонансных для данной частоты f пузырьков.

3. Дальнейшее повышение интенсивности до 1,5 Вт/см² приводит к нарушению линейности колебаний стенок пузырьков. Начинается стадия стабильной кавитации. Пузырек сам становится источником УЗ колебаний: гармоник, с частотой $n \cdot f$, субгармоник, с частотами n/f . На его поверхности возникают волны, микротоки, электрические разряды.

4. Четвертая стадия называется стадией неустойчивой кавитации. Возникает при дальнейшем увеличении интенсивности $I > 2,5$ Вт/см². Она характеризуется образованием быстрорастущих парогазовых пузырьков, которые в фазу сжатия мгновенно сокращаются в объеме и схлапываются, т.е. наступает коллапс.

Для разных жидкостей, значения давления, при котором образуется кавитация, находится в пределах от 1,0 до 3,9 атм.

Примеры: вода – 1 атм, касторовое масло – 3,2 атм., керосин – 3,9 атм., четыреххлористый углерод – 1,75 атм.

Чем характеризуется кавитационный процесс?

а) В пузырьке происходит разогрев парогазовой смеси до 8000...12000 °К.

б) Колебания пузырька характеризуются высокой радиальной скоростью стенок, большей скорости звука (340 м/с).

в) В пузырьке создаются большие давления, превышающие 10000 атм.

Теоретически эти цифры могут быть превышены и при определенных условиях можно достичь значений, при которых наступят термоядерные реакции.

5. Что происходит далее, когда газовый пузырек захлопывается ?

а) На месте исчезнувшего пузырька образуется ударная волна.

б) Если пузырек при сжатии имел линзообразную форму, между сближающимися стенками возникает микроточечный электрический разряд высокого напряжения (десятки миллионов вольт).

В результате развития в среде всех стадий кавитационного процесса возникает сложная гидродинамическая обстановка, влияющая на структуру жидкости. Чем она обусловлена?

1. Осцилирующие пузырьки образуют волны давления P в среде.
2. Захлопывающиеся области образуют ударные волны.
3. Существует общее акустическое давление УЗ волны.

Накладываясь друг на друга, на пузырьки газа и твердые частицы, эти факторы в объеме образуют неоднородность давлений P , что порождает быстрые микропотоки и общие течения.

Обобщенно физические и химические эффекты, имеющие место при пульсациях каждого рассмотренного вида парогазовых пузырьков, представлены на рисунке 3.2. Наибольший вклад в многообразие эффектов, показанных на рисунке 3.2, вносят именно захлопывающиеся кавитационные пузырьки [19].

Следовательно, при реализации технологических процессов, интенсифицируемых УЗ колебаниями, необходимо создавать условия возникновения именно захлопывающихся кавитационных пузырьков. При этом существует понятие оптимального времени захлопывания кавитационного пузырька.

Таким образом, в жидкости возникают такие физико-химические явления, как акустическая кавитация, интенсивное перемешивание, переменное движение частиц, интенсификация массообменных процессов. Сопутствующими факторами здесь являются эффекты диспергирования в системе твердое тело–жидкость, жидкость–жидкость (получение суспензий, эмульсий, селективное разрушение клеток и микроорганизмов в суспензиях), расслоение по относительной массе и размеру взвешенных в жидкой среде твердых частиц, коагуляция.

Воздействие УЗ с частотой 20–100 кГц характеризуется разделением молекул и ионов с различной массой, искажением формы волны, появлением переменного электрического поля, капиллярно-акустическим и тепловым эффектами, активацией диффузии.



Рисунок 3.2 – Эффекты кавитации

Здесь проявляются сопутствующие эффекты, влияющие на процессы экстракции из лекарственного, растительного и животного сырья, наблюдается усиление процессов гиперfiltrации, проницаемости клеточных мембран, становятся возможными стерилизация термолабильных веществ, фонофорез, получение концентрированных ингаляционных аэрозолей.

При использовании высокочастотного ультразвукового диапазона частот (более 100 кГц) могут возникнуть изменения в структуре веществ, воздействие на клеточном и субклеточном уровнях.

3.2 Процессы в химии

Под действием ультразвуковой кавитации ускоряются реакции механохимического происхождения, имевшие место в озвучиваемой среде до воздействия ультразвука.

Одновременно инициируются специфические звукохимические реакции, которые без ультразвука не могут быть осуществлены и в основе которых лежит механизм разрыва химических связей. Таким образом, возникновение кавитации может привести к началу химической реакции. Особенно это заметно в воде и других полярных растворителях.

Звукохимические реакции в процессе кавитации в жидкости позволяют:

- изменить пространственную ориентацию, свойства молекул;
- деформировать, рвать межмолекулярные цепочки на отдельные фрагменты;

В этом отношении звукохимические явления являются одним из видов механохимических реакций.

При этом проявляются следующие механохимические реакции:

- в среде могут наблюдаться люминисценция, эрозия, появление активных радикалов, диссоциирование молекул;

- наблюдается появление надперикисей, перикисей водорода, ионов азотной и азотистой кислот, комплексов типа: $(\text{H}_2\text{O}\cdot\text{O}_2)(\text{OH}\cdot\text{O}_2)$, гидротированных электронов;

- образуемые вещества могут дать начало звукохимическим реакциям в парогазовой среде кавитационной области или даже в жидкой среде, тогда образуемые продукты диффундируют в жидкость и там вступают в реакции;

- под действием УЗ ускоряются реакции механохимического происхождения, имевшие место в неозвученной среде;

- одновременно инициируются специфические реакции, которые без УЗ не могут быть осуществлены, и в основе которых лежит механизм разрыва химических связей.

Таким образом, возникновение кавитации приводит к началу химической реакции. Особенно это проявляется в воде и полярных растворителях.

Основным типом протекающих здесь реакций являются окислительно-восстановительные реакции (таблица 3.1).

Таблица 3.1 Окислительно-восстановительные реакции при ультразвуковом воздействии

Вещества, присутствующие в озвучиваемом растворе	Влияние природы газа на скорость реакции (в порядке убывания)	Основные продукты реакции после озвучивания
<i>Окислительно-восстановительные реакции в жидкости</i>		
H_2O	$\text{Xe} > \text{Kr} > \text{Ar} > \text{O}_2$ Воздух $> \text{Ne} > \text{N}_2$ $\text{O}_2 > \text{Ar}$ $(\text{O}_2 + \text{Ar}) > \text{Ar} > \text{O}_2$ Воздух	H_2O_2 H_2O_2 H_2O_2 H_2
$\text{KJ} + \text{H}_2\text{O}$	Воздух $> \text{Ar}$ Воздух $> \text{O}_2 > \text{N}_2 > \text{He}$	J_2 J_2
$\text{KJ} + \text{CCl}_4 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ (I, IN) $\text{H}_3\text{PO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{I}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\text{O}_2 > \text{воздух} > \text{He} > \text{N}_2$ $\text{O}_2 > \text{Ar} > \text{He}$ $\text{O}_2 > \text{Ar}$ H_2 ; $(\text{Ar} + \text{H}_2) > \text{H}_2 > \text{Ar}$	J_2 Fe^{+3} H_3PO_4 I

$\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CS}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}-\text{CHNH}_2-$ $\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_2\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2 > \text{воздух}$ Воздух $\text{Ar} > \text{He} > \text{воздух}$ $\text{Ar} >$ $\text{воздух} > \text{N}_2 > \text{He}$	$\text{Mn}(\text{OH})_2\text{MnO}_2$ $\text{S}; \text{H}_2\text{S}$ HCHO, NH_3 $\text{C}_{10}\text{H}_7\text{O}_3\text{Cl}_2$
$\text{HgCl}_2 + \text{C}_2\text{O}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3] +$ $+d, d-\text{Dp} + \text{H}_2\text{O}$ $[\text{FeDp}_3]\text{Cl}_3 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{ClCH}_2\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}$	Воздух $\text{N}_2 + \text{H}_2$ $\text{O}_2 > \text{Ar} > \text{He} > \text{N}_2 > \text{H}_2$ $\text{O}_2 > \text{Ar} > \text{He} > \text{N}_2 > \text{H}_2$ $\text{O}_2 > \text{Ar} > \text{He} > \text{N}_2 > \text{H}_2$	Hg_2Cl_2 $\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{COOH}$ $[\text{FeDp}_3]^{+2} + \text{CO}_2$ $[\text{FeDp}_3]^{+2}$ Cl^-
<i>Реакции растворенных газов, воды и веществ с высокой упругостью паров (в кавитационной полости)</i>		
O_2 $\text{N}_2 + \text{O}_2$ $\text{N}_2 + \text{H}_2; \text{N}_2$ $\text{CO} + \text{N}_2\text{H}_2; \text{CO} + \text{H}_2$ $\text{CH}_4 + \text{N}_2$ $\text{CCl}_4 + \text{H}_2\text{O}$	– – – – – –	O_3 $\text{HNO}_3, \text{HNO}_2$ NH_3 $\text{HCN}, \text{HCHO}, \text{NH}_3$ HCN, H_2 Cl_2

В фазе захлопывания пузырька происходит электронный пробой. При наличии в парогазовой кавитационной смеси газов CH_4 , NH_3 , H_2 и водяного пара может образоваться более 20 простых и сложных органических веществ, в том числе глицин, аланин, N-метилаланин, p-аланин, мочевины, N-метил-мочевина и кислоты – гликолевая, молочная, янтарная, аспарагиновая, глютаминовая, иминодиуксусная, муравьиная, пропионовая, от-оксимасляная и др.

Все химические реакции начинаются с определенного порога, совпадающего с началом кавитации. Первоначально выход продуктов реакции пропорционален удельной мощности и времени озвучивания. После превышения некоторого значения интенсивности скорость звукохимической реакции резко уменьшается. Это объясняется тем, что при высоких интенсивностях ультразвука растет максимальный размер пузырьков, и они не успевают захлопнуться за полупериод волны.

3.2.1 Зависимость скорости реакций от действия факторов

Образование звукохимических процессов открыто более 60 лет назад, однако до сих пор нет единого мнения о природе первичного акта звукохимического процесса. Однако основные факторы, влияющие на скорость таких реакций, установлены точно [19, 20].

1. Интенсивность УЗ энергии, приходящей на единицу площади излучателя в озвучиваемой среде.

2. Все реакции начинаются с определенного порога интенсивности УЗ колебаний, и этот порог всегда совпадает с началом кавитации.

3. При превышении определенного порога интенсивности скорость реакций резко убывает.

4. На низких частотах кавитация начинается при меньших интенсивностях и, соответственно, реакции протекают при меньших интенсивностях.

5. Скорость химической реакции (рисунок 3.3) ω_0 определяется скоростью образования и расходования радикалов R .

$$\omega_0 = \frac{F_r \cdot \eta_{ха}}{100 \cdot N_a} \cdot \frac{\delta^2 \cdot E}{\delta_v \cdot \delta_\tau}, \quad (3.2)$$

где F_r – начальный выход радикалов, $\eta_{ха}$ – химическая активность КПД, E – звуковая энергия, поглощенная в объеме V за время τ , N_a – число Авогадро, δ^2 – частный дифференциал второго порядка от E по V , частный дифференциал от E (по V и δ).

В качестве примера на рисунке 3.3 приведена зависимость скорости образования йода из йодида калия от интенсивности УЗ при озвучивании в течение 20 минут.

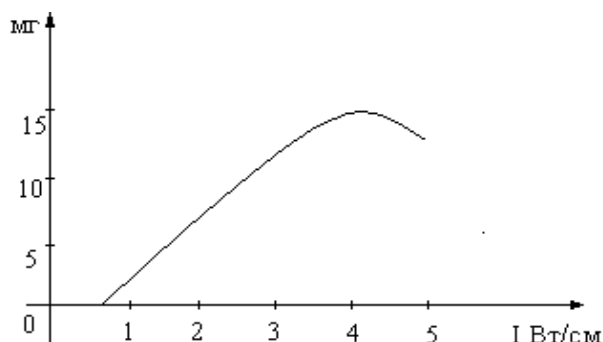


Рисунок 3.3 – Зависимость скорости реакций от интенсивности

Из практики известно, что схлопывание одного кавитационного пузырька приводит к образованию от 10000 до 100000 пар радикалов [20].

Это много больше, чем образуется при ионизирующих излучениях или при фотолизе.

6. Влияние УЗ колебаний различных частот на скорость реакций.

Сегодня однозначно установлено, что возникновение кавитации в любом диапазоне частот приводит к возникновению химических эффектов.

Рассмотрим еще одно важное явление, возникающее в звукохимии, – так называемый эффект защиты.

3.2.2 Эффект защиты

Защитными свойствами отличаются такие вещества, которые, проникая в кавитационную полость, создают условия, затрудняющие процесс ее захлопывания. Они могут вводиться и образовываться в процессе протекания реакций. К ним относятся вещества, обладающие высокой упругостью паров (эфир, спирты, альдегиды и др.) [20].

Ингибируют химические реакции появление в озвучиваемом растворе CO_2 , CO , H_2S и других газообразных продуктов.

Защитными свойствами обладают также вещества, увеличивающие прочность воды.

Пример: обесцвечивание красителей – родамина, бромкрезола зеленого при озвучивании в водных растворах. При этом увеличилась электропроводность и уменьшилось рН озвучиваемого раствора.

Скорость обесцвечивания зависит от начальной концентрации, и обесцвечивание носит необратимый характер. Ингибируют процесс обесцвечивания даже очень малые (доли %) количества этилового спирта, эфира, ацетона, предварительно введенные в раствор.

3.2.3 Процессы деполимеризации полимеров

Действие ультразвуковых волн на полимеры и инициирование полимеризации мономеров было открыто в тридцатых годах. Было показано, что при воздействии ультразвука уменьшается вязкость растворов многих макромолекул: крахмала, желатины, каучука, агар-агара, гуммиарабика. Обнаружено также повышение восстановительной активности параформ-альдегида к аммиаку серебра вследствие образования альдегида.

В последние годы обнаружено, что в расплавах полимеров под действием ультразвуковых волн [20] осуществляются своеобразные химические и физико-химические процессы: значительно и необратимо понижается вязкость расплава, т. е. происходит его механодеструкция. Кроме того, наблюдается диспергирование наполнителя в полимерной композиции и улучшается равномерность его распределения.

Установлено, что механодеструкция полимера связана с возникновением под действием акустических колебаний кавитации в вязком расплаве полимера.

Одновременно наблюдались окислительно-восстановительные реакции. Исследованные полимеры обладали склонностью к образованию гелей и студней; для них характерно возникновение тиксотропного ожижения под действием ультразвука. Ожижение тиксотропных гелей (или студней) под действием ультразвуковых волн осуществляется в определенной мере так же, как при обычном встряхивании. Однако заметную роль в тиксотропном ожижении могут играть и кавитационные процессы, так как при повышенном давлении или в вакууме под действием ультразвука, когда затрудняется пульсация и расщеп-

ление пузырьков, наблюдается лишь небольшое образование жидкости на поверхности. При ультразвуковом облучении растворов желатины, каучука и некоторых других полимеров наблюдалось уменьшение вязкости, которая после выключения ультразвука вновь частично повышалась. Помимо преодоления энергии ван-дер-ваальсовых взаимодействий при изменении структурной вязкости, воздействие ультразвуковых волн приводит к разрыву макромолекул.

При различных исходных молекулярных массах полистирола (850; 350; 195) $\cdot 10^3$ молекулярная масса конечного продукта после длительного воздействия ультразвука постепенно приближается к некоторому минимальному значению $30 \cdot 10^3$. Этот результат можно объяснить тем, что разрушаются главным образом макромолекулы с наиболее длинными цепями.

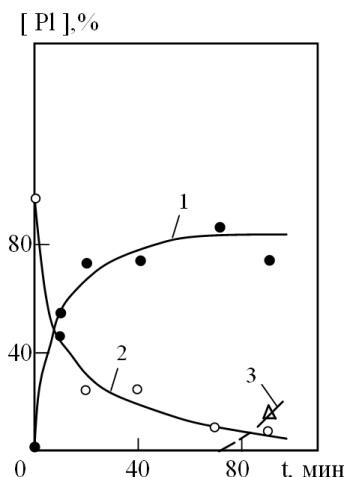
Эффект расщепления макромолекул в акустическом поле, в результате каждого акта которого в растворе возникают два радикала, можно использовать для инициирования полимеризации соединений с двойной связью (или других веществ, способных реагировать с радикалами с образованием макрорадикалов возрастающей длины).

В работе [20] применили метод инициирования цепи механодеструкцией макромолекул ультразвуком для получения привитых и блок-сополимеров. В последующих работах осуществлялась механохимическая сополимеризация в растворах, содержащих смесь полистирола и метилметакрилата, полибутадиена и стирола, полибутадиена и метилметакрилата, поливинилхлорида и стирола [20].

Исследование кинетики ультразвуковой механодеструкции полимеров и сополимеризации позволило установить ряд важных закономерностей этих процессов. При ультразвуковой обработке раствора, содержащего стирол и поливинилхлорид, в присутствии достаточной концентрации ингибитора (п-бензохинона) сополимеризация полностью подавляется.

3.2.4 Процессы полимеризации полимеров

Многие исследователи изучали полимеризацию стирола и других мономеров в ультразвуковом поле в присутствии различных инициаторов (рисунок 3.4). Авторы [20] показали, что скорость образования полистирола под действием ультразвуковых волн с частотой 15 и 500 кГц возрастает в 2 раза.



1 – блок-сополимер; 2 – поливинилхлорид; 3 – полистирол

Рисунок 3.4 – Изменение состава блок-сополимеров и гомополимеров в продуктах реакции при воздействии ультразвука

Вместо непрерывного облучения ультразвуком оказалось возможным кратковременно воздействовать ультразвуковыми волнами на начальном участке кинетической кривой, соответствующем индукционному периоду. При предварительном эмульгировании стирола в воде с помощью ультразвука (18 кГц, 1000 Вт/см²) в течение 0,5–1,0 мин увеличивается скорость полимеризации на начальном участке кинетической кривой, а выход полимера возрастает от 65 до 80 %. При этом естественно объяснить ускорение реакции и образование более крупных полимер-мономерных сферических частиц в образцах, обработанных ультразвуком, тривиальными причинами: высокой дисперсностью исходной эмульсии и более равномерным распределением инициатора и эмульгатора. В работах Крууса с сотрудниками было высказано предположение о том, что под действием ультразвука инициируется полимеризация чистых мономеров: акрилонитрила, стирола, изопрена, метилметакрилата, а также некоторых ароматических соединений – нитробензола, бромбензола и др.

3.3 Применение ультразвука в фармации

В фармации ультразвук находит применение в экстракции, при растворении, получении эмульсий, суспензий, изготовлении микрогранул, стерилизации и фонофорезе, производстве ампул, т.е. там, где ультразвук непосредственно контактирует через жидкую фазу с молекулой вещества [21]. Учитывая это, ряд авторов определяли устойчивость лекарственных средств к воздейст-

вию частотных колебаний. Химическая стабильность молекул определялась путем сравнения ИК-, УФ-спектров озвученных и исходных образцов.

Следует отметить, что ультразвук — не единственный источник образования механохимических реакций. Обычные стадии измельчения, перемешивания, растворения и т.д., широко применяемые в фармации, могут привести к первичным химическим изменениям. Поэтому, рассматривая ультразвук как фактор воздействия на среду, нельзя приписывать ему все изменения, происходящие с молекулой вещества.

Любой технологический процесс находит широкое применение в фармации, если он не нарушает химической устойчивости лекарственных веществ. С этой точки зрения ультразвуковые волны весьма специфичны. Одни препараты под их действием теряют свои свойства, другие остаются нейтральными, третьи, наоборот, становятся терапевтически более активными. Как уже отмечалось, ультразвук, проходя через любую среду, создает в ней при обычных условиях знакопеременное давление. В результате молекулы растворителя, лекарственные вещества, различные частицы и включения, находящиеся в жидкости, должны с частотой волны повторить ее движение. Большинство лекарственных веществ — это конфигурационно сложные микрообъекты, состоящие из волнообразных цепочек, колец, радикалов.

Во время прохождения ультразвука через такую молекулу ее легкая часть будет колебаться в резонансе с частотой волны, а тяжелая часть станет отставать. В результате возникнут зоны напряженности, значительные силы трения, превосходящие силы химической связи, произойдет разрыв цельной молекулы вещества.

Таким образом, в растворе могут наблюдаться явления химической деполимеризации, образование новых макрорадикалов, гомогенизация обрывков и т.д. [21]. Обычно быстрее разлагаются вещества с большой молекулярной массой. При воздействии на низкомолекулярные вещества выделяется молекулярный йод из калия йодида, двухвалентная ртуть превращается в одновалентную, а семивалентный ион марганца — в двухвалентный и т.д.

Ультразвук ускоряет аутооксидацию ряда полифенолов, особенно процессы гидролиза, расщепления, окисления. Скорость гидролиза гликозидов, флавоноидов под влиянием ультразвука больших интенсивностей зависит от места присоединения сахарного остатка и природы флавоноида. При ультразвуковом экстрагировании полифенолов кислотными или щелочными растворителями следует учитывать, что при 50—60 °С полный гидролиз 7-О-глюкозидов и 7-О-глюкуроноидов завершается через 15-20 мин, О-глюкозидов и О-рутинозидов — через 2-2,5 мин, а О-рамнозидов, О-галактозидов — через 0,5-1,5 мин, т.е. практически в 10-15 раз быстрее, чем при обычном гидролизе.

Витамины по-разному реагируют на ультразвук. Так, аскорбиновая кислота в виде водных растворов, в сыворотке крови, молоке, пищевых продуктах окисляется. Витамины группы В (тиамин, пиридоксин, пантотеновая и никоти-

новая кислоты, биотин, инозит) полностью сохраняются при воздействии ультразвука низких частот. При озвучивании на более высоких частотах в течение 3 часов (частота 2,64 МГц, интенсивность 3 Вт/см²) отмечается лабильность тиазолового кольца, которое раскрывается в щелочной среде. Более устойчивы витамины А₂, D₂, В₁₂. В присутствии кислорода, воздуха неустойчивы к продолжительному озвучиванию при больших интенсивностях такие высокомолекулярные соединения, как ферменты, углеводы.

Инактивируются дрожжевая инвертаза, деполимераза, сахароза, диастаза, трипсин. Фермент рибонуклеаза также подвергается изменению, однако биологические свойства его сохраняются. Спирты окисляются, крахмал распадается до декстрина, гликоген – на редуцирующие продукты, молекулы углеводов (глюкозы, фруктозы, мальтозы, галактозы, сахарозы) – до более простых веществ. Замечено также, что чем больше исходная молекулярная масса белка, тем быстрее и глубже идет процесс ультразвуковой деполимеризации.

Природные антрахиноны из листьев и створок бобов кассии, корней и корневищ ревеня, коры крушины, сока алоэ устойчивы к воздействию ультразвука широкого диапазона частот и интенсивностей, что обусловлено устойчивостью их ядра – хризацина. Многие антибиотики под влиянием ультразвука даже увеличивают свою антибактериальную активность: бензилпенициллин, стрептомицин, тетрациклин, мономицин и др.

3.3.1 Процессы растворения

Растворение – физико-химический процесс, протекающий между твердой и жидкой фазами и характеризующийся переходами твердого вещества в раствор. Растворенным веществом считается тот из компонентов, который при обычных условиях находится в агрегатном состоянии, отличном от агрегатного состояния растворителя.

В практике химико–фармацевтических фабрик, заводов, аптечных производств растворение – самый распространенный способ обработки сырья, полупродуктов, получения готовой продукции [20, 21]. В заводских условиях, а также в крупных аптечных учреждениях этим способом получают различные водные, спиртоводные, масляные растворы кристаллических веществ, растворы сухих и густых экстрактов, спирты, ароматные воды, растворы коллоидов, других высокомолекулярных соединений (ВМС).

Процесс растворения, завершающийся исчезновением твердой фазы, существенно отличается от процесса экстрагирования, хотя и для него характерен перенос извлекаемых веществ из пористого материала в растворитель.

При воздействии на процесс растворения ультразвуком с большой интенсивностью в жидкой среде возникают знакопеременное звуковое давление,

способствующее проникновению жидкости в трещины и капилляры растворимого вещества, а также быстрые течения: звуковой ветер, кавитация. Интенсификация процесса растворения, а равно и коэффициент диффузии зависят от значений амплитуды и частоты вынужденных колебаний жидкости. Для растворения полидисперсных взвесей лекарственных веществ, имеющих различные линейные размеры частиц, наиболее эффективно использовать импульсные широкополосные колебания, т.е. колебания большой интенсивности.

При воздействии на среду ультразвука уменьшается динамическая вязкость полярных жидкостей; микротрещины и поры, имеющиеся в твердой фазе, разветвляются, увеличиваются их размеры и глубина. Рассматривая гидродинамику среды в одиночном капилляре (трещине), можно различить три зоны: с турбулентным движением жидкости, с вязким подслоем и с диффузионным подслоем. У кромки открытой микротрещины при интенсивном движении жидкости происходят турбулизация микропотоков, а затем и срыв вихрей. Здесь процесс растворения твердой фазы лимитируется коэффициентом турбулентной диффузии. Поступающие из первой во вторую зону турбулентные пульсации осуществляют перенос основной массы растворимого вещества. В третьей зоне массообмен обусловлен хаотическим молекулярным движением. Продольные и поперечные размеры микротрещин являются важным фактором в процессе растворения. При возникновении ультразвукового переменного давления ($\pm 5 \times 10^5$ Па) в жидкости, находящейся в трещине, создаются колебательные тангенциальные смещения микрообъемов растворителя вдоль стенок, которые переходят в однонаправленное движение раствора. Молекулярная диффузия практически сменяется достаточно быстрым конвективным массопереносом.

Таким образом, при использовании ультразвука как средства интенсификации процесса растворения существенное значение имеют микропульсации растворителя, в особенности если длина волны равна или меньше размера твердой частицы или же линейных размеров микротрещин, пор, капилляров.

Данные свидетельствуют о том, что ультразвук на два порядка ускоряет стадию растворения растворимых веществ, в 10–30 раз – трудно- и медленно-растворимых препаратов, в 3–5 раз – малорастворимых. С помощью ультразвука при обычной температуре 0–25 °С) увеличивается предел растворимости в диапазоне трудно- и практически нерастворимых веществ, причем концентрация насыщения может превышать известные константы в 5–30 раз.

3.3.2 Процессы экстрагирования

Сегодня очень многие биологически активные вещества получают из природного сырья растительного или животного происхождения. Каждый третий лекарственный препарат из имеющихся в арсенале современной медицины – продукт растительного происхождения. Следует также отметить, что в терапии отдельных заболеваний препараты из растений занимают доминирующее по-

ложение. Так, на долю препаратов растительного происхождения приходится 80 % маточных, 77 % сердечных, 72–74 % отхаркивающих, противоглистных, желудочных средств.

Ультразвук в направлении от излучателя формирует во всем озвучиваемом объеме звуковой ветер, который создает общее течение (ламинарное или турбулентное), а сила ветра зависит как от интенсивности ультразвука, так и от параметров среды [21]. В докавитационный период экстрагирования сырья наиболее четко проявляется ультразвуковой эффект. Мощные ультразвуковые волны значительно увеличивают скорость пропитки различных материалов, имеющих капиллярную структуру.

Это объясняется тем, что высота подъема жидкости под действием ультразвука увеличивается и находится в прямой зависимости от диаметра капилляра и избыточного звукового давления. Звукокапиллярное давление независимо от положения источника ультразвука всегда направлено по нормали к срезу капилляра.

Время замачивания зависит от скорости вытеснения воздуха из клетки, т.е. от значения капилляропроводности сырья. Однако многие капилляры заканчиваются в пачках и фибриллах, не выходя наружу. Здесь воздух удерживается до тех пор, пока не растворится в экстрагенте. Кроме того, часть воздуха в виде воздушных пузырьков различной конфигурации остается внутри клетки.

Ультразвук, создавая звукокапиллярный эффект, не только ускоряет вытеснение таких пузырьков воздуха, но и создает условия для растворения его в жидкостях. Образуется вакуум, т.е. возникает так называемый эффект губки. В результате время замачивания сырья под действием ультразвука значительно сокращается.

На скорость процесса экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья с помощью ультразвука оказывают влияние факторы, зависящие как от физико-механического состояния сырья и природы растворителя, так и от параметров озвучивания. Как уже отмечалось ранее, эффективность процесса экстракции во многом зависит от морфолого-анатомического строения сырья, а в связи с этим и его дисперсности. Если, например, исходным сырьем является трава растений, имеющая тонкую рыхлую листовую пластинку с мягкими оболочками клеток и большим числом путепроводящих тканей, межклеточных пространств, то размер частиц, как правило, не играет существенной роли и может колебаться от 2 до 8 мм.

Из сырья природного происхождения ультразвуком возможно извлекать практически все известные соединения, продуцируемые растениями. При использовании ультразвука наблюдается не только значительное ускорение производственного процесса, но и увеличение по сравнению с другими способами экстрагирования выхода основного продукта. Так, озвучивание мезги сырой капусты позволяет дополнительно на 33 % увеличить выход тартроновой кислоты – эффективного средства, тормозящего превращение в организме угле-

водов в жиры; на 18 % – выход инулина из корней лопуха, из клубней топинамбура – важного источника получения D-фруктозы; на 15 % – выход алкалоида платифиллина – эффективного M-холинолитического средства. Отмечено увеличение выхода некоторых эфирных и жирных масел, в том числе розового и облепихового. Трава ландыша и полыни горькой, листья мяты перечной, зверобоя, красавки, наперстянки, горицвета, цельнолистника, тысячелистника, цветы ромашки аптечной, ноготков и др. Такое сырье быстро набухает, клетки тургоризуются в течение нескольких десятков минут. Так, если для измельченной травы горицвета, чабреца, пустырника время оптимального набухания составляет в обычных условиях около 2 ч, а для корневищ с корнями валерианы, синюхи, девясила, аира и других видов сырья 6–8 ч, то при использовании ультразвука достаточно 30 мин замачивания и 10 мин озвучивания, чтобы сырье полностью набухло.

Если же озвучиваемое сырье представляет собой группы сильно одревесневших клеток плотной структуры, то для процесса экстракции определяющим параметром становится число разрушенных клеток. С увеличением степени дисперсности частиц сырья коэффициент отражения звуковой энергии на границе раздела фаз ввиду быстрой пропитки мелкоизмельченного сырья экстрагентом будет минимальным, интенсивнее происходит растворение и вымывание содержимого из разрушенных клеток. Следовательно, при озвучивании время экстрагирования сокращается.

При прохождении ультразвука даже небольшой интенсивности 1 Вт/см^2 (частота 1 МГц) в тканях животного происхождения в результате значительных ускорений частиц возникает ряд механических и физико-химических явлений, в первую очередь разрыв фибрилл ткани (при поперечном движении ультразвуковой волны), вследствие чего образуются пустоты [21]. Наиболее вероятной причиной разрушения ткани является механическое смещение клеток, содержимое которых увеличивается с ростом интенсивности и уменьшением частоты ультразвуковой волны. Доля различных факторов, влияющих на экстракционный процесс, неодинакова. Действие переменного давления и кавитации составляет 29 %, радиационного давления 15 %, нагрева 11 %, а на долю перемешивания приходится 45 %.

С помощью ультразвука на предприятиях различных отраслей народного хозяйства были получены адреналин из мозгового вещества надпочечной железы, инсулин из поджелудочной железы, лидаза из семенников крупного рогатого скота, пантокрин из рогов марала, пятнистого оленя, изюбра, пепсин из автолизатов свиных желудков, спленин из селезенки крупного рогатого скота, цитохром С из сердечной мышцы убойного скота.

Ультразвуковой метод позволяет получить многие биологически активные вещества животного происхождения: ферменты (трипсин, химотрипсин, дезоксирибонуклеаза, рибонуклеаза, гепарин), гормоны (тироксин, эстрогены,

АКТГ, тиреодин, кортин), витаминные препараты (камполон, антианемин, Би-тами Эй и др.).

3.3.3 Процессы эмульгирования

Одной из основных технологических стадий в процессе изготовления эмульсий, суспензий, линиментов (жидких мазей) является перемешивание или диспергирование. В условиях фармацевтических фабрик для этого используется различная аппаратура, в том числе акустическая [22].

Значительное давление, которое развивается при аннигиляции кавитирующих пузырьков, уже в течение ряда лет используется для дробления и размельчения лекарственных веществ.

Получение эмульсии – довольно трудоемкая операция, заключающаяся в равномерном распределении одной жидкости в другой. По своим фармакологическим свойствам эмульсии имеют ряд преимуществ перед другими лекарственными формами вещества: они быстро всасываются в организм при любом способе введения, обладают корригирующими свойствами, смягчают раздражающее действие лекарственных веществ на слизистую оболочку, ускоряют процесс гидролиза жиров ферментами желудочно-кишечного тракта и т.д.

Ультразвук позволяет получить более стойкие эмульсии по сравнению с механическим диспергированием (в миксере) или обработкой звуковым свистком. Частотные колебания позволяют получать эмульсии с широким диапазоном дисперсности эмульгируемых частиц из жидкостей и веществ, которые не поддаются эмульгированию. Однако важнее другое. Получаемые ультразвуком эмульсии достаточно устойчивы при длительном хранении, дробление дисперсной фазы обеспечивает получение частиц с размерами 1–0,5 мкм).

Во время ультразвукового озвучивания гетерогенных систем отмечается одновременное протекание двух различных процессов: образование эмульсии на границе раздела фаз и коагуляция ее частиц во всем объеме системы. Каждый параметр ультразвука имеет определенное пороговое значение, при котором наступает равновесие между диспергированием и агрегацией частиц, способствующее образованию одинаковых по размеру частиц.

Коагуляция частиц происходит в силу ряда причин:

а) если при интенсивном диспергировании изменяется целостность адсорбционно-сольватных слоев;

б) если во время турбулизации жидкости увеличивается частота столкновений вытянутых распавшихся капель (отсутствие защитных слоев только способствует этому);

в) если продолжительность коалесценции меньше, чем период формирования защитного слоя на капле, который способствует стабилизации эмульсии.

Эффективность получения эмульсии с заданными параметрами зависит и от физико-механических и химических свойств жидкостей частиц, в особенности при малых концентрациях эмульгатора. На стабильность эмульсии влияют природа масляной фазы, ее физико-химические свойства. При одном и том же эмульгаторе (жирсахара, твины, спены, природные ПАВ и др.) устойчивость эмульсий равной концентрации, полученных с помощью ультразвука, неодинакова и, как показали исследования, убывает в следующей последовательности: рыбий жир–персиковое масло – касторовое масло – вазелиновое масло. По-видимому, это связано с прочностью адсорбционных слоев системы эмульгатор – масло.

Эмульсии различных лекарственных веществ достаточно устойчивы при получении их в интервале температур до 40–45 °С, что объясняется понижением вязкости, поверхностного натяжения жидкостей, эффективностью кавитации, когда возможность диспергирования их друг в друге велика, причем дисперсность масляной фазы увеличивается за счет нарастания числа частиц размером менее 2 мкм. После превышения температурного порогового значения происходит коалесценция частичек, которые всплывают на поверхность эмульсии в виде масляных капель-пятен.

С помощью ультразвука также трудно получить устойчивые эмульсии [21, 22], если вязкость диспергируемой жидкости выше 110–130 сантипуаз (касторовое масло, ланолин, глицерин и др.), что объясняется большой разницей степени поглощения акустической энергии одной из жидкостей по сравнению с другой или образованием полимеризующихся тонких пленок, что, например, имеет место при эмульгировании эвкалиптового масла.

С помощью ультразвука были получены и применялись в лечебной практике эмульсии мугроля, альбихтола, фтороуглеродов в синтетическом кровезаменителе, эмульсии касторового, вазелинового масел, для внутреннего употребления рыбьего жира, эмульсии сульфидно-стрептоцидовая, стрептоцидовая, синтомициновая, нафталанской нефти, лечебных грязей и другие, предназначенные для наружного применения.

3.3.4 Процессы получения суспензий

Суспензия – это жидкая лекарственная форма, представляющая собой кинетически неустойчивую грубодисперсную систему, где дисперсионная среда – жидкость (вода, спирт, масла), а дисперсная фаза — тонкие дисперсии твердых частиц лекарственных веществ размером не менее 10^3 нм [22]. Суспензии получают методами конденсации и диспергирования. Высококонцентрированные суспензии (пасты) занимают промежуточное положение между порошками и суспензиями, для них характерны процессы синерезиса, дилатансии, так как это коллоидные системы с внутренней структурой.

Свойства суспензий близки к свойствам лиофобных золей. Агрегативная устойчивость суспензий определяется диффузными электрическими слоями:

концентрированные электролиты их коагулируют, проявляется электрофорез частиц при наложении поля и т.д. В статических условиях суспензии расслаиваются на две фазы.

Измельчение с помощью ультразвука можно отнести к активному измельчению, так как частицы разрушаются независимо от их размера и плотности. Они разрываются под действием частотных колебаний и микроударного действия ультразвуковой кавитации, причем исключение больших поверхностей в рабочей камере позволяет сохранить чистоту исходного материала. В основе процесса диспергирования лекарственных веществ в жидкости лежат те же механизмы воздействия на среду и вещество, которые проявляются при растворении. При получении суспензий озвучиванием также имеют место: знакопеременное давление, которое возникает в каждый полупериод прохождения волны в зонах сжатия и разрежения (в случае стоячей волны в точках максимума давление удваивается); звуковой ветер, направленный в сторону от излучателя, вызывающий мощные течения во всем озвучиваемом объеме; значительные амплитудные смещения и ускорения, которые воздействуют на частицы среды, вызывая их мгновенные перемещения в пространстве; растворение воздушных пузырьков.

С помощью ультразвука были получены диспергированный уголь, концентрированные золи-суспензии: серы, фенил-салицилата, пентоксила, цинка, ртути, благородных металлов [22]. Так, 0,25 %-ный микродисперсный золь золота, полученный с помощью ультразвука, применяется при лечении хронического суставного ревматизма и туберкулеза. Адреналин, диспергированный в масле с помощью ультразвука, обладает дюрантным действием, что позволяет улучшить состояние больного при астме. Возможно использование диспергирующего действия ультразвука для измельчения мясистых органов и тканей растительного и животного происхождения например, листьев алоэ, для очистки плодов, фруктов, ягод, растительной мезги для измельчения мелких растительных клеток (хлореллы, спор, пыльцы), а также для экстракции некоторых гормональных препаратов из животного сырья, когда требуется тонкая гомогенизация. Особого внимания заслуживает применение ультразвука при обработке бентонитов. В медицинской и фармацевтической практике в качестве вспомогательных материалов широко применяются глинистые минералы. В небольших концентрациях они образуют устойчивые суспензии, дают возможность при высыхании получать прочные, проницаемые для газов и влаги, обладающие высокой адсорбционной способностью легкосмываемые пленки для нанесения на раны. Физико-механические свойства этих пленок легко могут быть изменены, что дает возможность получать препараты с заданными свойствами. Кроме того, их применение экономически выгодно, так как они дешевы и доступны. Традиционно применяемые ценные и дефицитные вещества (глицерин, свиной жир, крахмал, мука, ликоподий и т.д.), входящие в состав некоторых эмульсионных и гидрофильных мазевых основ, линиментов, таблеток, пилюль,

гранул, лечебных зубных паст, могут быть с успехом заменены глинистыми минералами при сохранении высокого качества лекарств.

Наиболее эффективным методом стабилизации суспензий глинистых минералов является метод химической обработки совместно с ультразвуком. Для «восстановления» упруго-пластично-вязких (тиксотропных) свойств и повышения стабильности водных суспензий палыгорскита, подвергнутого глубокому термическому воздействию, можно применить методы ультразвукового диспергирования частиц твердой фазы и коллоидной защиты. Ультразвуком (частота 19,5 кГц, амплитуда переменного звукового давления 6 атм., амплитуда колебаний частиц 2,42 мкм, амплитуда ускорения частиц $3,6 \times 10^4$ м/с²) в течение 5–7 мин обрабатывали суспензию бентонита в критической или близкой к критической концентрации. В результате увеличения дисперсности частиц гидрофильные свойства бентонита после воздействия ультразвуком всегда выше, чем у исходного неозвученного образца. При увеличении числа частиц минерала в единице объема между ними образуются новые более прочные контакты, происходит перераспределение гидратных оболочек. Все это приводит к повышению устойчивости суспензии. После термической активации образцов бентонитов при 100, 200, 300 °С и воздействии на их водные дисперсии ультразвуком имеет место преобладающее развитие в системах быстрых эластических деформаций (более 50 %) и повышение коэффициентов устойчивости коагуляционных структур в 1,2–1,5 раза, т.е. идет пептизация суспензии, свидетельствующие о влиянии ультразвука на структурно-механические показатели бентонита, подвергнутого термической активации при температуре от 100 до 400 °С.

Электролиты с одноименными ионами в концентрации до 1 % мало влияют на гидрофильные свойства глинистых минералов. При возрастании концентрации эти свойства резко ослабляются. Особенно чувствительны к электролитам минералы групп монтмориллонита и каолинита. Многие лекарственные вещества, вводимые в ту или иную жидкую лекарственную форму, являются сильными электролитами. Озвучивание бентонитов позволяет в 20–30 раз увеличить их стабильность по отношению к коагулирующему действию электролитов, что в свою очередь дает возможность расширить рецептуру суспензий, сухих мазей-концентратов и т.д.

3.4 Применение ультразвука в пищевых производствах

3.4.1 Процессы обработки мяса и рыбопродуктов

Применение ультразвуковых колебаний позволяет улучшить качество мяса и рыбы, а также ускорить процессы их обработки, улучшить нежность мяса, полученного, например, из сухожильного мускула крупного рогатого скота [23]. Объясняется это тем, что под действием ультразвука происходит частичное механическое разрушение волокон мышечной и соединительной тканей и

создаются благоприятные условия для действия ферментов мяса и ускорения химических процессов в тканях. Обработка мяса может осуществляться двумя способами:

1. Куски мяса погружаются в заполненную рассолом (5 %) емкость. Продолжительность обработки зависит от размеров кусков мяса и их количества в технологическом объеме, а также мощности УЗ аппарата. Так, обработка 100 г мяса в виде кусочков размером 10x10 мм не должны превышать 5–7 мин при использовании аппарата мощностью не более 150 ВА (Аппарат «Алена»).

2. Обработка производится в непосредственном контакте рабочего инструмента с поверхностью куска мяса. Для этого рабочий инструмент (окончание) колебательной системы касается обрабатываемого мяса и перемещается вдоль куска. При толщине куска мяса 10 мм и его размере, равном 10 см², продолжительность обработки составит 1–2 мин.

Оба способа обработки позволяют получить готовый продукт высокого качества. Диффузионные процессы посола в большинстве случаев являются самыми медленными стадиями приготовления конечного продукта. Проведенные исследования показали, что посол с помощью ультразвука интенсифицирует процесс в значительно большей степени, чем обычное механическое перемешивание или термический нагрев. Ультразвуковой посол позволяет получить нежные, равномерно окрашенные куски продукта без их предварительного внутримышечного шприцевания и соответственно получить конечные продукты (например, окорока) без повреждения тканей. Наилучшие результаты получаются при посоле 100–200 г мяса по следующей технологии: 10 мин УЗ обработки, охлаждение до температуры 10–15 градусов, последующая обработка в течение 10 мин и выдержка в течение суток в рассоле для полной готовности продукта. По аналогичной технологии осуществляется посол свиного сала. При посоле рыбы очищенную тушку длиной 15–30 см укладывают в рассол на дно емкости и производят УЗ воздействие 10–20 мин. После обработки выдерживают продукт в рассоле в холодном месте не менее 5 ч.

При необходимости уменьшения содержания соли в мясо- и рыбопродуктах осуществляется отмачивание продуктов. Отмачивание может осуществляться в воде, молоке, растворе уксуса. Для получения практически несоленого продукта из соленого, уложите этот продукт на дно емкости и залейте в него максимально допустимое количество воды (500–700 мл). Произведите обработку в течение 10 мин и слейте полученный рассол. Если продукт недостаточно несоленый, повторите обработку, залив свежую порцию воды. Аналогичным образом осуществляется отмачивание сельди в молоке или растворе уксуса. При отмачивании любых продуктов стремитесь максимально использовать объем емкости, в которой производите обработку. При этом эффективность отмачивания убывает при количестве отмачиваемого продукта более 10 % по объему от жидкости.

Обычно извлечение жира из мягкого жиросодержащего сырья осуществляется термическими способами. При этом происходит ухудшение качества жира (изменение цвета и запаха). При использовании УЗ обеспечивается извлечение жира без термического воздействия при одновременном улучшении его вкусовых качеств (цвет и запах). При извлечении жира мягкое животное сырьё измельчается. К измельченному сырью добавляется 30 % подсолонной воды с температурой около 40 градусов и осуществляется обработка 20–30 минут. Выход жира при озвучивании мягкого жиросодержащего сырья составляет 60–75 %, выход костного жира – до 15 % [24, 25].

Технология, аналогичная описанной, позволяет в несколько раз ускорить процесс извлечения жира из печени рыб и увеличить его выход при приготовлении рыбьего жира в домашних условиях.

3.4.2 Процессы эмульгирования пищевых продуктов

Многие вещества в домашнем хозяйстве используются в виде эмульсий, например, различные майонезы, маргарины, кетчупы и т.п. Дробление жировых частиц молока до микроскопических размеров, т.е. получение мелкодисперсной жировой эмульсии, почти на треть повышает питательную ценность молока. Введение в тесто жировых эмульсий вместо жира улучшает качество хлебобулочных изделий. Жировые эмульсии могут использоваться для смазки форм и листов в хлебопечении, сохраняя до 90 % используемого в настоящее время жира [24]. В парфюмерном производстве очень эффективным является использование ароматических эмульсий эфирных масел. Получение лечебных эмульсий, заключающееся в равномерном распределении лекарственного жидкого препарата в воде, является в обычных условиях сложной задачей.

Устойчивость эмульсий, полученных с применением ультразвука, много выше, чем полученных обычным способом. Ещё одним важнейшим достоинством является сверхтонкое дробление лекарственного препарата (до 0,1–0,05 мкм), изменяющее его свойства настолько, что становится возможным неспецифический путь введения в организм. Например, камфорная эмульсия пригодна для внутривенного введения, а кукурузное масло для парентерального питания. Приготовленная с помощью ультразвука эмульсия оливкового масла в воде (в качестве эмульгатора использован лецитин) оказывается лишенной токсических свойств и способности вызывать жировую эмболию. При приготовлении лекарственных эмульсий с помощью фитомиксера необходимо учитывать, что для каждого вещества существует предельная концентрация получаемой эмульсии.

Максимальная концентрация эмульсий, получаемых с помощью ультразвука без применения стабилизирующих веществ, обычно не превышает 15 % (максимальная концентрация эмульсий, получаемых механическим взбивани-

ем, меньше 15 %). Применение стабилизаторов (эмульгаторов) позволяет получать эмульсии с концентрацией более 50 %. Эта зависимость характерна в основном для эмульсий типа вода – масло, которые менее устойчивы. Полученные с помощью ультразвука эмульсии масел в воде сохраняют свою стабильность в течение нескольких месяцев и без эмульгаторов. При получении эмульсий эфирных масел (розового, укропного, мятного, пихтового, бархатцев и т.п.) эмульгаторы не используются, так как в составе масляной фазы имеется достаточное количество эмульгирующих природных компонентов – спиртов.

При получении лечебных масел (касторового, рыбьего жира, персикового, абрикосового, вазелинового, шиповникового и других) применение стабилизирующего вещества (например, поливинилового спирта в количествах, менее 1 %) позволяет получать более устойчивые эмульсии, чем без стабилизаторов. При использовании касторового масла за 1 мин обработки удастся получить устойчивые эмульсии с концентрацией до 10 % без применения стабилизаторов. Эмульсия с концентрацией более 10 % получается грубодисперсной и расслаивается в течение нескольких часов.

Эмульсия касторового масла приготавливается с целью корригирования вкусовых качеств масла для внутреннего применения в педиатрической практике. Полученная в результате УЗ обработки эмульсия приятна на вкус, по виду напоминает молоко и устойчива в течение нескольких часов. Аналогичные результаты получаются при приготовлении эмульсии рыбьего жира. Эмульсия полностью утрачивает неприятный вкус и запах рыбьего жира. Приготовление эмульсий облепихового и шиповникового масел для внутреннего и наружного потребления в объемах 200–300 мл осуществляется в течение 1–2 мин.

В домашних условиях и аптеках можно приготавливать также:

– жидкость Шинкаренко (4,5 части рыбьего жира, 4,5 части воды, 1 часть поливинилового спирта) для наружного применения, хорошо распределяющуюся по поверхности мокнувших ожоговых ран;

– водновазелиновую эмульсию, стабилизированную поливиниловым спиртом (4:4:2), используемую как наружное защитное средство;

– для внутреннего и наружного потребления можно получать эмульсии мугроля, альбихтола, сульфиднострептоцидовую, стрептоцидовую, синтомициновую, нафталанской нефти, лечебных грязей и др.

При приготовлении эмульсий лечебных масел необходимо учитывать следующее:

1. Устойчивость эмульсий убывает в следующей последовательности: эфирные масла – рыбий жир – касторовое масло – вазелиновое масло.

2. Эмульсии эфирных и лечебных масел наиболее устойчивы при их получении при 40–45 °С.

3. С помощью ультразвука трудно получить эмульсии высокой концентрации из очень вязких жидкостей: ланолина, глицерина и т.п.

4. При приготовлении эмульсий инструмент колебательной системы рекомендуется располагать ближе к границе раздела масло–вода.

5. Во избежание загрязнений трудноудаляемыми маслами рекомендуется приготавливать эмульсии в стеклянной посуде (например, стандартных стеклянных банках, стаканах и т.п.).

Эмульгирование с помощью ультразвука является наиболее эффективным способом получения эмульсий, и в том числе эмульсий из животных и растительных жиров [25]. Анализ возможностей получения и применения эмульсий позволяет рекомендовать их для производства колбасных изделий, вводя жировые эмульсии в фарш колбасных изделий вместо жира-сырца. Добавление в фарш эмульсии свиного жира позволяет увеличить его водосвязывающую способность, а следовательно, повысить выход продукции и улучшить её качество. Используемые в этом случае эмульсии являются высококонцентрированными и поэтому при их получении необходимо использовать мощные стабилизирующие вещества с длинными молекулами, придающими эмульсиям высокую устойчивость. Наиболее доступным и эффективным эмульгирующим и стабилизирующим веществом является желатин. Разрушение в результате УЗ воздействия структуры раствора желатина способствует эффективной стабилизации эмульсии, т.к. отдельные капельки жира попадают внутрь ячеек сплошной сетки. Благодаря способности обломков структуры желатина к быстрому срачиванию, мельчайшие капельки жира остаются внутри ячеек восстановленной сетки и после снятия ультразвукового воздействия.

Технология получения жировых эмульсий заключается в последовательном получении с помощью УЗ аппарата раствора желатина и постепенном введении в раствор эмульгируемого расплавленного жира [26]. Максимальная эмульгирующая эффективность наблюдается при содержании желатина от 0,25 % до 1,0 %. Дальнейшее увеличение концентрации желатина не дает существенного эффекта, поэтому применение желатина в концентрациях более 0,75–1,0 нецелесообразно. При отсутствии желатинового раствора можно использовать в качестве стабилизатора эмульсий бульоны, получаемые при выварке кости или варке ветчинных изделий. Еще одним из самых доступных стабилизаторов является обезжиренное порошковое молоко. В этом случае для приготовления эмульсии свиного жира с концентрацией до 30 % необходима концентрация порошкового молока до 10 %. Получаемая при этом эмульсия является однородной и устойчивой в течение длительного времени.

Известно, что введение жировых эмульсий при производстве сосисок позволяет резко сократить выдержку мяса в рассоле, снизить затраты труда и использовать в производстве сборный и костный жиры. По данным, приведенным в той же работе, питание больных колбасными изделиями, содержащими жировые эмульсии, дает положительные результаты при лечении заболеваний печени и желчного пузыря. Кроме того, при введении в фарш высокодисперс-

ной жировой эмульсии можно получать высококачественный готовый продукт из дефростированного мяса без предварительной выдержки в посоле.

Эмульгирующее действие ультразвука используется также для получения ароматических эмульсий в пищевой промышленности. В настоящее время широко используются маслянистые экстракты пряностей вместо порошкообразных специй. Высокая ароматичность экстрактов позволяет вводить их в количестве, в 20–30 раз меньшем, чем при использовании натуральных пряностей. Водные эмульсии получают из экстракта (например, душистого перца) при требуемых соотношениях воды и экстракта. Получаемые эмульсии сохраняют стабильность в течение нескольких недель и даже месяцев.

При приготовлении эмульсий из экстрактов специй не следует предпринимать специальных мер охлаждения обрабатываемой жидкости, т.к. интенсивность запаха душистого перца не уменьшается при нагревании эмульсии до 100 °С и даже при её кипячении.

Введение жировых эмульсий вместо жира в хлебобулочные изделия (5 % подсолнечного масла) повышает их качество. Так, удельный объем хлеба увеличивается в этом случае в 1,3 раза, пористость в 1,1 раза, сжимаемость в 1,11 раза.

Во всех перечисленных случаях применение эмульсий, полученных с помощью ультразвука, дает положительные результаты.

3.4.3 Ультразвуковая обработка молока

Особенность многих компонентов молока в том, что природа не повторяет их ни в каком другом продукте питания. В молоке жир распределен в виде жировых шариков, окруженных сложной белковой оболочкой, т.е. представляет собой эмульсию молочного жира в воде. Размер жировых шариков колеблется от 1 до 5 мкм [24]. Причем количество жировых шариков, имеющих размер более 2 мкм, составляет более 50 % и зависит от породы и индивидуальных особенностей коровы. Питательная ценность молока в значительной степени определяется размерами частиц жира в молоке. Сверхтонкое дробление жира в эмульсиях очень сильно изменяет свойства исходного продукта. Известно, что дробление жировых шариков молока до меньших, чем в исходном состоянии, размеров на треть повышает питательную ценность молока.

Оптимальной является обработка молока при температуре 55–70 °С, позволяющая получать более 80 % от общего числа жировых шариков размером менее 2 мкм. При такой обработке молока происходит пастеризация молока. При этом количество болезнетворных бактерий существенно сокращается. При этом за 8–10 мин обработки сырого молока (250 мл), обеспечивается снижение обсемененности до нормы (менее 200000 КОЕ в 1 мл.). При ультразвуковой обработке молока не происходит разрушения наиболее лабильной части витамина С, и его содержание остается практически равным исход-

ному – 0,83 мг (пастеризация паром снижает концентрацию до 0,65 мг, инфракрасным излучением – до 0,75 мг, кипячение практически полностью разрушает витамин С). Таким образом, УЗ обработка обеспечивает повышение питательной ценности молока и его пастеризацию.

Следует отметить еще несколько положительных сторон УЗ обработки молока, способных найти широкое применение.

1. Обработанное УЗ и замороженное для длительного хранения молоко после размораживания полностью сохраняет свои питательные и вкусовые качества.

2. Сухое молоко, выработанное из обработанного ультразвуком, хранится значительно дольше. При восстановлении не отличается от натурального.

3. При ультразвуковой обработке пригодного к употреблению молока (в т.ч. пастеризованного) в домашних условиях в течение нескольких минут, кислотность молока не повышается более 5 часов.

3.4.4 Процессы приготовления сыров

Сыр – высококачественный пищевой продукт. Он содержит большое количество легкоусвояемых полноценных белков, молочного жира, различных солей и витаминов. В домашних условиях, пользуясь традиционными рецептами, можно приготовить несколько видов сыров. Однако всякое приготовление сыра немыслимо без сычужного фермента. Фермент на фабриках изготавливается из сычужков жвачных животных или желудков свиней (пепсин). При отсутствии сычужного порошка или пепсина заводского изготовления можно использовать экстракт, приготавливаемый с помощью фитомиксера из сухих ягнячьих или телячьих сычужков или желудков свиней. Активность заводского порошка сычужного фермента – 100 тыс. ед., активность экстракта, полученного традиционным способом, – 800 тыс. ед., а получаемый с помощью ультразвука экстракт имеет активность 1670 тыс. ед. Выход фермента при обработке ультразвуком получается на 35 % выше, чем в контрольной партии. Необходимое количество фермента (1 мл на 10 л) вливается в молоко, гомогенизированное ультразвуком, в течение 10 минут производится УЗ воздействие на весь объем заквашенного молока (10 л) [24]. Такое воздействие раздробит фермент, равномерно распределит его по всему объему молока и ускорит ферментацию, т.е. сократит время приготовления сыров.

3.4.5 Процессы приготовления соков

Препараты из свежих растений содержат значительно больше активных веществ, чем из высушенного сырья. В этих препаратах и соках содержится весь комплекс веществ в их естественном виде. Традиционный способ изготовления соков и извлечений из свежих растений и плодов заключается в прессо-

вании предварительно измельченного сырья в специальных матерчатых мешках или салфетках. Малосочные растения измельчают и настаивают со спиртом в течение длительного времени (10–15 суток). В обоих случаях живые клетки оказывают сопротивление внешнему воздействию, т.е. во время прессования не все клетки раздавливаются, а при действии спирта его проникновение внутрь клеток идет очень медленно. Поэтому при приготовлении соков стремятся измельчить исходное сырье до мелкодисперсного состояния. Но это не всегда дает только положительный эффект, так как при этом в раствор выходит большое количество балластов (белков, пектинов и др.). Проведенные исследования подтвердили эффективность диспергирующего действия ультразвука для увеличения сокоотдачи при обработке свежего сырья (в том числе лекарственного). Под действием ультразвука проницаемость оболочек клеток увеличивается и процесс извлечения биологически активных веществ ускоряется. Ультразвуковая обработка мезги свежих листьев алоэ, корней белладонны, травы ландыша, листьев очистка большого, подорожника, каланхоэ, капусты перед прессованием увеличивает выход сока из сырья в среднем на 10 %. Получаемые соки более прозрачны, чем получаемые обычными способами. Оптимальное время обработки составляет 20–30 мин. Вкус и основные показатели приготовленного продукта при ультразвуковой обработке не изменяются.

При приготовлении извлечений из свежих малосочных растений наибольший выход основных действующих веществ происходит через 15–20 мин обработки. В отдельных случаях ультразвуковая обработка позволяет увеличить выход суммы извлекаемых полезных веществ на 5–7 % (например, из травы донника белого и желтушника, корней радиолы розовой). Кроме приготовления лекарственных соков и извлечений ультразвуковое воздействие повышает эффективность извлечения пищевых соков (например, из мезги винограда и различных ягод). Сокоотдача винограда увеличивается с увеличением времени ультразвукового воздействия. Так, при 30-минутной обработке выход сока увеличивается

с 66 % до 71 % после первого прессования и с 74 % до 79 % после второго прессования. Время обработки мезги дробленых ягод в течение 20–30 мин является оптимальным, так как дальнейшее время обработки становится малоэффективным. Оптимальное время обработки в фитомиксере зависит от высоты слоя обрабатываемого сырья (т.е. от обрабатываемого объема). При объеме измельченного сырья 200–300 мл достаточно 10 мин обработки. При увеличении объема до 500–700 мл время обработки следует увеличивать до 20–30 мин. Вкусовых изменений в соке при обработке винограда ультразвуком, по результатам дегустационных проверок, не обнаружено. Таким образом, ультразвуковая обработка предварительно измельченного винограда и других ягод позволяет на 10–15 % увеличить выход сока. При обработке окрашенных сортов винограда и ягод резко повышается интенсивность окраски получаемого сока.

Приготавливаемый в домашних и производственных условиях виноградный сок является насыщенным раствором винного камня, который необходимо удалить из сока. В производственных условиях кристаллизация винного камня производится путем выдержки виноградного сока в течение трех-четырех месяцев в 10-литровых стеклянных баллонах при температуре 0–3 °С.

Ультразвуковое воздействие на сок при низких температурах (от минус 2 °С до плюс 2 °С) интенсифицирует процесс выпадения винного камня [24]. Оптимальный режим обработки заключается в ультразвуковой обработке сока в течение 20–40 мин с последующей выдержкой сока на холоде в течение 2–3 суток. Это обеспечивает удаление необходимого количества винного камня.

3.5 Применение ультразвука в сельском хозяйстве

УЗ обработка зерна и семян перед посадкой интенсифицирует процесс прорастания, повышает урожайность различных культур в среднем на 20–40 % [21]. Так, обработанные ультразвуком зерна ячменя дают всходы на 2–3 дня раньше, чем контрольные посадки, длина колоса и количество зерен в нем увеличиваются на 30 %, количество стеблей от одного зерна также увеличивается на 25–30%. Механизм УЗ воздействия на зерна и семена до конца не исследован. Ясно только, что ультразвук способен стимулировать жизненные силы, заложенные природой в каждую сельскохозяйственную культуру. Экспериментальные исследования позволили установить, что УЗ воздействие в большей или меньшей степени, но всегда положительно влияет на процесс прорастания зерен и семян и увеличивает урожайность. Максимальное повышение урожайности отмечено у дынь – на 46 %. Обработка семян огурцов перед посадкой приводит к тому, что междоузлия на взрослом растении (места образования плодов) формируются в полтора раза чаще, получаемые плоды отличаются от контрольных вкусом. Обработка семян томатов ультразвуком позволила установить, что после посадки кусты разрослись сильнее, плодов образовалось больше, созрели они быстрее, чем контрольные. Анализ состава плодов показал, что обработанные ультразвуком томаты имели большее количество витаминов, чем контрольные. Хорошие результаты были получены при обработке ультразвуком семян капусты, моркови, свеклы, лука. При обработке семян ультразвуком в них можно вносить необходимые микроэлементы, уничтожать возбудителей болезней и вредителей, активизировать ферменты. Так, например, УЗ обработка семян редиса в растворе органических удобрений повышает урожайность на менее чем в 2 раза. При УЗ обработке зерна и семян необходимо учитывать следующее. Обработка семян и зерен может осуществляться в воде или в водном растворе микроэлементов и удобрений. Обычно в качестве такого раствора используется водный раствор марганцовокислого калия. Признаком достаточной обработки может служить изменение цвета водного раствора марганцовокислого калия с розового до светло-желтого. При обработке семян в маленьких стеклянных объемах (менее 200 мл) время обработки долж-

но быть уменьшено до 3 мин. При обработке зерна в больших объемах (например, в трехлитровых банках) допускается обрабатывать до 1 кг зерна, обеспечивая его перемешивание. В этом случае время обработки составляет 20 мин и перемешивание зерна осуществляется через каждые 1–2 мин. С помощью фитомиксера можно приготовить растворы и экстракты удобрений, в том числе экстракты дезинфицирующих веществ [21].

3.6 Процессы ультразвукового осветления и очистки жидкостей

Для осветления и очистки различных спиртоводных растительных вытяжек (настоек, экстрактов, соков и т.д.) успешно применяются глинистые минералы. Очистка настоек (валерианы, заманихи, софоры японской, пустырника), экстрактов (кукурузных рылец, чабреца, змеевика, тысячелистника), соков свежих растений (подорожника, ландыша, чистотела, алоэ, клюквы) с помощью ультразвука в присутствии небольшого количества суспензии бентонита (частота 19,5 кГц, интенсивность 2–10 Вт/см², продолжительность озвучивания до 20 мин) осуществляется для объемов жидкости до 1 л за 10–30 мин, до 150 л через 4–6 ч против 10–14 суток без озвучивания [7, 22]. Это объясняется тем, что при озвучивании растут удельная поверхность и степень дисперсности частиц глинистого минерала. Так, если у неозвученного бентонита диаметр частиц основной фракции составлял 15,4 мкм, то у озвученного в течение 50 мин – менее 6 мкм. Мелкодисперсная суспензия бентонита при оседании образует в жидкости облако высокой плотности. Частицы облака во время движения адсорбируют на своей поверхности белки, коллоиды, твердые включения органического и неорганического происхождения, хлопья и т.д., которые слипаются в флокулы, утяжеляются, быстро седиментируют. Этому же способствует и сам ультразвук, собирая в зонах пучностей посторонние включения, электризуя их и заставляя частицы коагулировать. В случае осветления жидкостей ультразвуком дозировка суспензии бентонита может быть уменьшена в 4–5 раз.

Ультразвук нередко используется в процессах отделения твердой фазы при фильтрации и гиперфильтрации. В первом случае жидкость снизу под давлением подается в емкость для фильтрации, поднимается до уровня фильтрующей перегородки, продавливаясь через нее. Крупные частицы оседают на дно, более мелкие остаются на нижней части фильтра. Ультразвуковые колебания очищают фильтрующую перегородку. Звуковой ветер как бы сдувает мелкие частицы, которые, коагулируя, оседают на дно. Так работает ультразвуковой фильтр.

Ультразвук можно ввести непосредственно в фильтрующую жидкость, например, в систему фильтр-прессов, нутч- и друк-фильтров. В последнем случае ускорение фильтрации объясняется тем, что слой осадка в результате существования зон сжатия и разрежения находится в постоянном движении, образует-

ся псевдооживленный слой, который не успевает уплотниться и становится эффективным фильтрующим элементом с большой поверхностью контакта. Подача ультразвука в систему в периодическом режиме более предпочтительна, чем непрерывное озвучивание.

Процесс гиперfiltrации возможно интенсифицировать путем увеличения скорости фильтрации. Изменение скорости зависит от состояния поверхностного слоя – его турбулизации. Для непосредственного воздействия на пограничный гелевый слой в гиперfiltrационном аппарате целесообразно применять низкочастотный ультразвук (22 кГц), который резко снижает гидродинамическое сопротивление в пористых телах. Его действие наиболее сильно проявляется на границе раздела фаз, причем «звукопроводом» может служить сам гиперfiltr. С помощью гиперfiltrации в сочетании с ультразвуком возможно очищать индивидуальные и суммарные экстракты алкалоидов, гормонов, флавоноидов от окрашенных примесей, водорастворимых полимеров, других балластных веществ, которые придают цвет готовой продукции, затрудняют кристаллизацию. Можно также получать стерильные жидкости.

3.7 Процессы кристаллизации

Получение чистых лекарственных веществ связано с методами многократной кристаллизации и перекристаллизации в водных и неводных растворителях. Ультразвук в зависимости от режима ультразвуковой обработки, степени перенасыщения раствора, температурного фактора и т.д. может значительно ускорить процесс кристаллизации неорганических соединений [7]. Ускорение кристаллизации осуществляется за счет растворения мелких кристаллов.

Для этих же целей возможно использование диспергирующего действия ультразвука, который дробит кристаллы. Последние, в свою очередь, становятся новыми центрами кристаллизации, вновь дробятся и т.д. Процесс зарождения кристаллизационных центров становится лавинообразным. Так, при кристаллизации переохлажденных расплавов некоторых веществ, используемых в химико-фармацевтической промышленности (хлорида аммония, серы, салола, тимола, бетола, пиперидина, бензофенола, хлортетрациклина и др.), образование центров кристаллизации без ультразвука отмечалось через 5–8 ч, при применении ультразвука – через несколько секунд.

Ускорение процессов кристаллизации отмечается на стадии кавитации, когда диспергирующий эффект наибольший. Ультразвук можно использовать в ряде технологических операций при выращивании кристаллов полупроводниковых соединений, например при синтезе соединений из исходных компонентов, составляющих сплав.

Применение ультразвукового воздействия с частотой колебаний около 20 кГц позволяет резко интенсифицировать процесс, поскольку в кавитационном режиме возникают сильные микро- и макропотоки, снимающие диффузионные

ограничения. Например, при растворении теллурида кадмия ($T_{пл}=1100$ °С) в расплаве теллурида ртути при температуре, близкой к температуре ликвидуса тройного соединения, скорость растворения при ультразвуковом воздействии увеличивается почти на три порядка, что позволяет резко сократить время синтеза.

Применение ультразвукового воздействия позволяет улучшить осевую однородность распределения примесей и компонентов сплава за счет интенсификации тепло- и массообменных процессов. Однако специфика ультразвуковой обработки заключается в том, что наиболее эффективное воздействие происходит при образовании в расплаве кавитации, а кавитационные эффекты обуславливают разрушение фронта кристаллизации и вызывают образование мелкозернистой структуры слитка. Поэтому интенсивный ультразвук нецелесообразно использовать при получении монокристаллических образцов кристаллизационными методами.

В тех случаях, когда ставится задача получения поликристаллических слитков, применение ультразвука весьма перспективно, ультразвуковая обработка в процессе кристаллизации позволяет получить однородный, без пористый материал с мелкозернистой структурой.

Определенный практический интерес представляет применение ультразвука в процессах выращивания профилированных изделий по методу Степанова, т.е. вытягиванием из расплава через фильеру, профиль отверстия которой определяет форму выращиваемого кристалла. Подведение ультразвуковых колебаний к расплаву или непосредственно к фильере существенно влияет на протекание процесса. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что воздействие ультразвука увеличивает жидкотекучесть расплава и смачиваемость им твердой поверхности. Данные эффекты стабилизируют процесс выращивания профилированных кристаллов, однако до сих пор не существует физической модели, удовлетворительно объясняющей наблюдаемые явления.

3.8 Процессы распыления жидкостей

Аэрозоли - коллоидные полидисперсные системы с газообразной дисперсионной средой и твердой или жидкой дисперсной фазой. Размеры частиц в тонких аэрозолях приближаются к крупным молекулам, а в грубых аэрозолях равны 10–100 мкм и более. Ввиду малых размеров частиц скорость седиментации аэрозолей невелика. Они неопределенно долго могут находиться во взвешенном состоянии в газах.

Современная наука делит аэрозоли на три больших класса. К первому классу относятся пыли, состоящие из твердых частиц различной формы в газовой среде. Это порошки лекарственных веществ, сажа, пыль естественного происхождения. Ко второму классу относятся думы, получаемые при конденсации взаимодействующих газов, например, смеси аммиака и хлористого водорода,

или при горении органических веществ, лекарственных трав, содержащих летучие ароматические или инсектицидные вещества. Форма частиц дымов сложна и многообразна (может быть и кристаллической в виде игл, квадратов и т.д.). Третий класс – туманы. Сюда относятся все системы с жидкими частицами — каплями, имеющими правильную сферическую форму, например аэрозоли растворов лекарственных веществ, применяемых ингаляционно. Свойство ультразвуковых колебаний большой интенсивности диспергировать жидкость в газовой среде широко применяется для получения различных аэрозолей, используемых в химико-фармацевтической промышленности [7]. Интенсивные тепло- и массообменные процессы, связанные с сушкой жидкостей и различных извлечений, нанесением тонких слоев лекарственных веществ (микродоз) или защитных слоев на грануляты, спансулы, таблетлируемый материал, получением монодисперсных гранул, распылением расплавов химических веществ, изготовлением мельчайших порошков и т.д., представляют собой процессы получения аэрозолей.

Ультразвуковое распыление жидкостей находит применение и в медицине для создания такой лекарственной формы, как лечебные аэрозоли [27]. Акустический способ получения аэрозолей имеет ряд преимуществ перед существующими – химическим (конденсационным) и механическим (дисперсионным), так как современная ультразвуковая распылительная аппаратура позволяет значительно интенсифицировать процесс, улучшить качество продукта, заменить громоздкие устройства более компактными. При этом при высокой концентрации аэрозоля получается монодисперсный и однородный по составу факел распыления с заданным размером частиц.

Механизм получения аэрозолей ультразвуком объясняется кавитационной и волновой теориями. Согласно первой теории, на границе жидкость—газ при достаточном количестве зародышей кавитации (включений газа, твердых частичек) происходит захлопывание кавитационных полостей. В жидкости возникают мощные гидравлические удары, которые дробят ее на мелкие капли. Согласно второй теории, аэрозоль образуется в результате того, что происходит отрыв тонких капиллярообразных гребней стоячих волн, возникающих на поверхности ультразвукового фонтана. На начало образования аэрозоля оказывают влияние изменение статического давления, температура, интенсивность ультразвука, величина порога кавитации распыляемой жидкости. Последнее, как и размеры капель, зависит от физико-химических свойств жидкости (поверхностное натяжение, вязкость, плотность, упругость насыщенного пара), акустических параметров используемых устройств (частота колебаний, амплитуда, площадь излучателя) и конструкции аппарата.

В химико-фармацевтическом производстве используются различные распылительные ультразвуковые устройства, позволяющие вести процесс распыления жидкостей и расплавов без газовых потоков и в среде инертных газов [21, 27]. Это весьма важно для лекарственного сырья, химически лабильного,

особенно в мелкодисперсном состоянии, к кислороду воздуха. Лечебные аэрозоли обладают значительной полидисперсностью, что является причиной их седиментационной неустойчивости. Это приводит к тому, что, с одной стороны, наблюдается разная скорость оседания частиц, а с другой – быстрое испарение наиболее мелкой фракции. Плотность аэрозоля, полученного ультразвуковым методом, растет с увеличением интенсивности ультразвуковой волны, что можно определить по расходу распыляемых растворов, определяемому гравиметрически, и по концентрации частиц в единице объема, достигающей 10^3 – 10^4 в 1 см^3 . С изменением частоты ультразвука в диапазоне 0,4–5,0 МГц размер частиц уменьшается. Так, при частоте 2 МГц размер полученных частиц составляет 6–7 мкм, при частоте 5 МГц – 2–3 мкм. С увеличением частоты ультразвука число поверхностных стоячих волн в фокальной области растет, на них формируются гребни (соответствующие по размерам определенным резонансным условиям), которые после наступления порога интенсивности отрываются от волны. Вместе с тем размеры возникающих волн и гребней, а в связи с этим и размеры капель зависят от физико-химических свойств распыляемых жидкостей (например, величины поверхностного натяжения, инертности массы).

Рассмотрим механизм ультразвукового распыления (диспергирования жидкой фазы).

Под действием УЗ колебаний жидкость переходит в аэрозольное состояние на границе раздела газовой и жидкой сред. Акустическая энергия может быть подведена к зоне диспергирования как со стороны жидкости, так и со стороны газа. Существует несколько возможных способов ультразвукового диспергирования жидкости:

1. Диспергирование жидкости с подведением акустической энергии к рабочей зоне через газ.

2. Диспергирование жидкости с подведением акустической энергии к рабочей зоне через жидкость:

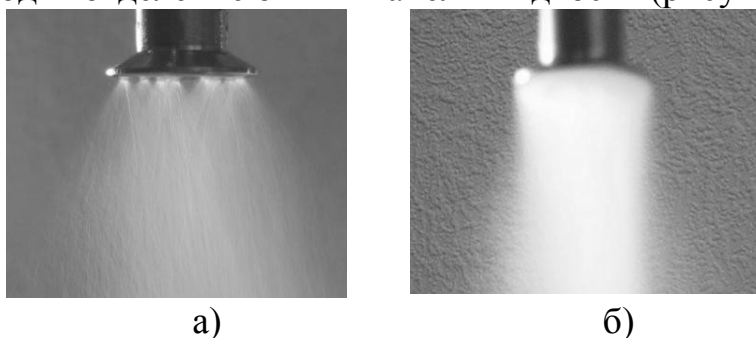
а) диспергирование жидкости в фонтане (высокочастотные ультразвуковые колебания);

б) диспергирование жидкости в слое (низкочастотные УЗ колебания).

В случае диспергирования жидкости с подведением акустической энергии к рабочей зоне через жидкость различают диспергирование высокочастотными (1–3 МГц) и низкочастотными (22–200 кГц) УЗ колебаниями. Диспергирование жидкости высокочастотными колебаниями осуществляется направлением из глубины жидкости на ее поверхность пучка мощных высокочастотных УЗ волн. При этом на поверхности жидкости образуется УЗ фонтан. В верхней части фонтана происходит диспергирование жидкости с образованием тонкого и стойкого тумана. На сегодняшний день установлено, что диспергирование жидкости в фонтане происходит при помощи стоячих капиллярных волн, возбуждаемых на поверхности струи. Причиной их образования являются перио-

дические гидравлические удары, возникающие при захлопывании кавитационных пузырьков. Диспергирование происходит в верхней части фонтана с образованием тонкого стойкого монодисперсного аэрозоля, размер капель которого составляет 2–10 мкм. Низкая производительность (не более 0,2 л/час) высокочастотного способа УЗ диспергирования и малый размер капель получающегося аэрозоля делают его практически не применимым в промышленности. Однако данный метод является незаменимым для применения в медицинских ингаляторах [28].

В случае диспергирования в слое на поверхности слоя жидкости образуются стоячие капиллярные волны [7]. С увеличением амплитуды колебаний поверхности амплитуда волн увеличивается, достигая предельной величины, при которой происходит отделение от них капель жидкости (рисунок 3.5).



а) – при помощи резонансных пузырьков;
б) – при помощи кавитационных пузырьков

Рисунок 3.5 – Процесс диспергирования
жидкости в слое

Диспергирование в слое осуществляется УЗ колебаниями с частотой от десятков до сотен кГц. Возможный диаметр капель распыла лежит в диапазоне до сотен микрон и зависит от используемой частоты колебаний, а производительность такого диспергатора может достигать 800 мл/с [7].

3.9 Ультразвуковое распыление металлов и сплавов

Известно, что жидкость на границе с газовой фазой под действием мощных акустических колебаний может диспергировать в виде весьма малых капель. В связи с большим интересом, проявляемым в последнее время в порошковой и гранульной металлургии к структуре, плотности и однородности гранулометрического состава, ультразвуковые методы распыления и гранулирования жидких металлов и сплавов начинают привлекать внимание исследователей.

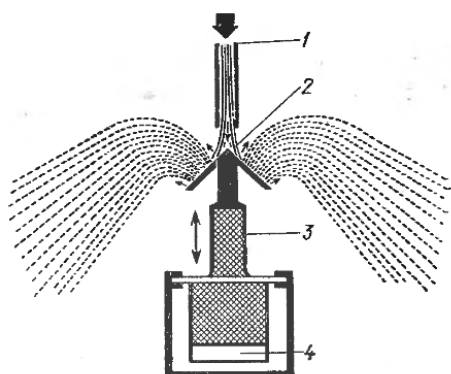
Распыление (гранулирование) расплава можно вести с подводом ультразвуковой энергии через жидкий металл и через газовую фазу. В первом случае выгоднее распылять металл в тонком слое, однако при этом падает производительность распыления. Во втором случае диспергируют струю расплава с помощью трубчатых пневмоакустических преобразователей ультразвука.

При распылении в тонком слое (рисунок 3.6) чаще всего применяют изгибно колеблющиеся излучатели с амплитудой колебаний выше порога возникновения в жидкости кавитации. Считают, что процесс образования капель можно связать с одним из перечисленных ниже механизмов:

- разрушение резонансных парогазовых пузырьков, пульсирующих вблизи поверхности жидкости;
- воздействие ударных волн, образующихся в результате захлопывания кавитационных полостей у поверхности раздела жидкость – газ;
- отрыв капелек жидкости от гребней стоячих капиллярных волн конечной амплитуды на поверхности слоя жидкости.

По-видимому, оценить количественно вклад каждого из предложенных механизмов довольно трудно, и все они происходят одновременно. Тем не менее некоторые исследователи (О.К. Экнадиосянц [29] и др.) считают, что в основе диспергирования расплава лежат кавитационно-волновые явления, вследствие которых на поверхности расплава образуются капиллярные волны, а в толще расплава возникают и развиваются активные кавитационные процессы.

Интенсивность распыления в значительной мере зависит от толщины слоя расплава, она максимальна при $h \ll \lambda/2$. Например, для расплава алюминия, воды и масла $0,4 \leq h \leq 3,2$ мм.



- 1 – расплав; 2 – излучатель изгибных колебаний; 3 – волновод;
4 – преобразователь

Рисунок 3.6 – Принципиальная схема ультразвукового распыления металлических расплавов в тонком слое

Недостатком механического метода измельчения является длительность операций и загрязнение полученных порошков примесями от мелющих аппаратов, шаров и др.

К физико-химическим методам относят: *восстановление оксидов металлов газами или твердыми восстановителями, электролитическое осаждение из водных растворов или расплавленных сред, термическую диссоциацию карбониллов, конденсацию металлических паров* и др.

Наиболее распространенным методом измельчения материалов является метод восстановления соответствующих оксидов как металлов, так и различных соединений. Полученные порошки содержат в своем составе примеси, представляющие собой в основном недовосстановленные оксиды, и обладают также несовершенной структурой.

В последнее время широкое практическое применение находит *метод изготовления порошков металлов и сплавов распылением соответствующих расплавов*.

Ультразвуковой метод диспергирования позволяет получать высокодисперсные порошки, однородные по составу без посторонних примесей, требуемой формы и др. Для изготовления изделий высокой плотности используют полученные в ультразвуковом поле тонкодисперсные активные порошки, размер частиц которых составляет 0,1–2,0 мкм.

3.10 Дегазация жидкостей

УЗ колебания обеспечивают более быстрое и глубокое, по сравнению с другими методами, понижение концентрации растворенного в жидкости газа [21]. УЗ дегазация жидких сред применяется в металлургии (очистка сплавов от примесей), нефтепереработке (удаление метановых фракций из нефти), для выделения газов из растворов смол, трансформаторного масла, напитков, шоколада, растительного масла, крахмальных и желатиновых эмульсий и пр.

В ряде случаев для предотвращения коррозии аппаратуры необходима дегазация смазочных материалов, воды (удаление растворённого в них кислорода). Большие возможности имеет применение УЗ дегазации в электрохимии при нанесении покрытий. Обычно на катоде выделяется водород, что приводит к образованию пузырьков при осаждении металла и, как следствие, снижению прочности покрытий. При применении дегазации получают прочные, лишённые пор покрытия. Кроме того, в звуковом поле увеличиваются КПД и плотность электрического тока, сокращается время, необходимое для нанесения покрытия заданной толщины. При проведении операций дегазации может использоваться любой из аппаратов для интенсификации технологических процессов.

3.11 Ультразвуковое центрифугирование

В ряде случаев, несмотря на потерю системой устойчивости, осаждение суспензии происходит медленно. Это обусловлено либо большой вязкостью жидкости, либо образованием хлопьев большой площади при малой массе. Процесс осаждения суспензии в таком случае можно ускорить, применяя так называемое комбинированное воздействие, т.е. одновременное воздействие УЗ колебаниями и центробежным полем [7]. Комбинированное воздействие осу-

ществляется в специальных УЗ фильтрующих центрифугах, где протекает процесс обратной фильтрации. Крупные частицы движутся по крутой траектории и быстро выводятся из жидкости, траектория осаждения очень мелких частиц – пологая, и их труднее вывести из жидкости. При УЗ воздействии основное влияние на процесс оказывает флотационное действие пульсирующих пузырьков. Под действием выталкивающей силы гидростатического давления центробежного поля пузырьки совместно с частицами двигаются к фильтрующей перегородке, продолжая захватывать частицы. Пульсирующий пузырек проходит сквозь фильтрующие перегородки и уходит к границе раздела жидкости и газа. Агрегаты частиц, пришедшие с пузырьком, задерживаются перегородкой. Вибрация фильтрующей перегородки под действием УЗ колебаний препятствует налипанию агрегатов частиц, и они отбрасываются центробежными силами на периферию ротора, где выводятся из жидкости. Например, при разделении суспензии гидроксида цинка, известного своей аморфностью и склонностью к налипанию в отсутствие воздействия УЗ колебаний, производительность медленно падает [7]. При воздействии УЗ колебаний производительность центрифуги с течением времени возрастает (кривая 1) и примерно через 40 мин стабилизируется на более высокой производительности, чем в отсутствие УЗ колебаний.

Эффективность комбинированного воздействия на процесс коагуляции суспензии отмечена в процессе осаждения суспензии пигмента «конго красное». В обычных условиях процесс длится несколько месяцев. При УЗ воздействии система теряет устойчивость, и для осаждения образовавшихся хлопьев требуется несколько дней.

3.12 Ультразвуковая очистка в жидкостях

Среди процессов, протекающих под действием ультразвука в жидкостях, очистка изделий от различных загрязнений получила наибольшее распространение в промышленности. В обобщенном виде влияние различных факторов на механизм очистки можно представить в виде схемы [30], изображенной на рисунке 3.7.

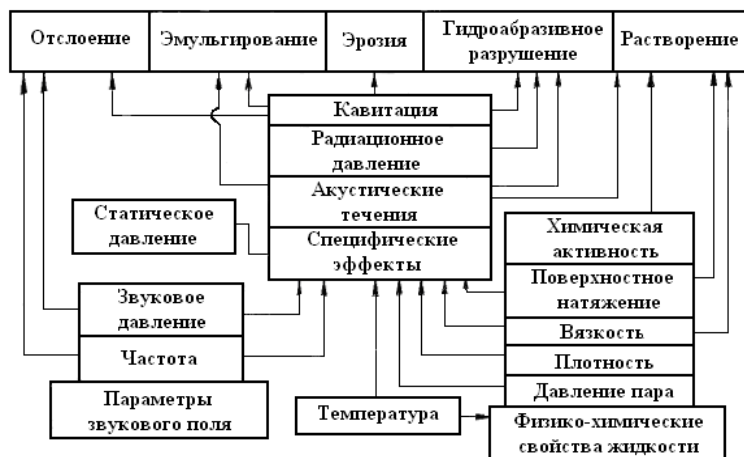
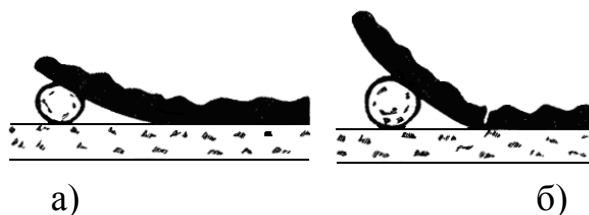


Рисунок 3.7 – Механизм разрушения поверхностных пленок в ультразвуковом поле

Разрушение поверхностных пленок в жидкости под действием ультразвука происходит благодаря кавитации и акустическим течениям. В некоторых случаях, например, при очистке контактным способом, когда УЗ колебания возбуждаются в самом очищаемом изделии, определенную роль могут играть знакопеременные напряжения, возникающие в пленке загрязнений при изгибных колебаниях детали и способствующие отслаиванию пленки, если ее усталостная прочность незначительна. Интенсивность, кавитация, скорость и характер акустических течений, величина радиационного давления, амплитуда колебаний самой детали зависят от частоты и интенсивности колебаний, физических свойств жидкости и в особенности – от ее температуры. Разрушение, отделение и растворение пленки загрязнений при УЗ очистке происходит благодаря совместному действию химически активной среды и факторов, обусловленных наложением акустического поля [30].

Известны три возможных механизма разрушения поверхностных пленок кавитационными пузырьками: отслоение, струйная очистка и эмульгирование. В первом случае пульсирующий пузырек «прилипает» к поверхности материала и внутренней поверхности отслоившейся пленки (рисунок 3.8). При интенсивных колебаниях пузырек на пленку начинают действовать силы, отрывающие ее от поверхности материала. Если силы сцепления пленки с поверхностью превосходят прочность самой пленки, то свободный кусочек ее отрывается (рисунок 3.8). В противном случае пленка отслаивается. Во втором случае пульсирующий кавитационный пузырек, перемещаясь по очищаемой поверхности, оставляет в пленке загрязнений «расчищенные дорожки», направление которых совпадает с траекторией движения пузырька. В этом случае разрушающее действие кавитации можно объяснить ударами струек жидкости о поверхность материала при делении крупных неустойчивых пузырьков на более мелкие. В третьем случае газовые пузырьки, имевшиеся в толще пленки, пуль-

сируя под действием звукового поля и акустических течений, увлекают за собой часть окружающего вещества пленки загрязнений. Перемещение массы пленки приводит к ее разрывам. Одновременно идет другой процесс: кавитационные пузырьки распыляют мельчайшие капли воды на поверхность жировой пленки, обволакивая газовой пузырек. Поскольку пульсирующий пузырек является своеобразным источником ультразвуковых колебаний, капельки жидкости могут отбрасываться, дробиться, и наблюдается явление, напоминающее распыление тонкого слоя жидкости на поверхности излучателя. Очень важным параметром, влияющим на эффективность процесса очистки, является интенсивность ультразвука. Выбор интенсивности зависит от вида очищаемого изделия, характера загрязнения, моющей жидкости и др. В зависимости от вида загрязнений целесообразно использовать следующие значения интенсивности [12]: до $1\text{--}3 \text{ Вт/см}^2$ – для легкоудаляемых загрязнений (масляных и жировых при механической обработке изделий, растворимых в моющей жидкости осадков, флюсов и т.п.); от 3 до 10 Вт/см^2 – для загрязнений типа полировочных и притирочных паст, закатанных при обработке давлением физических загрязнений и смазок, полимеризовавшихся смазок и т.д.; свыше 10 Вт/см^2 – для трудноудаляемых загрязнений (лаковых пленок, травильных шламов и т.п.).



а) – образование пузырька у поверхности под пленкой; б)
– отрыв

кусочка пленки от поверхности при пульсации пузырька

Рисунок 3.8 – Схема отслоения пленки загрязнения

Для очистки протяженных каналов малого диаметра используется высокоамплитудная очистка колебаниями с интенсивностью до 100 Вт/см^2 .

Многообразие задач и объектов очистки обуславливает необходимость учета множества специфических факторов при реализации процессов и решения проблем автоматизации УЗ воздействия в оптимальном режиме.

3.13 Очистка сточных вод

Сточные воды многих пищевых производств содержат вещества, которые могут быть использованы в качестве корма для сельскохозяйственных животных [7, 30]. Применение ультразвука в ряде случаев существенно облегчает выделение этих веществ. После обработки ультразвуком, например, из сточных вод рыбоперерабатывающих комбинатов, удастся извлечь значительное количество кормового белка и жира, что не только позволяет получить цепные кормовые вещества, но и ускорить дальнейшую очистку сточных вод.

Стимуляция сообществ микроорганизмов ультразвуком низкой интенсивности в бассейнах биологической очистки интенсифицирует их обмен веществ, увеличивает скорость биосинтеза *биологически* активных соединений, ускоряет адаптацию клеток к новым условиям. Так, стимуляция ультразвуком клеток плесени *Aspergillus niger*, играющих важную роль в процессе очистки воды, в полтора раза ускоряет их развитие, увеличивает скорость утилизации веществ в сточных водах, например, рыбоперерабатывающих комбинатов. Развивающаяся в бассейнах плесень выделяет мощные ферменты – целлюлозу и целлобиазу, разрушающие клетчатку. Выделяющаяся при этом глюкоза полностью используется клетками плесени, превращающими ее в углекислый газ и воду. Параллельно усиливается превращение сероводорода и серы в безвредные сульфаты. В процессе жизнедеятельности клетками плесени *Aspergillus niger* выделяются лимонная кислота и некоторые другие органические кислоты, создающие неблагоприятную для развития бактериальных клеток среду. Усиливается и выработка антибиотиков, которые вместе с органическими кислотами быстро снижают в сточной воде количество бактерий, в том числе болезнетворных. Клетки той же плесени после обработки ультразвуком активно концентрируют в себе соединения тяжелых металлов.

В ряде случаев мощный ультразвук применяется для ускорения окислительных процессов в сточных водах, снижения общей обсемененности, для гомогенизации осадка и т.д.

3.14 Ультразвуковая стерилизация жидких сред

Известно, что обработанные ультразвуком растворы, эмульсии, суспензии и отвары в течение некоторого времени после обработки остаются стерильными. Получены многочисленные экспериментальные данные, некоторые из которых отмечались ранее (например, стерилизация молока), другие же, наиболее интересные, приведены далее.

1. В работе [21] указано, что в течение 5 мин обработки удается достичь полной стерилизации питьевой воды без применения химикатов.

2. В работах [21] приводятся экспериментальные данные о стерилизации сточных вод ультразвуком.

3. При воздействии ультразвука постоянной интенсивности на поверхность кожи человека количество микроорганизмов прогрессивно падает по мере увеличения длительности. После 30–40 мин обработки поверхность кожи становится стерильной [21].

4. В работах И.Е. Эльпинера и др. [19] установлено, что при ультразвуковом воздействии повышается чувствительность микроорганизмов к дезинфицирующим веществам. Поэтому концентрации антисептиков и консервантов в сочетании с УЗ обработкой могут быть уменьшены в десятки и сотни раз.

5. УЗ обработка изделий и материалов для хирургии (например, катетеры и искусственные клапаны сердца) в растворах антибиотиков обеспечивает не только стерилизацию, но и введение антибиотиков в глубь материалов [27]. Введенные антибиотики сохраняют длительное действие в тканях человека.

Проведенные исследования позволили неопровержимо установить, что стерилизующее действие ультразвука проявляется на частотах 20 кГц и выше, при интенсивности более $0,5 \text{ Вт/см}^2$, что в несколько раз меньше интенсивности ультразвуковых колебаний вблизи рабочего инструмента ультразвуковой колебательной системы любого маломощного ультразвукового аппарата. Механизм стерилизующего действия ультразвука весьма сложен и раскрыт не полностью. Доказано, что основным стерилизующим фактором является кавитация.

При стерилизации различных жидких сред ультразвуком необходимо учитывать следующее.

1. Бактерицидное действие ультразвука зависит от состояния среды и ее состава, а также от количества микроорганизмов. Так, в дистиллированной воде процесс стерилизации происходит быстрее, чем в растворах солей, белков, высокомолекулярных соединениях.

2. При ультразвуковой обработке в первую очередь погибают плесени, затем дрожжи, слизиобразующие и в последнюю очередь – спороносные бактерии.

3. Ультразвуком разрушаются кишечная, брюшнотифозная, дифтерийная, сенная палочки, бациллы дизентерии, столбняка, сальмонеллы, кокки, гонококки, трипаносомы, трихомонады, возбудитель паратифа, тифа и др.

4. При высоких интенсивностях ультразвука, т.е. в непосредственной близости от рабочего инструмента, разрушаются вирусы табачной мозаики, полиомиелита, энцефалита, сыпнотифозные, гриппа. Бактериофаги больших размеров также чувствительны к действию ультразвука [27].

5. Из патогенных микроорганизмов наибольшую устойчивость проявляют штаммы туберкулезных палочек.

6. В ряде случаев 100 % стерилизации добиться невозможно, т.к. для этого потребовалось бы бесконечно долгое время. Однако в течение 10–20 мин ультразвуковой обработки в фитомиксере количество микроорганизмов уменьшается до 1–10 % от первоначального количества.

7. В сочетании с ультразвуком бактерицидными свойствами обладают бура, сульфит и бисульфит натрия и калия, соли фенилртути, мертиолит, кислоты, отдельные красители (генциановый, фиолетовый, фуксин, бриллиантовый зеленый), соли аммониевых соединений, окислители (хлор, йод, перекись водорода), газы (озон, углекислый, сероводород). На основании изложенного можно считать, что с помощью УЗ или его сочетаний с антисептиками стерилизацию можно проводить значительно быстрее, чем обычными способами, с меньшими экономическими затратами, экономией антисептиков, сохраняя биологически активные вещества, ферменты, витамины.

3.15 Процессы фильтрации

В процессах фильтрации и пропитки твердых тел происходит движение жидкой фазы относительно пор и каналов в твердой фазе. Интенсификация этих процессов может быть достигнута при увеличении скорости относительного движения жидкости. Неслучайно поэтому многочисленные работы были посвящены исследованиям влияния вибраций, ультразвука и ударных волн на течение жидкостей в капиллярах [22]. В коллоидных системах существенное влияние на процесс начинают приобретать электрические явления, и поэтому для интенсификации технологических процессов, например в мембранных аппаратах для ультрафильтрации, используют электрические поля.

Возбуждение колебаний в рассматриваемых системах принципиально возможно тремя способами: колебаниями фильтрующих элементов, жидкости и непосредственно твердых частиц суспензии. Очистка и регенерация фильтрующих материалов и элементов весьма трудоемка и является проблематичной в технологии. Из физических методов наиболее эффективны динамические. Введение ультразвуковых колебаний в дисперсную систему приводит к образованию сложных нестационарных локальных напряжений и потоков жидкости, способствующих дезагрегации, отрыву частиц и выносу их в объем жидкости.

В зависимости от физико-химических свойств системы и ее конструктивных факторов должны существовать оптимальные амплитудно-частотные характеристики воздействия. При прочих равных условиях предпочтение следует отдать режимам, создающим кавитацию, турбулентность, и особенно импульсным методам.

3.16 Процессы пропитки

Капиллярная пропитка является важнейшей стадией многих технологических процессов, таких как выщелачивание, производство нанесенных катализаторов, придание различным материалам необходимых свойств.

Длительность и полнота пропитки в основном могут быть лимитированы такими факторами, как вязкость жидкости и смачивание твердой фазой, наличие заземленного газа. Поэтому интенсифицирующее воздействие должно быть направлено на уменьшение влияния этих факторов на процесс.

Уменьшение вязкости при увеличении температуры широко используется, но имеет предел, связанный со свойствами жидкости и пропитываемых систем. Для однородной жидкости ее вязкость от каких-либо воздействий существенно не изменяется. В неоднородных и неньютоновских жидкостях на вязкость могут повлиять электрические и гидродинамические явления. Вязкость полимеров (расплавов, растворов) может уменьшаться также в результате деструкции. Казалось бы, наиболее простым является влияние на гидродинамику фильтра-

ционного потока. Поскольку толщина пограничного слоя в колеблющихся потоках уменьшается с ростом частоты, то наложение высокочастотных колебаний должно влиять на скорость пропитки. Для выбора частоты колебаний можно принять, что толщина пограничного слоя должна быть меньше среднего диаметра характерных каналов (пор). Получившая наибольшее распространение кавитационная гипотеза объясняет ультразвуковой капиллярный эффект ударами кумулятивных струй или в упрощенном варианте давлением, возникающим при захлопывании кавитационных пузырьков около устья капилляра [22].

Капиллярный эффект объясняется следующими экспериментальными фактами:

1) в низкочастотных акустических полях (без кавитации) наблюдается как подъем жидкости в капилляр (положительный эффект), так и опускание жидкости (отрицательный эффект) в зависимости от характера асимметрии входа (диффузор или конфузор);

2) смещение уровня жидкости в капиллярах наблюдается при воздействии ультразвуковых колебаний на мениск в капилляре через воздух (в отсутствие кавитации);

3) ультразвуковой капиллярный эффект не наблюдается при гидродинамической кавитации без колебаний потока жидкости и в отсутствие колеблющихся в устье потоков жидкости;

4) насосный эффект, т. е. поднятие жидкости по капилляру, находящемуся в контакте с излучателем ультразвука, наблюдается как при кавитации, так и в ее отсутствие.

Приведенные факты указывают на то, что не только кавитация является источником постоянного давления, создающего ультразвуковой капиллярный эффект.

3.17 Ультразвуковые аппараты и оборудование для ускорения процессов в жидких средах

Основное направление в применении УЗ колебаний при реализации процессов химической технологии – воздействие на жидкие и жидкодисперсные среды в режиме «развитой» кавитации. Для практического применения создана серия аппаратов различной мощности (200; 400; 600; 1000 Вт), которые представлены на рисунке 3.9 [5]. Назначение аппаратов этой серии различно. Это приготовление экстрактов из растительного сырья, приготовление кремов, мазей, других лекарственных препаратов в домашних условиях. Это интенсификация процессов в жидких и жидкодисперсных средах (экстракция, растворение, очистка и др. процессы), возможность установки в технологические линии. Это интенсификация процессов методом полного погружения колебательной системы. Это кавитационная обработка различных жидких сред в промышленных масштабах.



а) фитомиксер «Алена»
УЗТА-0,15/22-О



б) УЗ аппарат «Волна»
УЗТА-0,2/22-ОМ, УЗТА-0,4/22-ОМ,
УЗТА-0,63/22-ОМ, УЗТА-0,8/22-ОМ



в) УЗ аппарат «Волна-М»
УЗТА-1/22-ОМ



г) УЗ аппарат «Волна-М»
УЗТА-1/22-ОПг



д) УЗ аппарат для проточной обработки жидких сред
УЗАП-2,5/22-ОП



е) УЗ аппарат «Булава»
УЗТА-3/22-О

Рисунок 3.9 – Серия ультразвуковых технологических аппаратов

В комплектацию входят электронный генератор и ультразвуковая пьезоэлектрическая колебательная система в металлическом корпусе с принудительным или естественным воздушным охлаждением. Электронный генератор выполнен на современной элементной базе, имеет микропроцессорное управление, плавный регулятор выходной мощности, таймер, систему АПЧ, многорежимный цифровой индикатор отображаемых параметров [31].

Ультразвуковая колебательная система построена на пьезоэлектрических кольцевых элементах и изготовлена из титанового сплава ВТ5. Используемые инженерные решения защищены патентом РФ № 2141386 [32]. Рабочая частота составляет $22 \pm 1,65$ кГц.

Технические характеристики аппаратов приведены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Основные технические характеристики аппаратов

Модель	УЗТА-0.15/22-О	УЗТА-0,2/22-ОМ, 0,4/22-ОМ, 0,63/22-ОМ	УЗТА-0,8/22-ОМ, 1/22-ОМ	УЗТА-1/22-ОПг	УЗАП-2,5/22-ОП	УЗТ-3/22-О
Мощность, ВА	150	200, 400, 630	800, 1000	1000	2500	3000
Диаметр инструмента, мм	20	22, 30, 32	35, 45	45	35х3	—

Все аппараты имеют время непрерывной работы не менее 8 часов.

Для кавитационной обработки жидких и жидкодисперсных сред (жидкие металлы, расплавы солей, масла, припой и т.п.) при высокой температуре и под высоким давлением (до 1МПа) создан аппарат, показанный на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Аппарат для ультразвуковой обработки расплавов и горячих жидкостей «Феникс-УЗ»

Ультразвуковая пьезоэлектрическая колебательная система комплектуется промежуточным узлом водяного охлаждения. Технические характеристики представлены в таблице 3.3. Рабочая частота составляет $22 \pm 1,65$ кГц.

Таблица 3.3 – Основные технические характеристики аппарата

Потребляемая мощность, ВА	800
Максимальная температура среды, °С	600
Максимальное давление внутри технологического объема, МПа	1

Система охлаждения: бустера пьезопреобразователя	водяная принудительная воздушная принудительная
--	--

Для интенсификации процессов, происходящих на границе раздела твердое тело–жидкость в контактном режиме (пропитка дерева и других пористых материалов защитными и декоративными веществами, поверхностная очистка, склеивание листовых материалов и тканей, нанесение смазок и покрытий для снижения трения, повышение нежности мясных изделий, кавитационная обработка жидких сред), создан аппарат [31], показанный на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Ультразвуковой технологический аппарат «Надежда»

В аппарате реализованы технические решения по патенту РФ № 2281134. Характеристики представлены в таблице 3.4. Рабочая частота $44 \pm 3,3$ кГц

Таблица 3.4 – Основные технические характеристики

Мощность, ВА	250
Масса колебательной системы, кг	1,5
Время непрерывной работы, ч	2

Для проточной обработки молока и других жидкостей с целью увеличения срока хранения и питательной ценности, для непрерывной обработки жидких сред (растворение, эмульгирование, стерилизация, экстрагирование) и для воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности в открытых природных и технологических объемах, каналах, трубопроводах, нефтяных скважинах создана серия технологических аппаратов, показанная на рисунке 3.12.



а) УЗ аппарат «Поток»
УЗАП-0,2/22-ОП



б) УЗ аппарат «Поток»
УЗАП-0,4/22-ОП



в) УЗ аппарат «Поток»
УЗАП-2,5/22-ОП



г) УЗ аппарат «Поток»
УЗАП-3/22-ОПг



д) УЗ аппарат «Булава-П» УЗАП-3/22-ОП
Рисунок 3.12 – Ультразвуковые аппараты для
проточной обработки

Основные технические характеристики серии ультразвуковых аппаратов приведены в таблице 3.5 [31].

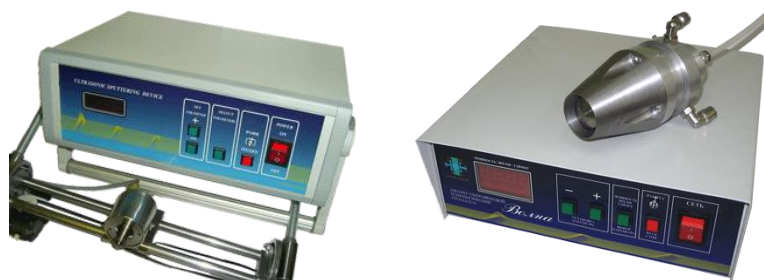
Таблица 3.5 – Основные технические характеристики

Модель	УЗАП - 0,2/22 -ОП	УЗАП - 0,4/22 -ОП	УЗА П- 2,5/2 2- ОП	УЗА П- 3/22- ОПг	УЗА П- 3/22- ОП
Мощность, ВА	200	400	2500	3000	3000
Производи- тельность, л/мин	до 5	до 10	до 100	до 100	до 100

Время непрерывной работы всех аппаратов составляет не менее 8 часов.

3.17.1 Ультразвуковые аппараты для мелкодисперсного распыления жидкостей

Для мелкодисперсного распыления жидкостей различной вязкости без разрушения их структуры и свойств разработана серия ультразвуковых аппаратов, показанная на рисунке 3.13. Аппараты комплектуются сменными рабочими окончаниями различной конструкции (для формирования факелов распыления различной формы и производительности). Рабочая частота $22 \pm 1,65$ и $44 \pm 3,3$ кГц [31].



а) УЗ аппарат «Туман» УЗР-0,1/44-О б) УЗ аппарат «Туман-2» УЗР-0,4/22-О

Рисунок 3.13 – Ультразвуковые аппараты для мелкодисперсного распыления

Основные технические характеристики приведены в таблице 3.6.

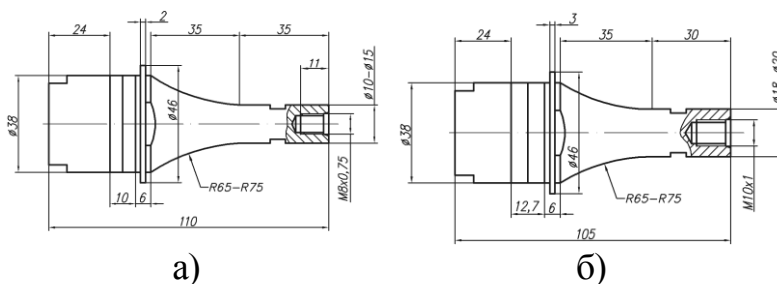
Таблица 3.6 – Основные технические характеристики

Модель	УЗР-0,1/44-О	УЗР-0,4/22-О
Мощность, ВА	100	400
Вязкость распыляемой жидкости, сПз	1–30	1–30
Средний размер распыляемых частиц, мкм	40–50	90
Производительность, мл/с	до 1	до 5,5

3.18 Ультразвуковые колебательные системы для ускорения процессов в жидких средах

На рисунке 3.14 представлена типовая конструкция полуволновой пьезоэлектрической системы для интенсификации процессов в жидких средах.

Коэффициент усиления M_p такой системы равен 12–15 (в зависимости от отношения D_1 и D_2) и является оптимальным для согласования волновых сопротивлений пьезокерамического материала и жидких сред. Собственная резонансная частота системы $22 \pm 1,65$ кГц. Интенсивность излучения достигает 20 Вт/см^2 . Амплитуда колебаний на излучающей поверхности 40–75 мкм. КПД не менее 80 %. Материал отражающей накладке – сталь 45, материал излучающей накладке и рабочего инструмента – сталь 40X13, 12X18H10T, титановые сплавы или алюминиевые сплавы [32].



а) – на базе пьезокерамики ЦТС-23; б) – на базе пьезокерамики APC-841

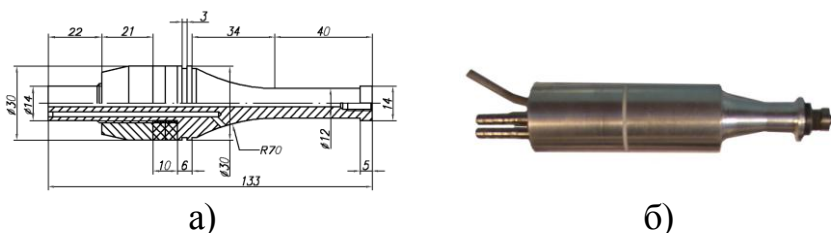
Рисунок 3.14 – Полуволновая пьезоэлектрическая ультразвуковая колебательная система

На рисунке 3.15 показаны ультразвуковые колебательные системы для воздействия на жидкости и интенсификации процессов в жидких средах эмульгирования, экстракции и т.п.



Рисунок 3.15 – Ультразвуковые колебательные системы для воздействия на жидкие среды

На рисунке 3.16 представлена полуволновая пьезоэлектрическая колебательная система для ультразвуковой липосакции – эмульгирования подкожного жира [33, 34]. Особенностью системы является не только наличие центрального канала для удаления образующейся эмульсии, но и наличие двух дополнительных каналов, симметрично расположенных относительно центрального, для подачи жидкости, обеспечивающей образование эмульсии в УЗ поле.

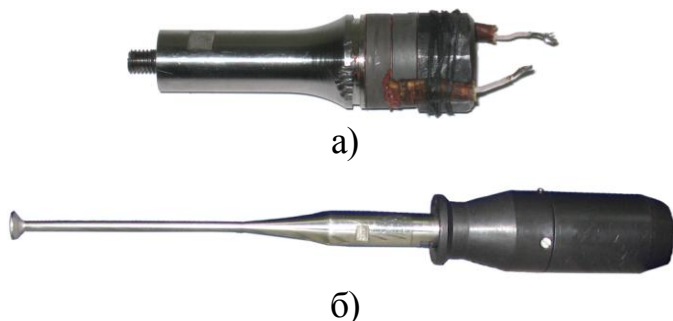


а) – конструкция; б) – внешний вид в корпусе
 Рисунок 3.16 – Полуволновая пьезоэлектрическая ультразвуковая
 колебательная система для липосакции

Такая система создана на основе пьезокерамики APC-841. Материал отражающей накладки – сталь 45, материал излучающей накладки и инструмента – титановый сплав ВТ6. Коэффициент усиления M_p равен 17–20 (в зависимости от присоединяемого инструмента). Собственная резонансная частота $22 \pm 1,65$ кГц. Интенсивность излучения превышает 100 Вт/см^2 . Амплитуда колебаний на излучающей поверхности до 250 мкм. Производительность эмульгирования 15–20 мл/с.

Разработан ряд малогабаритных УЗКС с диаметром корпуса, позволяющим размещать систему в руке. Система обладает малым собственным сопротивлением потерь, что дает возможность значительно снизить ее нагрев и избежать получения термических ожогов оператора, работающим с системой (рисунок 3.17).

В преобразователе использована пьезокерамика APC-841, имеющая следующие габаритные размеры $24 \times 12,7 \times 6,35$ мм. Материал отражающей накладки – сталь 45, материал излучающей накладки и рабочего инструмента – титановый сплав. Коэффициент усиления M_p равен 12–15 (в зависимости от типа присоединяемого рабочего инструмента). Собственная резонансная частота $44 \pm 3,3$ кГц.



а) – колебательная система без корпуса; б) – колебательная система с инструментом в корпусе

Рисунок 3.17 – Малогабаритная колебательная система

Интенсивность излучения превышает 40 Вт/см^2 . Амплитуда колебаний на излучающей поверхности до 70 мкм. Разработанная система может использоваться совместно с активными рабочими инструментами для проведения процедур физиотерапии, с активными рабочими инструментами для проведения лабораторных исследований.

Для интенсификации процессов пропитки [31], а также нанесения смазочных и прочих покрытий на пористые поверхности созданы полуволновые системы на базе

и жидкодисперсные среды, недостижимого при использовании одной колебательной системы. Суммарная площадь излучения составляет 54 см^2 , энергия колебаний, излучаемая в среду, более 1000 Вт , что позволяет значительно увеличить энергию вводимых колебаний. Для непрерывной, проточной обработки жидких сред в открытых природных и технологических объемах, каналах, трубопроводах, создана специализированная система, конструктивная схема которой показана на рисунке 3.22.



Рисунок 3.22 – Ультразвуковая колебательная система для проточной обработки

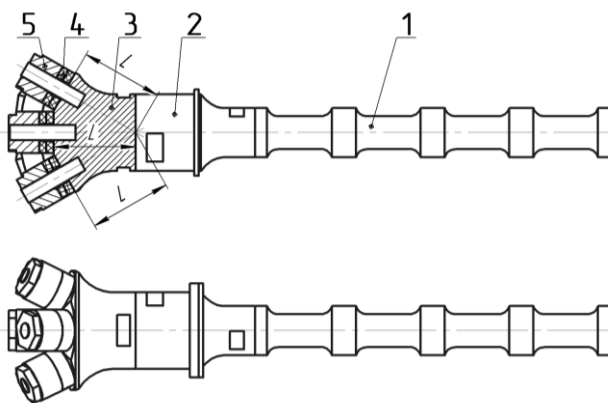
Излучающий элемент – труба, наружный диаметр 45 мм , длина 2900 мм , толщина стенок 4 мм , площадь излучающей поверхности 547 см^2 , мощность выводимых в среду ультразвуковых колебаний до 1000 Вт , материал колебательной системы – титановый сплав. УЗКС может быть использована для осуществления процессов УЗ эмульгирования, очистки и экстракции с возможностью задания рабочей частоты в соответствии с требуемыми параметрами процесса и габаритными размерами технологического объема.

Создание подобных конструкций и активных рабочих инструментов с увеличенной поверхностью излучения, позволяющих вводить в обрабатываемую среду УЗ колебания с мощностью более 3000 Вт , потребовало разработки соответствующих колебательных систем. При этом с учетом КПД существующих пьезопреобразователей (приблизительно 70%) возникает необходимость использовать в составе УЗКС преобразователи, способные обеспечить формирование УЗ колебаний при подаче электрических колебаний, мощностью не менее $4\text{--}6 \text{ кВт}$. Очевидно, что поверхность формирования УЗ колебаний в преобразователе должна быть не меньше поверхности излучения и должно выполняться условие обеспечения работы пьезопреобразователя в режимах, не превышающих предела механической прочности керамики (то есть амплитуда колебаний не должна превышать 5 мкм). Необходимость выполнения этого условия обуславливает увеличение площади поверхности формирования ультразвуковых колебаний не менее чем в $4\text{--}5$ раз по сравнению с площадью излучения, то есть до значений, превышающих $100\text{--}1000 \text{ см}^2$. Применение пьезоэлектрических элементов при построении подобных УЗКС малоэффективно из-за ог-

раниченных размеров выпускаемых промышленностью пьезоэлектрических кольцевых элементов, не превышающих 50–70 мм в диаметре.

Для решения проблемы был предложен пьезопреобразователь, позволяющий суммировать мощности ультразвуковых колебаний, генерируемых набором пакетов пьезоэлектрических элементов малых размеров. Это дало возможность обеспечить генерацию колебаний достаточной для обеспечения кавитационного режима мощности, без превышения предельно допустимых параметров пьезоэлементов.

Конструктивная схема разработанной колебательной системы [5] показана на рисунке 3.23.



1 – активный рабочий инструмент с увеличенной поверхностью излучения;

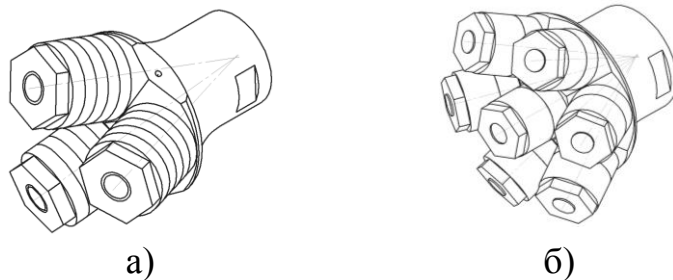
2 – согласующий акустический трансформатор (концентратор);

3 – рабочая частотнопонижающая накладка; 4 – пьезоэлектрические элементы;

5 – отражающие частотнопонижающие накладки

Рисунок 3.23 – Схема ультразвуковой колебательной системы для проточной обработки жидких сред

На рисунке 3.24 показан аксонометрический вид двух типов ультразвуковых преобразователей. На рисунке 3.24, а – с тремя пакетами пьезоэлектрических элементов (средней мощности, до 2000 Вт), на рисунке 3.24, б – с семью пакетами пьезоэлектрических элементов (большой мощности, до 6000 Вт).



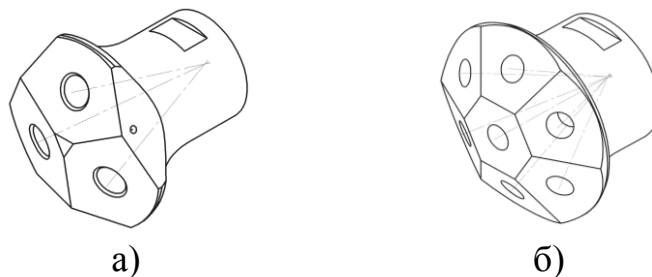
а)

б)

а) – средней мощности; б) – большой мощности

Рисунок 3.24 – Аксонометрический вид ультразвуковых колебательных систем

На рисунке 3.25 представлен аксонометрический вид рабочих частотнопонижающих накладок преобразователей. На рисунке 3.25, а – с тремя гранями, на рисунке 3.25, б – с семью гранями (большой мощности).



а) – с тремя гранями; б) – с семью гранями
Рисунок 3.25 – Частотнопонижающие накладки

Внешний вид УЗКС, содержащей в своем составе преобразователь, состоящий из семи пакетов пьезоэлементов, показан на рисунке 3.26.



Рисунок 3.26 – Внешний вид ультразвуковой колебательной системы для проточной обработки жидких сред

Мощность излучения колебаний в водную среду колебательной системой, содержащей преобразователь на базе трех пакетов пьезоэлементов, составляет 2 кВт, а системой, содержащей преобразователь, состоящий из семи пакетов пьезоэлементов, – до 6 кВт. КПД таких колебательных систем достигает 0,8.

4 ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДЫХ СРЕДАХ

Воздействие ультразвуковых колебаний на твердые среды позволяет осуществлять технологические процессы, не реализуемые или сложно реализуемые, традиционными методами – обеспечивать размерную обработку (сверление, резание, шлифовку, полировку, снятие фасок, выполнение пазов) хрупких и особо твердых материалов, таких как керамика, стеклопластики, полупроводниковые материалы, стекло, самоцветы, ферриты, сверхтвердые сплавы и стали. Применение ультразвуковых колебаний при безобразивной финишной обработке металлов позволяет изменить свойства поверхностей обрабатываемых металлов, такие как чистота поверхности (шероховатость) и твердость поверхности за счет высокочастотных деформаций. Для размерной обработки материалов при воздействии ультразвуковых колебаний хрупкий материал выкалывается из изделия ударами зерен более твердого абразива, которые направляются торцом рабочего инструмента, колеблющегося с УЗ частотой [7]. Применение УЗ колебаний позволяет интенсифицировать процесс хрупкого разрушения обрабатываемого материала за счет создания сетки микротрещин и выколов на поверхности. При помощи такого способа обрабатываются материалы с высокой твердостью и/или хрупкостью. К обрабатываемым материалам с высокой твердостью относятся вольфрамосодержащие и титанокарбидные сплавы, алмаз, рубин, лейкосапфир, закаленные стали, магнитные сплавы из редкоземельных элементов, термодорунд и др.

Обработка другой группы материалов, таких как германий, кремний, ферриты, керамика, стекло, кварц, полудрагоценные и поделочные минералы, затруднена их очень высокой хрупкостью. Такие материалы не выдерживают усилий, возникающих при традиционной механической обработке [34]. Поскольку именно перечисленные выше материалы во многом определяют прогресс техники, возникает необходимость эффективно обрабатывать детали из подобных, «не обрабатываемых традиционными способами», материалов.

4.1 Процессы размерной обработки и сверления

Технология УЗ обработки заключается в подаче абразивной суспензии в пространство между колеблющимся с высокой частотой торцом рабочего инструмента 1 и поверхностью обрабатываемого изделия 4. Зерна абразива 3, под действием ударов инструмента ударяют по поверхности обрабатываемого изделия и осуществляют его разрушение (рисунок 4.1) [35]. В качестве абразива используются карбид бора или карбид кремния, в качестве жидкости 2 – вода. Вследствие воздействия частичек абразива на поверхность рабочего инструмента происходит его разрушение. Для уменьшения износа рабочего инструмента его обычно выполняют из вязких материалов, не поддающихся сколам

под действием ударных нагрузок. Частицы абразива под действием ударов раскалываются. Поэтому в зону обработки непрерывно подается суспензия, несущая зерна свежего абразива и удаляющая частицы снятого материала и размельченный абразив.

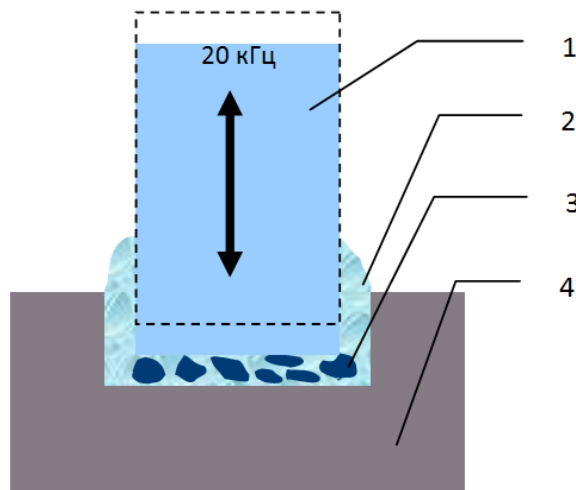


Рисунок 4.1 – Схематичное изображение процесса ультразвуковой размерной обработки

Для уменьшения шумового воздействия от работающих УЗ аппаратов, рабочая частота выбирается высокой, обычно это 18 кГц или более. Подача рабочего инструмента в направлении колебаний обеспечивает формирование полости, копирующей форму рабочего инструмента. Таким образом, ультразвуковая размерная обработка базируется на двух основных процессах:

- ударном внедрении абразивных зерен, вызывающих выкалывание частиц обрабатываемого материала;
- циркуляции и смене абразива в рабочей зоне за счет кавитации.

Обязательным условием высокопроизводительной УЗ обработки материалов является интенсивное протекание этих двух процессов. Ограничения, возникающие для протекания каждого из этих процессов, вызывают снижение эффективности всей УЗ обработки [35, 36].

Производительность УЗ обработки зависит от физико-механических свойств материалов, частоты и амплитуды колебаний рабочего инструмента, зернистости абразива и нагрузки на инструмент. Влияние всех этих факторов на процесс ультразвуковой размерной обработки будет рассмотрено далее.

Способ УЗ обработки начал применяться в промышленности в начале шестидесятых годов прошлого века. С его помощью удалось существенно упростить и ускорить технологию изготовления фасонных деталей из твердых и хрупких материалов. Так, например, в сотни раз повысилась производительность вырезания пластин из различных керамик, полупроводниковых материа-

лов, появилась возможность выполнять отверстия любой формы, упростилась технология изготовления матриц и пуансонов из твердых сплавов.

Однако уже в первых работах по промышленному применению был выявлен основной недостаток УЗ способа обработки – существенное уменьшение производительности процесса по мере увеличения глубины обработки [35]. Для объяснения этого явления используются два предположения. Согласно первому [35] при увеличении боковой поверхности рабочего инструмента, контактирующей с обрабатываемым материалом, амплитуда колебаний инструмента уменьшается вследствие трения, а уменьшение амплитуды приводит к снижению производительности. Это предположение до настоящего времени не получило четкого экспериментального подтверждения. При использовании сплошных инструментов и достаточном запасе мощности используемых генераторов (что было ранее), рассматриваемое предположение не подтверждается экспериментально. Однако при использовании трубчатых инструментов с тонкой стенкой в комплекте с маломощными генераторами амплитуда колебаний инструмента уменьшается и скорость обработки падает.

Второе предположение, основанное на результатах многочисленных экспериментов, объясняет уменьшение скорости обработки с увеличением глубины ухудшением условий подачи свежего абразива в зону обработки и удаления продуктов обработки. Экспериментально установлено, что при отсутствии подачи свежего абразива, имеющийся разрушается так, что за 0,5–0,6 с размеры частиц уменьшаются в 5 раз [36].

В начале 70-х годов прошлого века были детально изучены основополагающие физические принципы УЗ обработки хрупких материалов. Одновременно с исследованиями физических процессов шло создание УЗ станков для промышленного использования [36]. Типичная конструктивная схема станка для УЗ обработки имеет ряд специфических узлов, отличающих его от традиционных металлорежущих станков (рисунок 4.2). УЗ станок содержит генератор электрических колебаний 1, УЗ колебательную систему 2, обеспечивающую преобразование электрических колебаний в механические и их введение в обрабатываемое изделие 3, механизм подачи колебательной системы 4, систему подачи абразивной суспензии, включающую в себя насос и устройство подачи суспензии в зону обработки (на рисунке не показаны) [31].



Рисунок 4.2 – Конструкция ультразвукового станка

Кроме того, УЗ станок имеет ряд узлов, используемых в обычных металло-режущих станках: стол 5, станину 6. УЗ колебательная система содержит электромеханический преобразователь (ранее обычно использовался преобразователь магнитострикционного типа), концентратор – усилитель амплитуды колебаний и рабочий инструмент. Применение концентратора обеспечивает необходимую амплитуду колебаний рабочего инструмента (10–70 мкм) на заданной рабочей частоте. Механизм подачи прижимает рабочий инструмент к обрабатываемому изделию, укрепленному на столе, с небольшим усилием (до 3–5 кг) и по мере съема материала осуществляет подачу инструмента, поддерживая течение процесса. Система подачи абразивной суспензии обеспечивает непрерывное поступление свежего абразива в зону обработки.

Энергетически выгодным может быть применение процесса УЗ прошивки, характеризуемого при обработке стекла энергоемкостью в пределах 2–10 Дж/мм³ (что приблизительно соответствует энергоемкости традиционного сверления металлов). Для реализации столь низкоэнергоемкого процесса (в 10 раз менее энергоемкого, чем реализуемые ранее) необходимо применение ультразвуковых прошивочных станков, обеспечивающих:

- выполнение отверстий диаметром до 5 мм глубиной не менее 20 мм при номинальной мощности генератора не более 50 Вт с производительностью процесса не менее 5 мм/мин;
- выполнение отверстий диаметром до 25 мм на глубину до 10–15 мм при использовании генераторов с номинальной мощностью не более 150 Вт и производительностью не менее 3 мм/мин;
- выполнение отверстий диаметром до 40–60 мм при номинальной мощности используемого генератора не более 250 Вт с производительностью не менее 2 мм/мин;

- выполнение отверстий диаметром до 120 мм при номинальной мощности ультразвукового генератора не более 400 Вт с производительностью не менее 1 мм/мин [31].

Наряду с необходимостью создания высокоэффективных малогабаритных станков, пригодных для выполнения отверстий диаметром более 80 мм, необходимо решить проблему выполнения отверстий глубиной до 30–40 мм и более.

Экспериментальные исследования, проведенные с использованием алмазного инструмента, вращающегося с частотой от 600 до 2500 оборотов в минуту и колеблющегося на УЗ частоте с амплитудой 10–11 мкм позволили выполнить отверстия диаметром от 2,5 до 6 мм на глубину до 400 мм [31]. Применение алмазного инструмента обеспечило значительное повышение точности, качества поверхности и производительности обработки.

4.2 Безобразивная ультразвуковая финишная обработка металлов. Шлифовка. Полировка

Уникальность технологии безобразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО) металлов состоит в том, что после обработки поверхности металла резцом возрастает твёрдость поверхностного слоя, в зависимости от исходной, на 10–150 %, [35, 36] появляется возможность получения шероховатости поверхности до 10–12 класса ($Ra=0,04-0,1$ мкм), повышается усталостная прочность на 10–200 %, увеличивается опорная поверхность до 80–90 %, некруглость геометрии детали после резца снижается на 25–30 %. При условии твердого точения детали использование БУФО исключает необходимость применения шлифовальных станков. Таким образом, становится реальной технология обработки деталей, не снимая с центров, за один «установ».

Возрастает производительность, согласно практике некоторых заводов РФ, растет до тридцати раз. Более того, становится возможной одновременная обработка детали резанием и ультразвуком; при этом технология освобождается от абразива, войлока, притирочных паст и грязной ручной работы. Естественно, исключается внутрицеховая транспортировка деталей, возможные припуски. Экономятся: производственная площадь, электроэнергия и отпадает потребность в специалистах - шлифовщиках. При крупносерийном производстве возможна и целесообразна автоматизация и роботизация процесса.

С помощью оборудования БУФО можно обрабатывать большинство известных марок стали, алюминия, меди и других металлов. Обрабатываются различные конструктивные формы деталей: цилиндрические наружные и внутренние поверхности, торцевые, конические и шаровые поверхности, различные выступы, прямоугольные и радиусные канавки и т.д.

4.3 Процессы диспергирования

Ультразвуковые колебания широко применяют для избирательного дробления синтетических алмазов марок АСВ, АСО, АСПК, где разрушаются сростки алмазных частиц [22]. При этом образуются более мелкие, но прочные зерна. Так, после ультразвуковой обработки в воде при избыточном статическом давлении в течение 15 мин прочность алмазов (после разрушения сростков) увеличивается примерно в два раза. Дальнейшее разрушение в ультразвуковом поле прекращается.

Однако, как правило, реальная прочность материалов значительно ниже их теоретической прочности из-за неизбежного наличия структурных дефектов. Дефектность структуры образуется за счет дефектов поверхностного слоя, внутренних напряжений, точечных и линейных дислокаций и др.

Таким образом, с помощью ультразвукового метода можно за небольшим исключением достигнуть высокой дисперсности практически любых твердых материалов.

Следует отметить, что на любых ультразвуковых диспергаторах наибольшей эффективности диспергирования достигают при *оптимальном времени обработки*. При кратковременной обработке происходит недостаточное измельчение, а при слишком длительной обработке возникает агрегация тонкодисперсных частиц с образованием достаточно крупных конгломератов. Так, при диспергировании двуоксида циркония содержание фракции 0,02 мкм составляет 11 % при ультразвуковой обработке в течение 30 мин, при обработке в течение 3 ч оно возрастает до 20 %. Дальнейшее увеличение продолжительности диспергирования до 8 ч приводит к снижению содержания этой фракции до 5 %. Аналогичные результаты получены при диспергировании оксидов гафния, иттрия и титана.

4.4 Ультразвуковые аппараты и оборудование для ускорения процессов в твердых средах

Для интенсификации процессов резки различных материалов (полимерных пленок, дерева, тканей, кондитерских изделий и т.п.) предназначен УЗ нож (рисунок 4.3). Форма и размеры режущего инструмента могут быть различные [31]. Технические характеристики представлены в таблице 4.1. Рабочая частота $44 \pm 3,3$ кГц.



Рисунок 4.3 – Многофункциональный ультразвуковой аппарат (ультразвуковой нож) «Надежда-2»

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики

Мощностью, ВА	100
Масса ультразвукового ножа, Г	250

Для нанесения рельефных рисунков на поверхности хрупких и твердых материалов (стекло, камень, керамика), выполнения сквозных и глухих отверстий произвольной формы создана серия ультразвуковых аппаратов, показанных на рисунке 4.4. Технические решения защищены патентами РФ №2131794 и №2250814 [37].



а) УЗ станок «Сапфир»
СУЗ-0,8/22-О



б) УЗ станок «Сапфир»
СУЗ-0,4/22-О



в) устройство вращения колебательной системы
УЗ станка
СУЗ-0,25/22-ОВ

Рисунок 4.4 – Серия ультразвуковых аппаратов для размерной обработки

Все станки комплектуются штативом и станиной для крепления ультразвуковой колебательной системы, а также сменными рабочими инструментами различного диаметра и формы.

Основные технические характеристики серии ультразвуковых станков приведены в таблице 4.2. Рабочая частота составляет $22 \pm 1,65$ кГц.

Таблица 4.2 – Основные технические характеристики

Модель	СУЗ-0,8/22-О	СУЗ-0,4/22-О	СУЗ-0,25/2-ОВ
Мощность, ВА	800	400	250
Диаметр выполняемых отверстий, мм	1,5–50	1,5–30	1,5–25
Скорость обработки (по стеклу), мм/мин	до 5	до 3	15

4.5 Ультразвуковые колебательные системы для ускорения процессов в твердых средах

Ультразвуковая колебательная система, используемая для размерной обработки твердых материалов, должна удовлетворять ряду общих требований [38]: работать в разрешенном частотном диапазоне (22 или 44 кГц) при всех возможных в ходе технологического процесса изменениях нагрузки; обеспечивать необходимую амплитуду колебаний (30–70 мкм); иметь максимально возможный КПД; рабочий инструмент колебательной системы, контактирующий с абразивной суспензией, должен обладать кавитационной стойкостью, иметь жесткое крепление в корпусе, в случае ручного исполнения иметь минимальные габариты и вес. Всем этим требованиям удовлетворяет полуволновая колебательная система, рассматриваемая далее. Все колебательные системы для размерной обработки можно разделить на две группы: это малогабаритные колебательные системы для ручной размерной обработки и колебательные системы, предназначенные для стационарной обработки.

Пример ручной колебательной системы показан на рисунке 4.5.

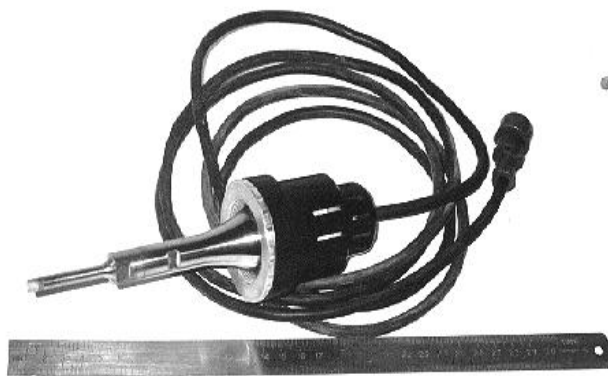


Рисунок 4.5 – Малогабаритная ультразвуковая колебательная система для размерной обработки

Малогабаритные колебательные системы для ручной размерной обработки [38, 39] созданы на базе полуволновых систем, для интенсификации процессов в жидких средах. Необходимая форма выполняемых отверстий обеспечивается применением соответствующих инструментов.

На рисунке 4.6 представлены конструкции сменных рабочих инструментов для выполнения отверстий различной формы.



Рисунок 4.6 – Сменные рабочие инструменты для размерной обработки

Рассмотренные рабочие инструменты позволяют обеспечить выполнение отверстий практически любой формы или дают представление об изготовлении рабочих инструментов для выполнения отверстий любой формы или пазов.

Среди колебательных систем для стационарной размерной обработки следует отдельно выделить класс систем, обеспечивающих вращение рабочего инструмента (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Ультразвуковая колебательная система с вращением для размерной обработки

Узел вращения колебательной системы обеспечивает повышение эффективности обработки за счет реализации более совершенной технологии обработки. Эта технология позволяет существенно интенсифицировать процесс

размерной ультразвуковой обработки за счет совмещения долбления обрабатываемого материала рабочим сменным инструментом при помощи ультразвуковых колебаний и абразивной суспензии с одновременным вращением самого инструмента. Кроме того, применение простого и несложного в изготовлении инструмента из обычной стали (например, сталь 3) позволяет производить обработку многослойных конструкций, состоящих из чередующихся листов твердых хрупких материалов (стекло) и вязких материалов (полимерные пленки).

На рисунке 4.8 представлена конструкция колебательной системы для размерной обработки с вращением и подачей абразивной суспензии [40]. Ультразвуковая колебательная система состоит из тыльной отражающей 1 и рабочей концентрирующей 2 накладок и пьезопреобразователя 3, размещенных на центральном стержне 4, выполняющем роль приводного вала вращения колебательной системы.

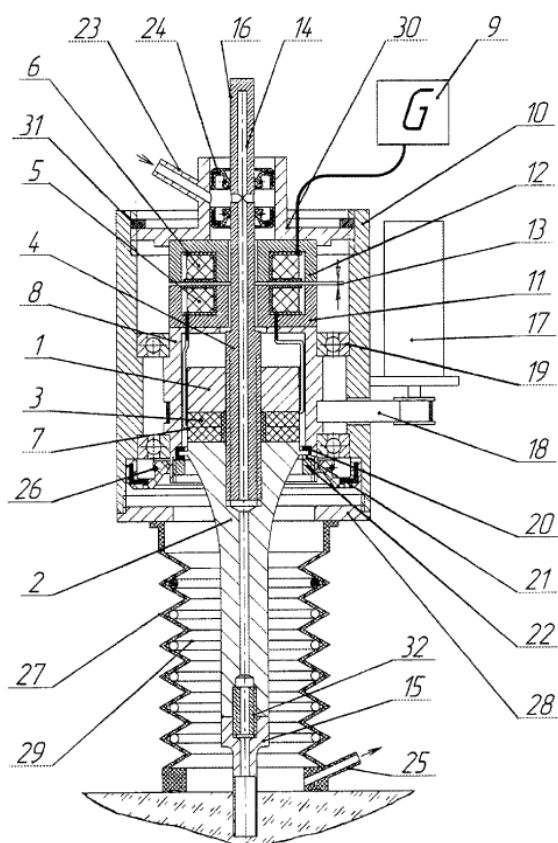


Рисунок 4.8 – Ультразвуковая колебательная система для размерной обработки с вращением

Длина выступающей из тыльной накладки части стержня кратна четверти длины волны УЗ колебаний в материале стержня. Токосъемник выполнен бесконтактным, в виде двух катушек индуктивности 5 и 6, одна из которых, 5, электрически связана с электродами 7 пьезопреобразователя 3, механически – с

внутренним вращающимся корпусом 8, а вторая катушка подключена к выходу генератора 9 электрических колебаний и механически жестко соединена с внешним неподвижным корпусом 10. При этом катушки индуктивности расположены со стороны тыльной накладки 1 соосно акустической оси системы внутри обращенных друг к другу чашеобразных магнитопроводов 11 и 12. Узел подачи абразивной суспензии выполнен в виде канала 14, проходящего по акустической оси концентратора 2 и рабочего инструмента 15. Подача суспензии в зону обработки осуществляется нагнетающим насосом через впускной патрубок 23, сальниковый узел 24, пустотелый вал 4, центральный канал колебательной системы, пустотелый инструмент 15. Сальниковый узел установлен на валу 4 на расстоянии, равном четвертой части длины волны в материале вала, где амплитуда колебаний минимальна. Удаление отработавшей суспензии и разрушенного обрабатываемого материала осуществляется с помощью откачивающего насоса, присоединенного к патрубку 25. Сальниковый узел 26 и сильфон 27, выполненный из эластичного прозрачного полимерного материала, служат для обеспечения в зоне обработки разрежения, необходимого для удаления отработавшей абразивной суспензии и продуктов обработки. Сильфон 27 установлен на крышке 28, крепящейся посредством резьбы к неподвижному корпусу 10. Для предотвращения схлопывания сильфона 27 установлены распорные кольца 29.

Особенностью рассматриваемой конструкции является бесконтактная передача энергии от генератора электрических колебаний ультразвуковой частоты 9 на электроды 7 пьезоэлементов 3 системы. Применение бесконтактного токосъемника позволило избежать проблем, связанных с щеточным токосъемником и значительно повысить привлекательность подобного оборудования.

Для присоединения рабочего инструмента к торцевой поверхности частотно-понижающей рабочей накладке (концентратора) 2 используется сменная полая соединительная шпилька 32. Она выполнена из материала, предел прочности которого меньше предела прочности материалов накладок и инструментов. Это позволяет не опасаться повреждения резьбовых соединений накладок и инструментов и использовать алюминиевый сплав в качестве материала рабочей накладки (концентратора) 2. Его волновое удельное сопротивление в три раза меньше сопротивления материала отражающей накладки, выполненной из стали. Это дает дополнительное увеличение амплитуды колебаний в 2–3 раза.

5 ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССОВ В ПОЛИМЕРНЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

5.1 Процессы сварки

В настоящее время используются разнообразные способы соединения полимерных материалов, такие как клеевой, тепловой, токами высокой частоты [41]. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и существенные недостатки. Так, тепловой способ не обеспечивает необходимой прочности, а формируемый им шов является хрупким. Высокочастотный способ соединения может использоваться только для полимеров с высокими диэлектрическими потерями, так как основан на поглощении материалом энергии токов высокой частоты, вызывающей внутренний разогрев материала. Поэтому высокочастотный способ не пригоден для множества широко распространенных материалов. В частности, большой проблемой является соединение тканей на основе синтетических волокон. Использование обычных способов соединения в этом случае не всегда приемлемо из-за высокой упругости синтетических волокон.

Наиболее перспективным способом решения проблем соединения полимерных материалов является УЗ способ, обеспечивающий прочный, долговечный и эластичный шов, высокую производительность процесса, безопасность и возможность автоматизации. В настоящее время УЗ сварка является одним из наиболее эффективных и наиболее широко используемых для соединения полимерных материалов способов [41]. Без ультразвука невозможно дальнейшее совершенствование технологии сварки таких полимеров, как полистирол, полиметилметакрилат, полиэтилентерефталат и т.д. Технико-экономическая целесообразность использования УЗ сварки не вызывает сомнений.

Анализ технических возможностей УЗ способа соединения полимерных материалов (сварки) позволил выявить его несомненные достоинства, к основным из которых относятся:

- возможность получения надежного шва при температуре, меньшей температуры плавления материала [42], что позволяет избежать термического разложения материалов в воздухе;
- возможность повышения качества герметизирующего шва за счет увеличения (в миллионы раз) диффузионного взаимопроникновения свариваемых материалов, обусловленного знакопеременными механическими напряжениями в УЗ поле высокой интенсивности [41, 42];
- возможность снижения сварочного усилия до значений, значительно меньших предела текучести свариваемого материала [42], что позволяет снизить массогабаритные и стоимостные характеристики устройств сжатия полимерных материалов и обеспечить соединение полимерных материалов вручную с помощью многофункциональных УЗ аппаратов;

- возможность сварки материалов, на поверхности которых имеются загрязнения или нанесены жидкие и жировые пленки [41, 42];

- УЗ сварка осуществляется односторонним способом, и УЗ энергию можно вводить на расстоянии от места соединения;

- при ультразвуковой сварке полимерных материалов максимальный разогрев происходит на соединяемых поверхностях, что исключает перегрев материала по толщине.

С помощью УЗ качественно соединяются любые термопластичные материалы, к которым относятся: полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, полиамид, полиакрилат, поликарбонат и др.

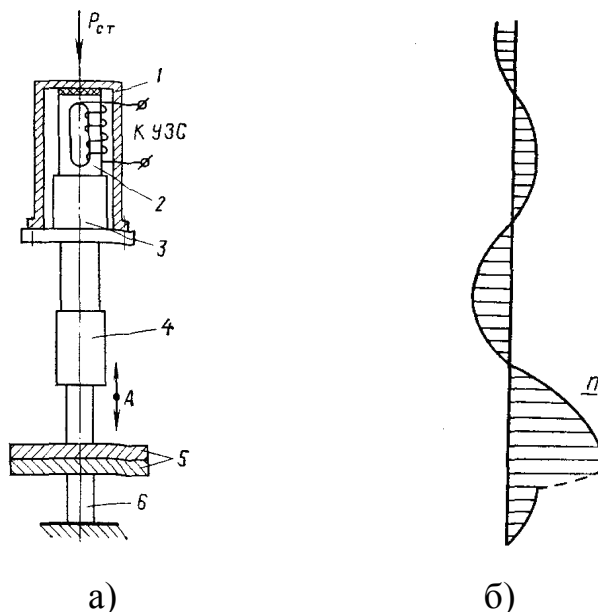
УЗ сварка пластмасс основана на использовании энергии механических колебаний сварочного наконечника. Колебания совершаются с частотой свыше 20 кГц и амплитудой колебаний на уровне 100 мкм. Энергия в зону сварки вводится посредством сварочного усилия (рисунок 5.1).

Согласно современным представлениям [43], процесс сварки рассматривают как топохимическую реакцию, т.е. химическую реакцию, протекающую на поверхности твердого тела. В основе любой химической реакции лежит процесс разрыва связей в исходных веществах и возникновения новых связей, приводящий к образованию нового вещества. Таким образом, механизм образования соединения не меняется при переходе от одного способа сварки к другому и от одного материала к другому. Изменяется только совокупность явлений на контактных поверхностях, приводящая их в состояние взаимодействия. Эти явления могут быть различными и определяются материалом и способом сварки. Для топохимических реакций характерно протекание в три стадии:

- 1) образование физического контакта;
- 2) активация контактных поверхностей;
- 3) объемное развитие взаимодействия.

В настоящее время на практике реализуются различные схемы, по которым может осуществляться УЗ сварка полимерных материалов. Это обусловлено разнообразием свойств и структуры свариваемых материалов, конфигурации и размеров деталей, требований, предъявляемых к сварным швам и свариваемому изделию в целом. Классификация схем УЗ сварки пластмасс должна производиться с учетом всех основных признаков. К этим признакам относятся:

- 1) подвод энергии УЗ колебаний к свариваемому изделию;
- 2) передача механической энергии к зоне сварки;
- 3) концентрация энергии в зоне сварки;
- 4) дозирование вводимой энергии;
- 5) взаимное перемещение сварочного инструмента и свариваемых деталей для получения швов необходимой конфигурации и протяженности.



а) 1 – корпус преобразователя; 2 – пьезоэлектрический
Преобразователь; 3 – концентратор ультразвуковых колебаний;
4 – свариваемые детали; 5 – подложка
б) – эюра амплитуды
смещения
колебательной системы

Рисунок 5.1 – Ультразвуковая сварка с нормальным вводом колебаний

Наиболее полная классификация схем ультразвуковой сварки с учетом этих признаков, разработанная коллективом авторов под руководством С.С. Волкова [44] приведена на рисунке 5.2.

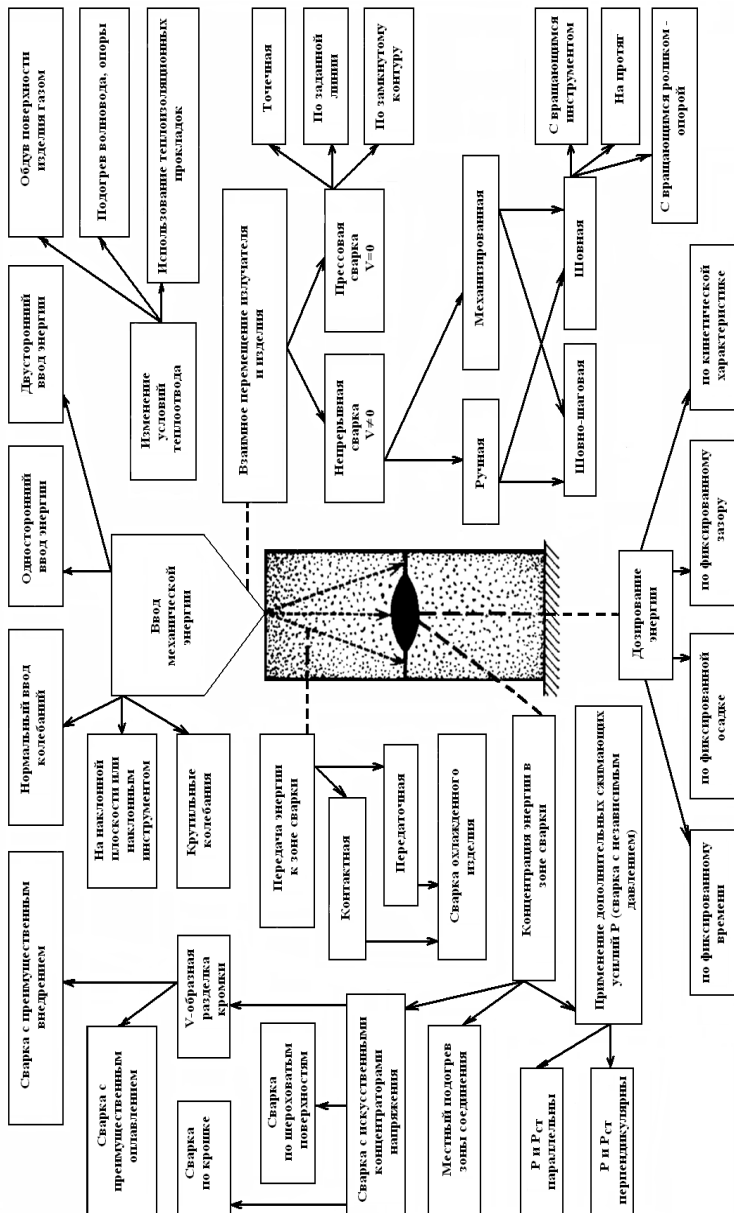


Рисунок 5.2 – Классификация схем ультразвуковой сварки пластмасс

Показанное на рисунке 5.2 многообразие схем УЗ сварки термопластичных материалов является следствием в первую очередь различных схем подвода энергии колебаний к свариваемым деталям, различных способов передачи энергии к зоне сварки и различных видов перемещения УЗ колебательной системы относительно изделия.

По характеру передачи энергии к границе раздела и распределения ее по свариваемым поверхностям УЗ сварка может быть разделена на контактную и передаточную [43, 44]. Возможность передачи механической энергии к зоне сварки зависит от упругих свойств и коэффициента затухания колебаний в свариваемых материалах. Если полимерный материал характеризуется низким модулем упругости и большим коэффициентом затухания, то сварное соединение можно получить лишь на малом удалении от плоскости ввода колебаний. Для равномерного распределения энергии по всей площади контакта свариваемых

деталей необходимо, чтобы рабочий торец волновода, соприкасающийся с верхней деталью, имел площадь и форму, идентичную площади и форме плоскости контакта свариваемых деталей. Сварка по такой схеме называется контактной ультразвуковой сваркой.

Если полимерный материал обладает высоким модулем упругости и низким коэффициентом затухания, то сварное соединение можно получить на большом удалении от поверхности ввода УЗ колебаний. Тепловыделение на границе раздела в этом случае зависит от конфигурации изделия, а площадь сварки значительно отличается от площади рабочего торца волновода. Сварка по такой схеме называется передаточной УЗ сваркой.

В зависимости от перемещения колебательной системы относительно изделия, сварку можно разделить на непрерывную и прессовую. Непрерывная сварка позволяет получать протяженные швы за счет относительного перемещения УЗ колебательной системы и свариваемого изделия. Она используется для сварки изделий из пленок и синтетических тканей: мешков, фильтров и т.п. Прессовая сварка выполняется за одно рабочее движение колебательной системы. С помощью такой сварки получают точечные, прямолинейные и замкнутые швы различного контура, например, в виде квадрата, прямоугольника, эллипса и т.д.

5.2 Процессы формования и экструзии

Интенсификация процессов переработки полимерных материалов направлена на изменение характера течения неньютоновских жидкостей [4]. Акустические воздействия позволяют реализовать различные эффекты, влияющие на реологические свойства полимеров. Эти эффекты можно условно разделить на две группы: поверхностные и объемные. Поверхностные эффекты проявляются на границах раздела расплавов с твердой фазой. Они сопровождаются существенным уменьшением адгезии и, как следствие, изменением характера течения вблизи твердых поверхностей. В частности, можно отметить следующие эффекты при периодическом режиме деформирования: нарушение структурных связей, носящее как тиксотронный, так и деструктивный характер; переход в высокоэластичное состояние и уменьшение вязкости, связанное с увеличением температуры поверхностных слоев за счет поглощения энергии и увеличения теплообмена со стенкой; кавитацию и др.

Совокупность воздействия поверхностных эффектов приводит к пристенному скольжению полимерных материалов, существенно влияющему на различные технологические процессы их формования. Воздействие колебаний на

упруго-вязко пластичные материалы приводит к резкому уменьшению предельного напряжения сдвига или его полному устранению. Бингамовские пластики при этом превращаются в ньютоновскую жидкость. Воздействия колебаний на сыпучие системы приводят к их ожижению.

Задача распространения волн в вязкоупругой среде достаточно сложна, однако наложение механических колебаний и волн позволяет целенаправленно управлять физико-механическими (структурными и реологическими) характеристиками веществ, что может быть использовано для интенсификации разнообразных процессов переработки полимерных материалов и композиций.

Ультразвуковые колебания используются для интенсификации процесса литьевого формования изделий. В этом случае колебания подают либо на сопло, либо непосредственно на литьевую форму.

При воздействии акустических колебаний на расплав полимера вследствие реологической нелинейности среднеинтегральная скорость заполнения формы возрастает в несколько раз, в 2–3 раза увеличивается предельная длина затекания формуемой массы в литьевую полость, интенсифицируется процесс нарастания и выравнивания давления в форме, в 1,5–1,7 раза уменьшаются механические энергозатраты на формование.

Использование акустических колебаний делает возможным переработку способом литьевого формования высоковязких композиций, например высокомолекулярного полиэтилена, который обычно перерабатывается прессованием.

Дегазация полимера в акустическом поле благоприятно сказывается на монолитности и четкости конфигураций изделий. Даже толстостенные изделия в этом случае формируются без пузырей, раковин и утяжин. Это приводит к 3–5-кратному повышению прочностных показателей отливок.

Акустическая аппаратура для литьевого формования серийно не выпускается, а разрабатывается по специальным заказам.

При экструзии полимеров большое значение имеет возможность повышения скорости процесса без деформации и дробления струи материала.

Одно из решений этой проблемы – резкое уменьшение силы трения полимера о стенки канала экструдера, что достигается действием акустических колебаний. Это объясняется тем, что в пограничном слое, толщина которого значительно меньше толщины стенки изделия, периодически происходит деформация полимера. В результате ряда явлений (переход в высокопластичное состояние, разрушение надмолекулярной структуры, повышение температуры и др.) меняются адгезионно-фрикционные свойства полимера, вызывающие существенное снижение трения. При напорном течении это приводит к резкому увеличению объемного расхода.

Так, при полном отсутствии адгезионной связи текущего полимера с одной из поверхностей щелевого канала при исчезновении трения на одной из стенок

щели объемный расход ньютоновских жидкостей увеличивается в 4 раза, а вязких полимеров – в несколько десятков раз.

У полидисперсных систем, к которым относятся промышленные полимеры, переход в высокоэластичное состояние всех компонентов возможен только на сравнительно высоких акустических частотах. Так, для увеличения в 5–10 раз объемного расхода ударопрочного полистирола и поливинилхлорида при неизменном перепаде давления необходимо воздействовать акустическими колебаниями частотой 18–22 кГц при амплитуде колебаний стенки канала в 8–20 мкм.

Несколько менее эффективно воздействие акустических колебаний на увеличение объемной скорости резиновых смесей. Так, при профилировании резиновых смесей пластичностью в 0,30–0,37 скорость шприцевания удается повысить всего лишь в 1,5–2 раза.

Использование акустических колебаний наиболее эффективно для производства труб, листов и толстых пленок, когда процесс происходит при низких скоростях экструзии.

5.3 Процессы прессования полимеров

Использование акустических колебаний в процессе прессования изделий из различных пластмасс способствует интенсификации процесса, а также улучшению качества изделий [4].

Подавая акустические колебания на матрицу, пуансон или другие элементы формирующего инструмента, можно повысить эффективность оборудования как для прямого (компрессионного), так и для литьевого прессования.

При компрессионном прессовании акустические колебания снижают усилия прессования, уменьшают температуру и время прессования, повышают структурную однородность изделия (по плотности, степени отверждения, распределению связующего и наполнителя и др.), снижают уровень остаточных напряжений в изделиях.

При литьевом прессовании акустические колебания улучшают условия прессования (в результате реологической нелинейности и ускорения релаксационных процессов), улучшают формуемость полимера, сокращают время заполнения формы, интенсифицируют нарастание давления в полости прессинструмента.

Несмотря на то, что статическое давление, создаваемое пуансоном, способствует лучшему использованию акустической энергии, для получения оптимальных условий формования в этом случае необходим подбор соотношения акустического и статического давлений.

Акустические устройства, применяемые для интенсификации процесса прессования, нашей промышленностью серийно не выпускаются, а разрабатываются по специальным заказам.

5.4 Ультразвуковые аппараты и оборудование для соединения полимерных материалов

Для соединения цилиндрических деталей, конструкционных изделий и листовых материалов из термопластичных материалов методом шовной или непрерывной УЗ сварки, а также для высокоскоростной резки с одновременным оплавлением кромки полимерного материала создана серия аппаратов, показанная на рисунке 5.3.



а) УЗ аппарат «Гладиус»
АУР-0,2/22-ОС



б) УЗ аппарат «Гиминей-ультра»
АУС-0,2/22-ОМ



в) УЗ аппарат «Гиминей-ультра» АУС-0,4/22-ОМ



г) УЗ аппарат «Гиминей-Ш»
АУС-1/22-ОШс-50



д) УЗ аппарат «Гиминей-Ш»
АУС-1/22-ОШ-150



е) Полуавтоматическая установка для сварки кольцевым швом
АУС-0,4/22-ОПа-60



ж) УЗ аппарат «Гиминей-Ш»
АУС-3/18-ОШ-360



з) Автоматизированная линия производства картриджей для очистки воды «Аквариус»
АЛУЗС-0,5/22-ОА

Комплектация сварочных машин и специального оборудования (упаковка жидких и пылящих материалов, изготовление георешетки и т.п.) позволяет создавать швы длиной до 360 мм и шириной до 12 мм.

Основные технические характеристики приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные технические характеристики

Рисунок 5.3 – Ультразвуковые аппараты для сварки термопластичных материалов

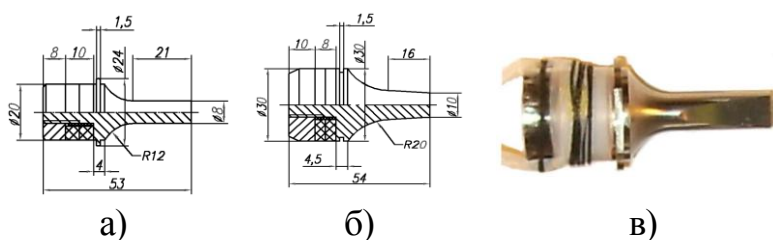
Модель	АУР-0,2/22-ОС	АУС-0,2/22-ОМ	АУС-0,4/22-ОМ	АУС-1/22-ОШс-50	АУС-1/22-ОШ-150	АУС-0,4/22-ОПа-60	АУС-3/18-ОШ-360	АЛУЗС-0,5/22-ОА
Мощность, ВА	200	200	400	1000	1000	250	3000	500
Цикл сварки, с	1	1–2	1–3	1–3	3	11	2–3	15
Толщина свариваемых листовых материалов, мм	5	5	до 10	до 15	до 10	2–3	0,1–0,2	2–3
Скорость сварки, мм/с	1–10	1–10	500	-	-	1–10	-	-
Размер инструмента, мм	15	2,5	8	45	50	Ø50	360	Ø50

В зависимости от формы свариваемых изделий и характера сварки оборудование может комплектоваться колебательными системами с ножевыми, контурными или точечными рабочими окончаниями.

Автоматизированная линия производства картриджей для очистки воды с аппаратом ультразвуковой сварки «Аквариус» осуществляет следующие операции: сборку фильтрующего картриджа для очистки воды, установку прокладки в стакан картриджа, загрузку фильтрующего порошка, установку крышки на стакан картриджа, соединение стакана картриджа с крышкой методом низкотемпературной ультразвуковой сварки и выгрузку готового изделия [5, 31]. Рабочая частота составляет $22 \pm 1,65$ кГц и $44 \pm 3,3$ кГц. Время непрерывной работы 8 часов.

5.5 Ультразвуковые колебательные системы для сварки и резки термопластичных материалов

В настоящее время разработан ряд высокоэффективных полуволновых систем (рисунок 5.4) для герметизации методом УЗ сварки, (для применения в ручных и стационарных запаивателях гемоконтейнеров). Материал отражающей накладки – сталь 45, материал излучающей накладки – титановый сплав [5,31]. Коэффициент усиления M_p равен 8–10. Собственная резонансная частота таких систем $44 \pm 3,33$ кГц. Интенсивность акустического излучения достигает 10–12 Вт/см².



а) – ручной вариант; б) – стационарный вариант; в)
– внешний вид

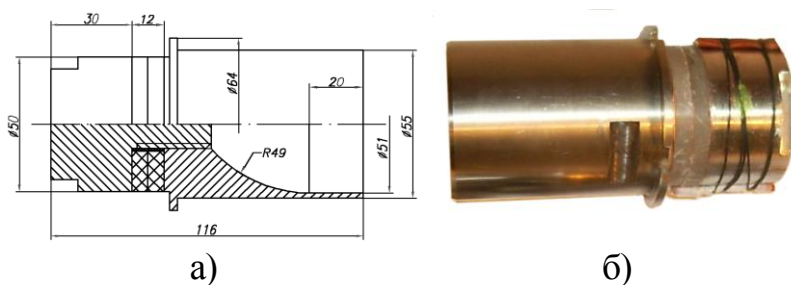
Рисунок 5.4 – Полуволновая пьезоэлектрическая
ультразвуковая
колебательная система для сварки термопластич-
ных материалов

Амплитуда колебаний на излучающей поверхности 15–25 мкм. Для выполнения протяженного контурного шва разработаны полуволновые колебательные системы для сварки термопластичных материалов (сварка крышки и корпуса картриджа для фильтрации воды).

Система разработана на базе пьезокерамики ЦТС-23 типоразмера 50x20x6 мм. Материал отражающей накладки – сталь 45, материал излучающей накладки – титановый сплав [31].

Коэффициент усиления M_p равен 15. Собственная резонансная частота системы $44 \pm 3,33$ кГц. Интенсивность акустического излучения достигает 13 Вт/см^2 . Амплитуда колебаний на излучающей поверхности 25–30 мкм.

Предложена конструкция и разработана колебательная система для выполнения сварных швов сложной конфигурации. Система реализована на базе пьезокерамики ЦТС-23 типоразмера 50x20x6 мм. Материал отражающей накладки – сталь 45, излучающей накладки – сплав Д-16. На рисунке 5.5 показан внешний вид такой колебательной системы с полуволновым активным рабочим инструментом, предназначенным для получения сварного шва сложной формы. Форма шва задается формой излучающей поверхности рабочего инструмента.



а) – конструкция; б) – внешний вид системы

Рисунок 5.5 – Полуволновая пьезоэлектрическая
ультразвуковая
колебательная система для сварки

Коэффициент усиления разработанной системы M_p равен 15. Собственная резонансная частота $22 \pm 1,65$ кГц. Амплитуда колебаний 25–40 мкм.

Резка материалов, снятие заусенцев является одной из важнейших технологических операций при производстве изделий из полимерных материалов [7]. Для уменьшения деформаций, возникающих при резке полимерных материалов, была создана колебательная система, показанная на рисунке 5.6.



Рисунок 5.6 – Ультразвуковая колебательная система для резки термопластичных материалов

Использованы пьезоэлементы марки APC типоразмера 24x13x6 мм. Материал отражающей накладки – сталь 45, материал излучающей накладки – титановый сплав. Нож представляет собой активный рабочий инструмент полуволнового типа и изготовлен из инструментального сплава У-8. Применение конструкции обеспечило амплитуду режущей кромки более 20 мкм. Коэффициент усиления системы M_p равен 15. Собственная резонансная частота системы $44 \pm 3,33$ кГц.

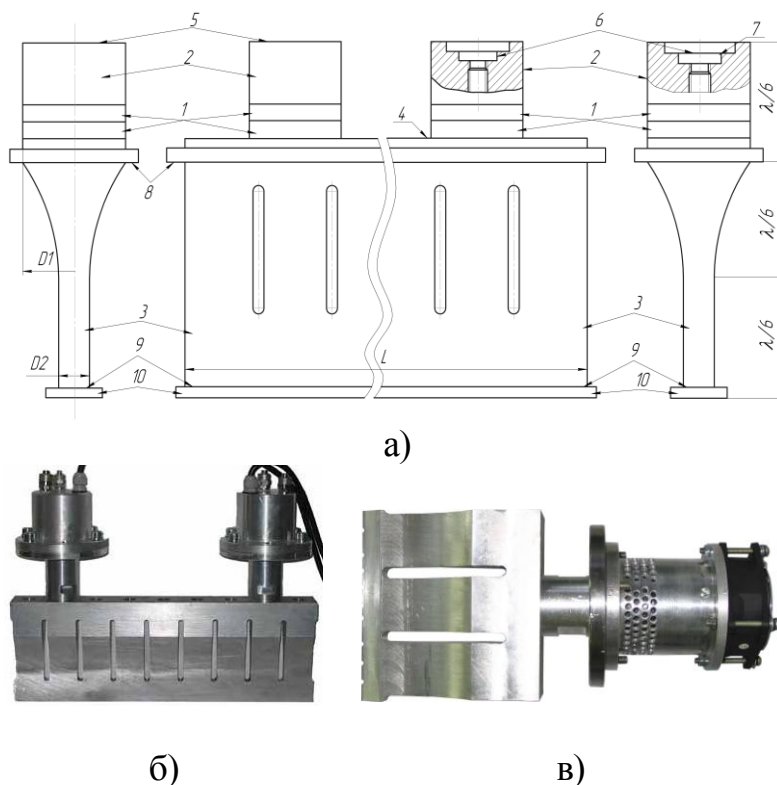
Для резки листовых материалов и пленок была разработана колебательная система со специализированными инструментами, показанная на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 – Ультразвуковая колебательная система

В колебательной системе использованы пьезокерамические кольцевые элементы марки APC типоразмера 38x16x6 мм. Материал отражающей накладки – сталь 45, материал излучающей накладки – титановый сплав. Амплитуда колебаний режущей кромки не менее 15 мкм. Коэффициент усиления разработанной системы M_p равен 15. Собственная резонансная частота системы $22 \pm 1,65$ кГц.

Для сварки термопластичных материалов при упаковке сыпучих и жидких материалов разработан и изготовлен ряд полуволновых пьезоэлектрических систем [5, 31]. Конструкция таких систем поясняется рисунком 5.8 а, на котором схематично представлена УЗКС, содержащая пьезоэлементы 1, отражающие резонансные накладки 2 и концентратор 3. Конструктивно система выполнена из параллельно расположенных на формирующей колебания поверхности 4 концентратора 3 и акустически связанных с ней пакетов из четного количества пьезоэлементов 1 (на рисунке 5.8 а показана колебательная система с двумя пакетами пьезоэлементов).



а) – конструкция; б) – внешний вид в корпусе;
 в) – внешний вид УЗКС длиной 150 мм
 Рисунок 5.8 – Пьезоэлектрические ультразвуковые
 колебательные системы для сварки термопластич-
 ных материалов – пленок

На каждом из пакетов, состоящих из четного числа пьезоэлементов (обычно двух или четырех), расположены акустически связанные с ними отражающие накладки 2, противоположная поверхность которых выполнена плоской 5 или ступенчато переменной по длине 6, а размеры и количество ступенек 7 выбраны из условия получения заданной полосы пропускания.

Концентратор 3 имеет узел крепления 8 и оканчивается излучающей колебания поверхностью 9 с рабочим инструментом 10. Формирующая 4 и излучающая 9 поверхности концентратора имеют прямоугольную форму одинаковой длины L , а отношение их поперечных размеров D_1 , D_2 выбирается из условия обеспечения заданного коэффициента усиления. Суммарная длина отражающей накладки 2, пакета пьезоэлементов 1 и участка концентратора до узла крепления равна шестой части длины волны колебаний в материале концентратора.

Размеры плавного перехода и участка с поперечным размером, соответствующим размеру излучающей поверхности, выбрали равной шестой части длины волны колебаний в материале концентратора, причём плавный переход выполнен радиальным.

На рисунке 5.8, б показан внешний вид разработанной колебательной системы с шириной излучающей поверхности 12 мм и длиной излучающей поверхности

360 мм. На рисунке 5.8, в показан упрощенный вариант колебательной системы для сварки термопластичных материалов с длиной формируемого шва не более 150 мм. Коэффициент усиления M_p равен 12. Резонансная частота колебательной системы $22 \pm 1,65$ кГц. Интенсивность излучения до 15 Вт/см^2 . Амплитуда колебаний на излучающей поверхности 25–30 мкм.

6 ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

Рассмотрим некоторые процессы, протекающие в газовых средах и интенсифицируемые с помощью упругих колебаний УЗ диапазона частот и сформулируем требования к акустической аппаратуре, используемой для интенсификации различных химико-технологических процессов в газовых средах [8].

Прежде всего рассмотрим источники УЗ колебаний, способные обеспечить возбуждение интенсивных колебаний в газовой среде. Помимо пьезоэлектрических, которые мы изучали, наибольшей эффективностью в данном случае обладают сирены – статические и динамические, поскольку они формируют УЗ колебания непосредственно в газовой среде.

6.1 Источники УЗ колебаний в газовых средах

Статические сирены или газоструйные излучатели (рисунок 6.1). Принцип работы и конструкция.

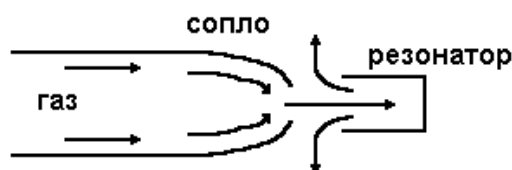


Рисунок 6.1 – Статическая сирена

Газ проходит через сопло, ускоряется. Вырывающаяся из малого отверстия струя за счет турбулентности обладает очень широким спектром колебаний. Резонатор позволяет выделить нужную частоту [7, 8]. Для создания направленного излучения используются различные рупорные устройства.

Технические характеристики статических сирен:

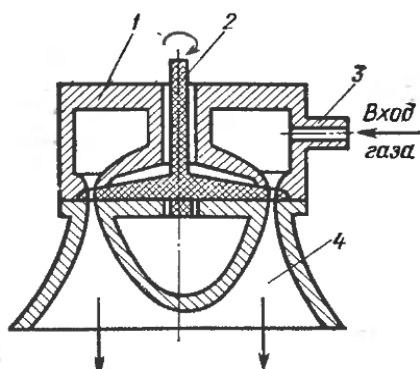
рабочее давление воздуха	2,25–3,0 кг/см
акустическая мощность	100 Вт–10 кВт
рабочие частоты	3–20 кГц
интенсивность	100–1000 Вт/м ²
сила звука	120–170 дБ

В ряде случаев применение таких излучателей затруднено из-за разбавления озвучиваемой среды (обрабатываемого газа) рабочим газом. В этом случае используются разделительные мембраны, закрывающие рупор или специальные конструкции, отводящие рабочий газ, например, через отверстия в рупоре.

Динамические сирены. Отличительная особенность – наличие ротора, приводимого во вращение электрическим мотором или пневматикой. В результате обеспечивается подача газа через периодически открываемые отверстия устройства.

Динамические сирены состоят из статорного диска и вращающегося роторного диска с большим количеством осесимметрично расположенных по периферии отверстий (рисунок 6.2). Поскольку поток газа, продуваемый через отверстия, периодически прерывается вращающимся роторным диском, возникают пульсации давления, создающие интенсивное излучение звуковой волны. Частота излучаемых колебаний определяется скоростью вращения ротора и числом отверстий.

Для повышения частоты колебаний используют сирены с двумя вращающимися роторами. Динамические сирены позволяют создать большую акустическую мощность (до нескольких киловатт) при высоком КПД (до 20 %). С их помощью возможно в широких пределах регулировать частоту излучения. Однако на практике динамические сирены пока не нашли широкого применения из-за сложности изготовления и эксплуатации.



1 – камера; 2 – ротор; 3 – входной патрубок; 4 – ротор

Рисунок 6.2 – Динамическая сирена

Итак, рассмотрим конкретные химико-технологические процессы.

6.2 Процессы коагуляции аэрозолей

Явление слияния дисперсных частиц носит название коагуляции. В процессе коагуляции частиц можно выделить ряд основных этапов [22]:

- сближение частиц;
- осаждение одних частиц на другие, или образование агрегатов;
- упрочнение образовавшихся агрегатов, или слипаемость частиц;
- осаждение агрегатов.

Сближение частиц может быть вызвано самыми различными причинами (броуновское движение, наличие градиента скорости в движущейся среде, турбулизация потока, электрическое взаимодействие частиц, гидродинамическое взаимодействие и т.д.). В соответствии с этими причинами, коагуляция носит различные названия: броуновская, градиентная, коагуляция в турбулентном потоке и пр. Эти факторы, определяющие начало коагуляции, влияют также на

все последующие этапы процесса. Так, коэффициент инерционного осаждения частиц различен в случаях ламинарного и турбулентного потоков. Поляризирующее действие электрического поля приведет к изменению эффективности соударения частиц. Одним из видов коагуляции является УЗ коагуляция. Существуют два подхода к рассмотрению вопроса об этом виде коагуляции аэрозолей.

Первый подход – рассмотрение различных воздействий УЗ поля на аэрозольные частицы и оценка этих воздействий с точки зрения ускорения процесса. Причем в зависимости от наиболее интенсифицирующего воздействия принимается та или иная гипотеза о механизме процесса. Второй подход заключается в выяснении роли УЗ поля в протекании всех названных стадий коагуляции. Этот подход позволяет определять, за счет чего происходит сближение частиц в звуковом поле, каков в этом случае коэффициент захвата частиц, влияет ли поле на прочность образующихся агрегатов и что способствует осаждению агрегатов.

В настоящее время не существует единой теории УЗ коагуляции аэрозолей. Наиболее известной является теория, разработанная под руководством Л.Д. Розенберга [3]. Смысл этой теории в том, что образование агрегатов в УЗ поле происходит в результате взаимодействия частиц, вызванного акустическими течениями, возникающими вокруг частиц в УЗ поле. Работы по исследованию закономерностей процесса коагуляции аэрозолей и выявлению оптимальных условий протекания процесса легли в основу создания промышленных установок для газоочистки. И хотя теория этого процесса еще полностью не разработана, акустическая коагуляция аэрозолей довольно широко применяется в промышленности. Так, в США основные работы по созданию таких установок проводилась фирмой Ultrasonic Corporation. Впервые акустический метод использовался для очистки газов доменных печей и осаждения других аэрозолей [22]. Установка для коагуляции серной кислоты была построена в Нью-Джерси. Использовался звук частотой 2,25 кГц с интенсивностью 150 дБ. Время озвучивания аэрозоля с частицами радиусом от 0,25 до 2,5 мкм составляло 4 с, причем некоторая часть тумана оставалась на стенках башни, а часть осаждалась в циклоне. В настоящее время акустическая коагуляция находит все более широкое применение, ибо позволяет осаждать высокодисперсные аэрозоли, улавливание которых обычными аппаратами сопряжено со значительными трудностями, а иногда вообще невозможно. Развитие технологии сдерживается практически полным отсутствием оборудования для создания УЗ колебаний высокой интенсивности в газовых средах.

Как известно, многие химические процессы связаны с выбросом в атмосферу значительного количества ценных для производства и вредных для окружающей среды продуктов. Как правило, эти продукты находятся в отходящих газах в виде аэрозольных частиц (дым, туман), трудно улавливаемых в обычных аппаратах, использующих действие силы тяжести, инерции и центро-

бежные силы. Очистке газов, содержащих частицы размером 1–3 мкм (сажа, сернокислый туман), уделяется особое внимание.

Проведенные исследования по воздействию на такие среды УЗ колебаний позволили установить, что они интенсифицируют процесс коагуляции и упрощают очистку газов. Механизм коагуляции до конца не ясен, но очевидно, что основное значение имеет радиационное давление, обеспечивающее интенсивное движение частиц в УЗ поле.

Рассмотрим процесс коагуляции (рисунок 6.3).

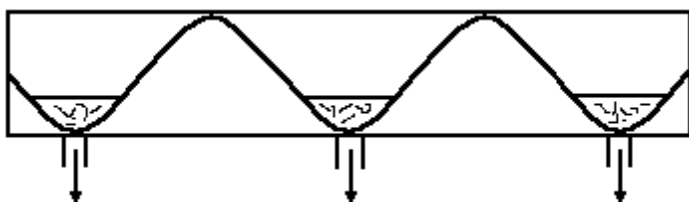


Рисунок 6.3 – Схема процесса коагуляции

Механизмы коагуляции:

1. Радиационное давление на твердые частицы в газовой среде заставляет их двигаться в точки УЗ стоячей волны, соответствующие пучностям. Для наглядности представьте, что туман был распределен равномерно в некотором объеме – трубе. После возбуждения УЗ колебаний твердые частицы скапливаются в точках с минимальным давлением и могут быть оттуда легко удалены.

2. На процесс коагуляции влияет броуновское движение частиц. Если они совершают броуновское движение, то вероятность объединения повышается.

3. На процесс объединения дополнительно влияют акустические течения и виброускорения.

Требования к аппаратуре для коагуляции:

1. Процесс идет эффективно при интенсивностях не ниже 140–150 дБ.

2. Скорость потоков не должна создавать сил, достаточных для разрыва соединившихся частиц.

3. При слишком низкой концентрации коагуляция слаба из-за малого числа соударений.

4. Слишком высокая концентрация требует повышения интенсивности УЗ колебаний из-за сильного их затухания.

5. Учитывая, что скорость коагуляции зависит от размера частиц (крупные частицы коагулируют быстрее), необходимо проводить процесс в несколько стадий, повышая рабочую частоту.

6. После предварительной очистки, когда число частиц значительно уменьшится, необходимо добавлять нейтральный аэрозоль для увеличения числа соударений.

Основные части установок (рисунок 6.4):

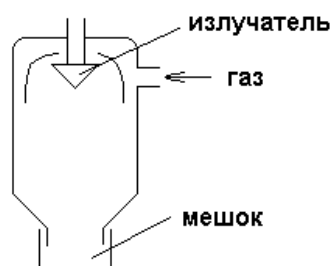


Рисунок 6.4 – Схема установки промышленной коагуляции

источник УЗ колебаний (сирена) и коагуляционная камера – колонна.

Для примера рассмотрим установку для получения сажи из природного газа, сжигаемого с добавлением жидкого топлива.

Через башню, в верхней части которой установлена колонна, проходит 50 – 60 м³ газа в минуту.

$$f = 35 \text{ кГц}; J = 10 \text{ Вт/м}^2 \text{ (160 дБ)}.$$

Коагулирует 90 % содержащихся в газе частиц сажи. Аналогичные установки используются для улавливания частиц тумана серной кислоты. Они имеют следующие характеристики:

Расход газа – 11,4 м³/сек при 52°С.

$J=150 \text{ дБ}, f=2,25 \text{ кГц}$.

Размер частиц – от 0,5 до 5,0 мкм.

Газы вводятся тангенциально в нижнюю часть цилиндрической коагуляционной колонны диаметром 2,4 м и высотой 10,5 м. Улавливается 90 % серной кислоты, половина на внутренних стенках колонны, вторая половина – в дополнительных циклонах. Разработанная и используемая в нашей стране в 60-е годы установка позволяла снизить до 0,07 г/м³ уход серной кислоты в атмосферу (при обычных условиях уходит более 10,7 г/м³).

Где используется коагуляция в промышленности:

- для очистки воздуха в забоях при бурении;
- для улавливания пыли окиси цинка при плавлении лома меди;
- для сепарации конденсата при добыче попутных и природных газов (высококипящие углеводороды);
- для коагуляции пылевидного катализатора.

6.3 Процессы массообмена. Абсорбция

Многие процессы химической технологии основываются на явлении массообмена, происходящем между жидкой и газовой фазами. Одним из таких процессов является абсорбция газа. Кроме того, такие процессы как десорбция, ректификация, адсорбция, катализ или принципиально мало отличаются от абсорбции, или представляют собой процессы, в которых абсорбция является одной из определяющих стадий.

Наложение УЗ колебаний на двухфазную систему, как известно, способствует турбулизации местных потоков, улучшает местное перемешивание и тем самым в значительной степени ускоряет поглощение газов жидкостью.

Первые результаты по интенсификации абсорбции были получены еще в 1956 году в Днепропетровском химико-технологическом институте [22]. В работе исследовалось влияние УЗ с частотой от 1,0 до 1,2 кГц и интенсивностью порядка 30 кВт/м² на процесс абсорбции паров бензола маслом в трех вариантах:

- 1) абсорбция через спокойную поверхность масла при токе газа параллельно поверхности жидкости;
- 2) абсорбция газа перпендикулярно поверхности масла;
- 3) процесс абсорбции путем барботажа.

Получилось, что скорость абсорбции при использовании УЗ для всех трех случаев возрастала от 3 до 10 раз.

На практике установка выполняется следующим образом. В качестве источника УЗ колебаний используется пьезоэлектрический цилиндр. По стенкам пленкой стекает жидкость ($h=0,2-0,3$ см). Вдоль оси продувается газ. Полученные результаты дают не менее чем 4-кратное ускорение процесса абсорбции.

Чем все это объясняется? В пленке жидкости возникает местная турбулизация из-за возникновения кавитации. Кроме того, возникает система поперечных волн, увеличивающая поверхность раздела.

Большой интерес представляют результаты, полученные при барботировании углекислого газа через жидкость. Показано, что при некоторых частотах поглощение газа интенсифицируется даже при очень малых интенсивностях.

Требования к УЗ аппаратуре для абсорбции:

1. Интенсивность не менее 148–157 дБ;
2. Частота 6–20 кГц;
3. Скорость поглощения увеличивается не менее чем в 3 раза.

В качестве источников колебаний используются сирены, работающие без разбавления среды посторонними газами.

6.4 Процессы акустической сушки

Процесс сушки заключается в удалении влаги из материала. Обычно это осуществляется за счет нагревания. Сушка твердых, сыпучих и других материалов распространена в самых разнообразных технологических процессах [21, 27].

В большинстве случаев в качестве теплоносителя используется нагретый воздух. Но при сушке многих химических продуктов, биологических объектов, удобрений, нельзя проводить сушку при повышенных температурах, т.к. вещества либо разлагаются, либо теряют свои бактерицидные свойства.

Когда нельзя допускать повышения температуры при сушке, сушку осуществляют под воздействием УЗ колебаний. Первые результаты были получены еще в 1955 г. П. Грегушем (Венгрия). На частоте 25 кГц он получил 10-кратное ускорение сушки мокрого хлопкового волокна. Позже им же было получено УЗ ускорение сушки древесины.

Процесс сушки состоит из двух основных период. Первый заключается в испарении влаги с поверхности материала и диффузии пара в окружающее пространство. Испарение влаги приводит к тому, что в материале создается градиент влажности, в результате чего влага из внутренних слоев начинает перемещаться на поверхность. Это и есть второй период.

УЗ воздействие высокой интенсивности позволяет интенсифицировать оба периода процесса сушки [27].

В течение первого периода сушки колебания позволяют уменьшить толщину гидродинамического пограничного слоя. В УЗ поле гидродинамический пограничный слой может быть существенно меньше диффузионного. Это значит, что колебания проникают внутрь диффузионного слоя, турбулизируют его, тем самым ускоряют процесс испарения. Наряду с уменьшением толщины пограничного слоя УЗ метод сушки обладает еще одним важным преимуществом – колебания проникают в материал и создают в нем быстро сменяющиеся зоны повышенного и пониженного давления, что интенсифицирует процессы переноса влаги из глубинных слоев к поверхности во втором периоде сушки. Другими действующими факторами УЗ воздействия являются (рисунок 6.5): уменьшение вязкости жидкости под действием колебаний, что способствует переносу влаги из глубинных слоев к поверхности; выдавливание влаги из материала кавитационными пузырьками, возникающими в жидкости под действием колебаний; радиационное давление, выдавливающее жидкость из материала и др.



Рисунок 6.5 – Действующие факторы ультразвуковой сушки

Меньшие энергетические затраты УЗ сушки, по сравнению с конвективной, объясняются тем, что жидкость с поверхности удаляется не только за счет испарения (что требует значительных энергетических затрат на осуществление фазового перехода), но и за счет УЗ распыления в виде аэрозоля (без фазового перехода), который возникает в результате высокоинтенсивных упругих колебаний ультразвуковой частоты.

Поэтому УЗ сушка при сопоставимой мощности энергетического воздействия протекает в несколько раз быстрее по сравнению с конвективной сушкой [3]. Известны запатентованные способы сушки капиллярно-пористых материалов в УЗ полях высокой интенсивности [45], подтвердившие следующие преимущества акустической сушки:

- высокая интенсивность процесса при меньших затратах энергии;
- возможность обеспечения качественной и эффективной сушки при низких температурах или, что принципиально, без повышения температуры.

Таким образом, основными действующими факторами являются:

1. Уменьшение вязкости жидкости под действием УЗ, способствующее ускоренному перемещению влаги по капиллярам из глубины тела на поверхность.
2. Колебание пузырьков газа, находящиеся в жидкости, которые, выдавливают влагу из капилляров.
3. Радиационное давление, направленное в капиллярах из жидкости в газ, которое перемещает столбик жидкости капилляра, перемещая его к поверхности.

Сушка в УЗ поле происходит без нагрева материала. Именно поэтому это единственный способ сушки термочувствительных и легко окисляющихся материалов. Этот способ по скорости отличается от обычных методов. Например, при сушке силикагеля при начальной влажности 25 %, интенсивности излучения в 152 дБ, на частоте 8 кГц, $t=15$ мин происходит полное высушивание. На рисунке 6.6 представлены зависимости по производительности процесса сушки этилцеллюлозы.

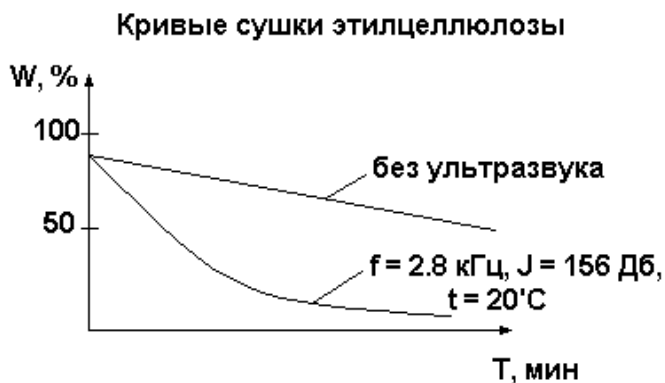


Рисунок 6.6 – Зависимости по производительности процесса сушки этилцеллюлозы

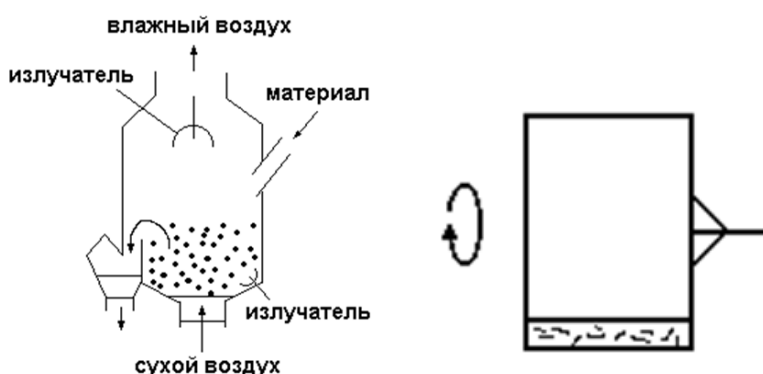
Сравнение с вакуумной сушкой и сушкой нагретым воздухом (92°C): за это же время удалось удалить только 10–15 % содержащейся влаги.

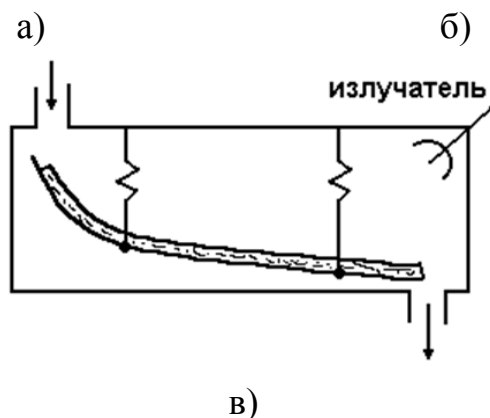
При сушке ферментов (не выдерживающих 40°C) процесс в акустическом поле занял 14 мин и скорость в сравнении с вакуумным методом повысилась в 3–4 раза.

Особенности акустической сушки (требования к аппаратуре):

1. Существует нижняя граница интенсивности, при которой начинается заметное ускорение процесса (порядка 130–145 дБ).
2. Нет зависимости скорости сушки от частоты в диапазоне от 2 до 25 кГц.
3. Наиболее эффективна сушка для тонких слоев (порядка 2–3 см).

Рассмотрим практические схемы сушилок (рисунок 6.7).





- а) – сушилка с кипящим слоем; б) – сушилка барабанного типа;
в) – сушилка вибрационная

Рисунок 6.7 – Практические схемы сушилок

Основные – это звукофицированные сушилки с кипящим слоем для сушки порошкообразных веществ, сушилки барабанные и вибрационные.

Рассмотрим конструкцию сушилки с кипящим слоем. В вертикальном цилиндре в боковой и верхней части установлены излучатели.

Через питатель материал загружается в сушилку на колосниковую решетку. Воздух для сушки подается снизу через распределительную сетку. При прохождении воздуха через сетку и материал он начинает интенсивно перемешиваться, «кипеть», образуя псевдосжиженный слой. Постоянно перемешиваемый материал подвергается воздействию УЗК и сушится.

По мере высыхания частицы становятся легче, поднимаются по верхней перегородке и сыплются в бункер. Удаление влажного воздуха производится через верхний патрубок.

6.5 Процессы горения

В химической технологии процессы горения имеют самые различные назначения [4]. В частности, выделим два основных процесса:

1. Сжигание топлива с целью получения необходимого количества тепла для проведения химических процессов;
2. Сжигание продуктов с целью получения веществ, необходимых для дальнейшей переработки.

Иногда эти процессы протекают совместно. Интенсификация процессов горения является очень важной задачей, т.к. позволяет увеличить КПД и уменьшить размеры устройств для сжигания, сэкономить топливо, увеличить выход условного продукта.

Как известно, при горении происходят следующие основные процессы:

- прогрев частиц горючего вещества до начала испарения;
- испарение горючего вещества;

- горение, связанное с транспортированием кислорода к горючему и окисление последнего.

Два первых процесса протекают в гетерогенной системе: газ–твердое вещество, газ–жидкость (кроме горения газа). Третий процесс протекает в гомогенной газовой среде. Практически все три процесса протекают одновременно. Применение УЗ колебаний основано на турбулизации факела горения и прилегающей к нему области с помощью УЗК. При этом возможно воздействие как на сами частицы, так и на окружающую среду.

Возникновение высокочастотных турбулентных пульсаций в топочной камере под воздействием акустического поля связано с появлением поверхностных волн на плоском фронте пламени, представляющем собой своеобразную поверхность разрыва.

При горении нет предварительно подготовленной смеси и струя горючего подается в топочную камеру, наполненную окислителем (воздухом). В этом случае отсутствует четко выраженный фронт горения, а воспламенение происходит в области соприкосновения потока горючего с окислителем. Скорость горения при этом зависит от скорости перемешивания горючего с окислителем.

Воздействие акустических колебаний резко меняет характер горения диффузионного факела. Во-первых, сильно сокращается длина «холодного» ядра, и зона воспламенения приближается к горелке; во-вторых, резко возрастает градиент температур в зоне горения; в-третьих, примерно в четыре раза увеличивается глубина выгорания топлива.

Изменение характера горения объясняется возникновением турбулентных вихрей в связи с сильным затуханием и рассеиванием акустических колебаний на границе раздела сред. Однако для эффективного воздействия акустических колебаний на процесс горения необходимо подбирать частоту и интенсивность акустических колебаний.

Частоту акустических колебаний можно подбирать, исходя из того, что при движении струи газа воздействие акустических колебаний приводит к увеличению неустойчивости струи и появлению вихрей.

Механизм ускорения процессов заключается в том, что малые частицы колеблются в фазе и с амплитудой среды. Крупные отстают от колебаний среды и вокруг них образуются гидравлические потоки, т.е. сложные вихревые движения. Они и определяют интенсификацию процесса горения. Расчеты и опыты показывают, что для создания потоков вокруг частиц необходима интенсивность порядка 145–155 дБ.

УЗ устройства, вмонтированные в камеры сгорания, позволяют интенсифицировать процесс горения жидкого топлива до эффективности сжигания газообразного топлива.

УЗ аппараты и устройства для ускорения химических реакций, связанных с горением

Воздействие осуществляется либо в специальных резонансных камерах-топках, либо в топках с акустическими форсунками. Акустическая камера сгорания представляет собой емкость, в которую подается сжигаемый материал и одновременно создаются колебания. Источником УЗ колебаний служат свистки-сирены, монтируемые в стенках камеры. Воздух, питающий свистки, является одновременно и окислителем. Частота колебаний выбирается соответствующей резонансной частоте камеры.

Акустические форсунки представляют собой статические сирены (рисунок 6.8), в которые одновременно с окислителем (воздухом) в область формирования УЗ колебаний через трубку подается топливо.

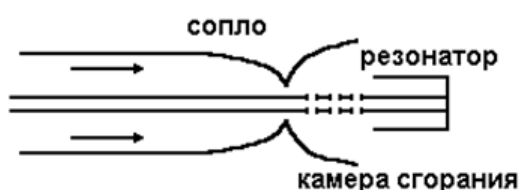


Рисунок 6.8 – Статическая сирена для процессов горения

Таким образом, интенсифицируется процесс горения жидкого топлива при выплавке чугуна ($f = 4$ кГц, $J = 150$ Дб).

Количество СО в отходящих газах < 1 %.

6.6 Процессы пеногашения

Это одна из новых областей применения УЗ колебаний. Во многих процессах химической технологии происходит пенообразование. Образующаяся пена препятствует полной загрузке аппаратов, усложняет дозировку, приводит к уносу ценных продуктов и т.д. Введение химических пеноразрушителей типа ПАВ или растекающихся по поверхности масел бывает очень эффективно, но не всегда допустимо по условиям технологического процесса.

Известно, что пена представляет собой дисперсную систему, состоящую из ячеек – пузырьков газа, разделенных пленками жидкости. Структура пен определяется соотношением объемов газовой и жидкой фаз, и в зависимости от этого соотношения ячейки пены могут иметь сферическую или многогранную форму. Сферической формы ячейки бывают в том случае, когда объем газовой фазы превышает объем жидкости не более чем в 10–20 раз. В таких пенах пленки жидкости между пузырьками имеют относительно большую толщину. В тех случаях, когда объем газовой фазы превышает объем жидкости в сотни раз, пузырьки в пене имеют многогранную (полиэдрическую) форму. В зависимости от соотношения жидкой и газовой фаз плотность пены может колебаться от 0,5 плотности жидкости до значений, близких к нулю [5]. Особенно-

сти пен, отличающие их от жидкости (сохранение формы, отсутствие растекания), позволяют рассматривать их как структурированные системы, обладающие свойствами твердого тела. Следует отметить тот факт, что чистые жидкости не способны образовывать сколько-нибудь устойчивую пену. Для получения устойчивой пены в жидкой фазе должен быть растворен хотя бы один поверхностно-активный компонент – пенообразователь, адсорбирующийся на межфазной поверхности раздела раствор–газ. Стабильность или устойчивость пены характеризуется продолжительностью существования всего ее объема. По стабильности пену можно условно разбить на два типа. К первому относятся пены, у которых пенообразователь в растворе и в адсорбированном слое находится в молекулярно-дисперсном состоянии. Такие пены быстро распадаются по мере истечения межпленочной жидкости, и борьба с ними не представляет никакой трудности. Ко второму типу относятся пены, у которых пенообразователь образует в растворе коллоидную систему. Эти пены обладают большой стойкостью, так как истечение межпленочной жидкости в определенный момент времени прекращается, а пенный каркас может сохраниться длительное время. Такие системы имеют потенциальный энергетический барьер, противодействующий разрушению и обеспечивающий состояние равновесия системы.

УЗ колебания используют для разрушения пен только второго типа [7]. При этом оказывается экономически целесообразным разрушение этих пен на так называемой сухой стадии. «Сухие» пены образуются по окончании истечения межпленочной жидкости из пен второго типа. Истечение жидкости из пены происходит по так называемым каналам Плато под влиянием сил тяжести и капиллярных сил всасывания. Истечение заканчивается, когда вся излишняя жидкость удалена, и абсорбционные сольватированные слои пленок соединятся. Разрушение пены в УЗ поле происходит в результате пульсации пузырьков пены и воздействия на их поверхность турбулентных вихрей, вызываемых акустическими течениями. Механизм разрушения пузырька пены можно представить следующим образом [7]. При пульсации пузырька под действием колебаний в фазе расширения увеличивается поверхность раздела фаз и толщина пленки на поверхности пузырька уменьшается. Акустическая турбулентность способствует тому, что утончение пленки происходит неравномерно по всей поверхности пузырька, в каком-то месте толщина поверхности становится критической и в ней образуется круглое отверстие. В результате расширения этого отверстия распространяется круговая волна. Скорость ее распространения, а следовательно, и скорость разрушения пузырька высока.

В последние годы эффективно используют УЗ колебания диапазона до 35 кГц. В основном здесь используются газоструйные излучатели. Результаты исследований показывают, что поверхность пенообразующей жидкости можно удержать без пены, если ее озвучивать при $f = 6\text{--}11$ кГц и $J = 147\text{--}148$ дБ.

Примеры:

- обеспенивание топлива реактивных самолетов при быстром подъеме; количество пены, разрушенной УЗ, составляет от 20 до 60 л/мин;
- разрушение бродильной пены (скорость образования пены без УЗ составляла 40 л/мин). Мощность излучателя ~ 60–100 Вт при интенсивности ~ 143 дБ.

Механизм пеногашения:

1. Нарушение целостности пузырьков вследствие изменяющегося давления;
2. Резонанс при совпадении собственных частот с частотой УЗ поля;
3. Вихревое движение у поверхности пены.

Применение мощной низкочастотной сирены позволяет успешно бороться с пенообразованием на большой площади (до 2 м²). Для каждой пены существует оптимальная частота, зависящая от геометрических размеров пузырька и свойств пенообразующей жидкости.

Несмотря на высокую эффективность УЗ пеногашения, оно имеет два основных недостатка. Наиболее существенным недостатком такого гашения пены является сравнительно большие затраты энергии, вызванные несовершенством конструкции излучателей УЗ колебаний. Вторым менее существенным недостатком является необходимость тщательной звукоизоляции аппаратов. Этот недостаток сегодня достаточно просто устраняем, благодаря наличию эффективных звукопоглощающих материалов. Даже несмотря на то, что расход энергии при УЗ гашении пены оказывается сравнимым с расходом энергии при ее механическом разрушении, часто применение УЗ гашения пены оказывается более целесообразным по конструктивным соображениям.

6.7 Ультразвуковые аппараты и оборудование для ускорения процессов в газовых средах

Для воздействия на газовые среды высокоинтенсивными УЗ колебаниями (до 200 дБ) созданы аппараты (рисунок 6.9), предназначенные для бесконтактной сушки материалов, коагуляции аэрозолей, гашения пен [31].



а) аппарат «Соловей»
УЗАГС-0,3/22-О

б) аппарат «Соловей»
УЗАГС-0,4/22-О

Рисунок 6.9 – Ультразвуковые аппараты для воздействия на газовые среды

Колебательная система оснащена фазовыравнивающим дисковым излучателем и дисковым излучателем с преимущественным направлением излучения, позволяющими воздействовать на газовые среды на частоте $22 \pm 1,65$ кГц.

Основные технические характеристики серии ультразвуковых аппаратов приведены в таблице 6.1.

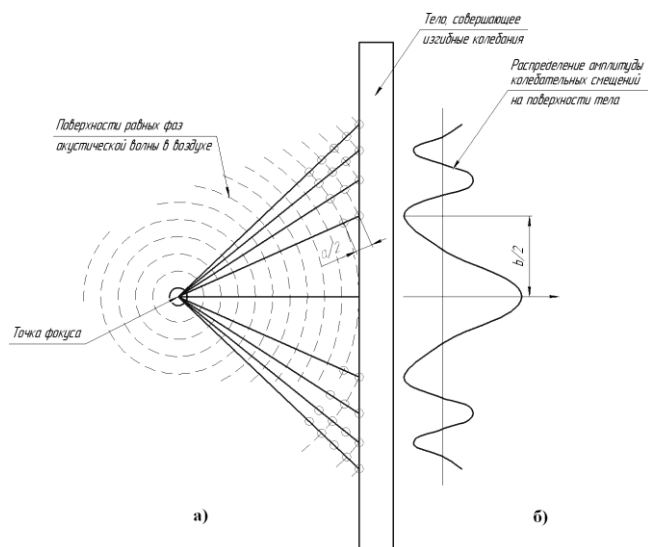
Таблица 6.1 – Основные технические характеристики

Модель	УЗАГС-0,3/22-О	УЗАГС-0,4/22-О
Мощность, ВА	300	400
Диаметр излучателя, мм	340	340
Интенсивность колебаний (1 м), дБ	до 175	до 180

6.8 Ультразвуковые колебательные системы для ускорения процессов в газовых средах

Известно, что для реализации процессов в газовых средах (сушки, пеногашения и др.) необходимо обеспечить ультразвуковое воздействие с интенсивностью более 130–140 дБ [7]. Различие акустических сопротивлений металлов и воздуха не позволяет создавать в воздухе плоские или сферические волны с уровнем звукового давления свыше 115–125 дБ с помощью описанных ранее излучателей. Одним из известных способов создания в воздушной среде акустических колебаний с уровнем звукового давления более 130–140 дБ [7] при использовании пьезоэлектрических излучателей является фокусировка (концентрирование) менее интенсивных колебаний на локализованном участке. Для фокусировки акустических колебаний в воздушной среде используются зеркальные, линзовые или фазированные системы. Последние представляют наибольший интерес, поскольку имеют простую конструкцию и небольшие габариты. Принцип работы такого излучателя показан на рисунке 6.10.

Поверхность твердого тела (пластины) совершает изгибные колебания, причем распределение амплитуд колебательных смещений вдоль радиуса пластины имеет вид стоячих волн. Каждая точка колеблющейся поверхности излучает в воздушную среду акустическую волну. Уровень звукового давления в фокусе превышает 200 дБ, а вокруг фокуса образуются поверхности равных фаз, где уровень давления превышает 130–150 дБ.



а) – длина акустической волны в воздушной среде;

б) – волны изгибных колебаний в твердом теле

Рисунок 6.10 – Схематичное изображение, поясняющее принцип работы фазированного фокусирующего излучателя

Для реализации активного акустического воздействия на газовые среды был спроектирован новый тип излучателя [31], реализующего указанный выше принцип. Внешний вид излучателя показан на рисунке 6.11.



а)

б)

в)

1 – диск; 2 – фазовыравнивающие канавки; 3 – колебательная система

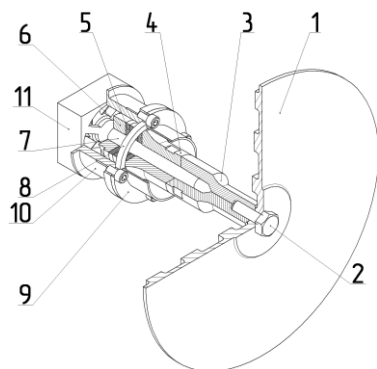
а) – вид со стороны колебательной системы; б)

– вид сбоку;

в) – вид на излучающую поверхность

Рисунок 6.11 – Пьезоэлектрический излучатель

На рисунке 6.12 показана конструкция излучателя, включающего в себя полуволновую одноэлементную УЗКС с полуволновым концентратором и излучающий диск с преимущественным излучением одной фазы колебаний.



1 – излучающий диск; 2 – болт; 3 – дополнительный концентратор;
 4 – основной концентратор; 5 – пьезоэлектрические элементы; 6 – задняя частотопонижающая накладка; 7 – шпилька; 8 – кольцо акустической развязки; 9 – фланец корпуса; 10 – корпус; 11 – вентилятор

Рисунок 6.12 – Конструктивное исполнение излучателя ультразвуковой колебательной системы

Акустическая связь внутри УЗКС обеспечивается за счет того, что основной концентратор 4 и пьезоэлектрические элементы 5 зажаты между дополнительным концентратором 3 и задней частотопонижающей накладкой 6 с силой, многократно превышающей величину знакопеременной силы, создаваемой пьезоэлектрическими элементами. Стягивающее усилие обеспечивается шпилькой 7. Акустическая связь дополнительного концентратора 3 и диска 1 обеспечивается за счет болта 2, ввернутого в резьбовое отверстие в дополнительном концентраторе. В корпусе УЗКС закрепляется через кольцо акустической развязки 8, зажатое в зазоре между фланцем 9 и корпусом 10. Охлаждение пьезоэлементов осуществляется воздушным потоком от вентилятора. Предельная входная электрическая мощность такой конструкции составляет 450 Вт.

В последнее время были разработаны специализированные технологические объемы для ультразвуковых дисковых излучателей. Отдельным типом технологических объемов являются объемы для осуществления технологических процессов в воздушных средах. Излучение УЗ колебаний в воздушную среду через нерезонансные газовые промежутки характеризуется малым выходом энергии и высоким затуханием колебаний. Поэтому при реализации технологических процессов в воздушных средах создание технологических объемов, оптимизирующих УЗ воздействие, является первоочередной задачей. Одним из вариантов объема для реализации процессов в воздушных средах (например, процессов акустической сушки) может служить вращающийся технологический объем цилиндрической формы [5] с дисковым ультразвуковым излучателем, показанный на рисунке 6.13.

Технологический объем состоит из корпуса 1, покрытого с внутренней стороны звукоизолирующим материалом, внешнего барабана 2, с наружной стороны также покрытого звукоизолирующим материалом, рабочего барабана 3, предназначенного для загрузки высушиваемого материала, закрепленного на валу 5. Вал 5 выполняется пустотелым, внутри него устанавливается колебательная система 8 и закрепляется в нем с помощью узла акустической развязки и муфты 9. Вал 5 вращается в подшипниках 7, установленных в задней стенке 6. Привод рабочего барабана 3 осуществляется двигателем, статор 10 которого закреплен на задней стенке внешнего барабана, а ротор 11 на валу 5.

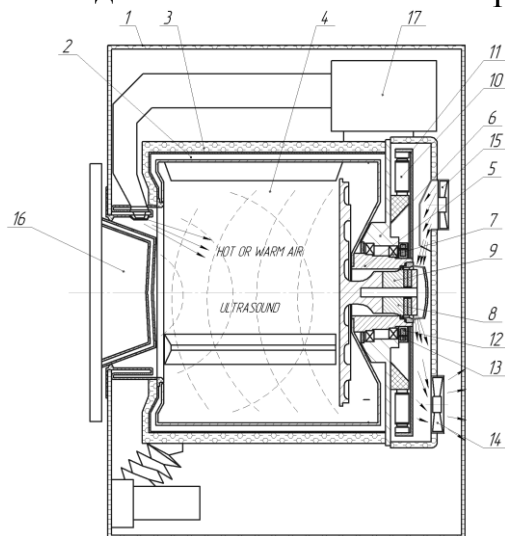


Рисунок 6.13 – Технологический объем для осуществления ультразвукового воздействия на газовые среды

Для передачи энергии электрических колебаний ультразвуковой частоты на электроды вращающейся колебательной системы целесообразно применить вращающийся трансформатор, статор 13 которого также закрепляется на задней стенке внешнего барабана 6, а ротор 12 – на валу 5. Двигатель и задняя часть системы закрываются звукопоглощающим кожухом, а их охлаждение осуществляется вентиляторами 14 и 15. В связи с тем, что на фронтальную дверцу 16 падает значительная доля акустического излучения, необходимо принимать меры по ее звукоизоляции, например, изготавливать дверцы из двух слоев стекла с вакуумным промежутком между ними. Конструкция конвектора 17 аналогична конструкциям, используемым в сушильных камерах [5]. Для осуществления процесса УЗ сушки в описанном технологическом объеме необходимо обеспечивать интенсивность колебаний не менее 160 дБ. Для повышения эффективности процесса акустической сушки капиллярно-пористых материалов и снижения требуемых энергетических затрат был разработан технологический объем [5], показанный на рисунке 6.14. Технологический объем состоит из верхней 2 и нижней 3 половин, представляющих собой объемную фигуру, имеющую в сечении два одинаковых эллипса 1, пересекающихся таким

образом, что сечения совпадают по одному из фокусов. УЗКС 5 установлена таким образом, что излучатель находится в общем для двух эллипсов фокусе.

Объем с высушиваемым материалом 4 размещают в области вторых фокусов большего объема 1 сушильной камеры. Объем 4 для высушиваемого материала выполнен в форме тороида. В процессе реализации процесса обеспечивается периодическая герметизация или проницаемость стенок этого технологического объема 4, выполненного в форме тороида, при помощи воздухопроводов 6 и 7. Использование сушильной камеры подобной формы позволяет, с одной стороны, сконцентрировать колебания на высушиваемом материале за счет многократных отражений внутри объема и фокусировки, с другой стороны, исключить необходимость перемешивания материала в силу того, что объект сушки находится в зоне облучения акустическими колебаниями со всех сторон.

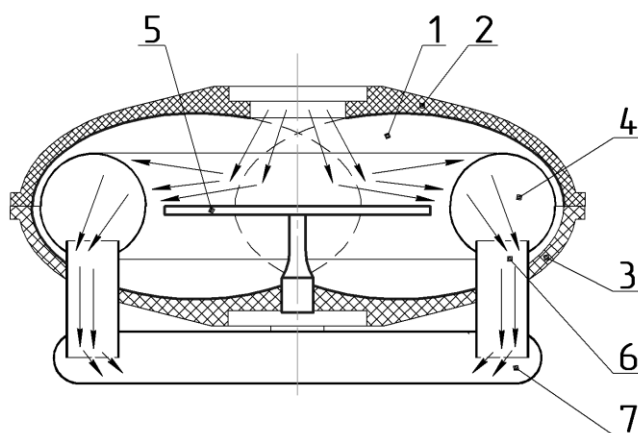


Рисунок 6.14 – Схематичное изображение технологического объема для сушки капиллярно-пористых материалов

Применение разработанного технологического объема позволяет снизить нижнюю границу диапазона выбираемой мощности колебаний до 120 дБ. Снижение необходимой мощности УЗ колебаний стало возможным благодаря оптимальной форме сушильной камеры, в которой высушиваемый материал располагается в области наивысшей концентрации звуковой энергии, и как следствие, мощность воздействия на материал значительно превышает необходимую пороговую отметку и при меньших значениях мощности излучателя.

7 ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ЖИВЫЕ СИСТЕМЫ

7.1 Ультразвук и биологические системы

Как было показано в предыдущих разделах, при распространении интенсивных ультразвуковых колебаний (интенсивностью более $1\text{--}2 \text{ Вт/см}^2$) в жидкости наблюдается обусловленный ультразвуковым давлением эффект, называемый ультразвуковой кавитацией. Кавитационные пузырьки совершают пульсирующие колебания, приводящие к активной локальной турбулизации среды. После кратковременного существования часть пузырьков захлопывается. При этом наблюдаются локальные мгновенные давления, достигающие сотен и тысяч атмосфер. При захлопывании кавитационных пузырьков наблюдаются также локальные повышения температуры и электрические разряды. Интенсивность, соответствующая порогу кавитации, зависит от рода жидкости, частоты звука, температуры и других факторов. В воде на частоте 20 кГц она составляет около $0,3\text{--}1 \text{ Вт/см}^2$.

Выявлено, что в диапазоне частот $(5\text{--}10)\times 10^3$ Гц отмечаются такие физико-химические явления, как разделение молекул и ионов с различной массой, искажение формы волны, появление переменного электрического поля, капиллярно-акустического и теплового эффекта, активация диффузии. Здесь проявляются сопутствующие эффекты, влияющие на процессы экстракции из лекарственного, растительного и животного сырья, наблюдается усиление процессов гиперfiltrации, проницаемости клеточных мембран, становятся возможными стерилизация термолабильных веществ, фонофорез, получение концентрированных ингаляционных аэрозолей.

Как известно, механическое действие ультразвука приводит к размельчению и диспергированию частиц. Механически работа ультразвука усиливает диффузию растворителей в биологические ткани.

Физико-химическое действие ультразвука на биологические объекты, прежде всего, связано с морфологией их поверхности. Ультразвук усиливает в тканях проницаемость клеточных мембран и диффузные процессы, изменяет концентрацию водородных ионов в тканях, вызывает расщепление высокомолекулярных соединений, ускоряет обмен веществ. При умеренной и небольшой интенсивности ультразвука в живых тканях явления кавитации практически не выражены и наблюдается лишь пульсация естественных пузырьков в биологических жидкостях и усиление внутриклеточных и внеклеточных микропотоков жидкости, прекращающихся при отключении генератора ультразвука.

Помимо освобождения механической энергии, образование кавитационных полостей сопровождается возникновением электрических зарядов на пограничных поверхностях, вызывающих люминесцентное свечение и ионизацию молекул воды, распадающихся на свободные гидроксильные радикалы и атомарный водород ($\text{H}_2\text{O} = \text{HO} + \text{H}$).

В химическом отношении продукты распада ионизированных молекул воды в тканях организма крайне активны. Именно их большой активностью обусловлен ряд общебиологических эффектов, проявляющихся под влиянием ультразвука [20].

Ультразвук изменяет скорость процессов на границе газ–жидкость. Действие ультразвука повышает растворимость азота в воде на 12 %. И в то же время ультразвуковое облучение растворов приводит к их дегазации.

Тепловое действие ультразвука происходит вследствие превращения акустической энергии в тепловую в результате поглощения ультразвука. Кроме того, образование тепла обусловлено физическими явлениями, вызываемыми так называемый эффект пограничных поверхностей. Сущность его заключается в усилении действия ультразвука на границе разделения двух сред. Особенно это сказывается на тепловом эффекте, который может усиливаться в несколько раз.

Биологическое действие ультразвука на клетки и ткани определяется главным образом интенсивностью ультразвука и длительностью облучения и может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на жизнедеятельность организмов [19]. Так, возникающие при сравнительно небольших интенсивностях ультразвука (до 1–2 Вт/см²) механические колебания частиц производят своеобразный микромассаж тканей, способствующий лучшему обмену веществ и лучшему снабжению тканей кровью и лимфой. Повышение интенсивности ультразвука может привести к возникновению в биологических средах акустической кавитации, сопровождающейся механическим разрушением клеток и тканей (кавитационными зародышами служат имеющиеся в биологических средах газовые пузырьки). Однако более интенсивные и длительные воздействия могут привести к перегреву биологических структур и их разрушению (денатурация белков и др.).

Первичный эффект действия ультразвука проявляется влиянием на тканевые и внутриклеточные процессы; изменением процессов диффузии и осмоса, проницаемости клеточных мембран, интенсивности протекания ферментативных процессов, окисления, кислотно-щелочного равновесия, электрической активности клетки. В тканях под действием ультразвука активируются обменные процессы, увеличивается содержание нуклеиновых кислот и стимулируются процессы тканевого дыхания. Под влиянием ультразвука повышается проницаемость стенок сосудов.

В основе биологического действия ультразвука могут лежать также вторичные физико-химические эффекты. Так, при образовании акустических потоков может происходить перемешивание внутриклеточных структур. Кавитация приводит к разрыву молекулярных связей в биополимерах и других жизненно важных соединениях и к развитию окислительно-восстановительных реакций. Ультразвук повышает проницаемость биологических мембран, вследствие чего происходит ускорение процессов обмена веществ из-за диффузии. Все

перечисленные факторы в реальных условиях действуют на биологические объекты в том или ином сочетании совместно, и поэтому трудно, а подчас невозможно раздельно исследовать процессы, имеющие различную физическую природу.

В настоящее время ультразвук – один из методов интенсификации биокатализа. Ультразвуковое облучение ассоциируется с повреждением клеток, но доказаны и благотворные последствия озвучивания на усиление биокатализа и жизнедеятельность живых клеток.

Окисление холестерина клетками *Rhodococcus erythropolis*, дегидрогенирование кортизола неподвижными клетками *Arthrobacter* было исследовано при ультразвуковом воздействии на частоте 20 кГц. Значительное повышение скорости биотрансформации наблюдалось при облучении клеток в течение 5 секунд каждые 10 минут мощностью

2,2 Вт/см². Ультразвук повышал массобмен через клеточные мембраны.

Кавитация в суспензиях клеток. При повышении интенсивности ультразвука до значений, когда в среде возникают механические усилия, сравнимые с прочностью клеточных мембран, начинается процесс разрушения клеток. Эффект наблюдается, если амплитуда пульсации пузырьков возрастает до определенной величины. Величина эта различна для разных клеток, зависит от их формы и размера, а также прочности цитоплазмической мембраны и наличия цитоскелета.

Ультразвуковая дезинтеграция клеток получила широкое применение в биотехнологии, в биохимических и вирусологических исследованиях для выделения отдельных веществ и фрагментов клеток, а также в лабораторной диагностике для определения механической резистентности клеточных мембран.

Воздействие ультразвука на белки. Известно, что в ультразвуковом поле происходит изменение структуры, формы и функции молекулы белка. Направление этих изменений зависит от строения белковых и концевых групп белка и свойств газа, содержащегося в водном растворе.

Установлено, что эффект воздействия ультразвука на биомакромолекулы (нуклеопротеиды, нуклеиновые кислоты, липопротеиды и другие) зависит от природы газа, присутствующего в озвучиваемом растворе исследуемых веществ. В присутствии кислорода происходит процесс дегградации биомакромолекул, вызывающий угнетение их биокаталитической активности. Данные процессы сопровождаются снижением вязкости растворов этих веществ. В присутствии водорода наблюдается увеличение молекулярной массы биомакромолекул при сохранении их нативных свойств, в частности таких белков, как сывороточный альбумин, трипсин и пепсин.

Воздействие ультразвука на ферменты. Выявлено, что изменения ферментов при ультразвуковом облучении обусловлены не только структурой этих белков, но и природой присутствующего газа. В связи с этим ультразвук не всегда оказывает на них инактивирующее действие. Инактивация ферментов при

озвучивании наблюдается в том случае, если этот процесс происходит в присутствии кислорода; в среде, насыщенной водородом, инактивация не происходит. Это установлено при ультразвуковой обработке таких ферментов, как трипсин, пепсин, тирозиназа и других. Некоторые ферменты, например каталаза, вообще не инактивируются ультразвуком. Оксидазы более чувствительны к воздействию ультразвука, в то время как редуктазы, каталазы и амилазы обладают достаточной устойчивостью.

Стерилизующий эффект ультразвука обусловлен разрушающим воздействием ультразвуковых колебаний на микроорганизмы, что позволило использовать ультразвук для стерилизации и дезинфекции. Так, например, стерилизация молока при озвучивании в течение 15–60 секунд задерживает его скисание на 5 суток, при этом витамины в молоке сохраняются. В 1 см³ молока, стерилизованного ультразвуком, содержится в среднем 18 КОЕ, в то время как после обычной пастеризации в течение 1 часа в 1 см³ его остается около 3000 КОЕ.

Механизм стерилизующего действия ультразвука весьма сложен и раскрыт не полностью. Очевидно, кавитация является ведущим фактором. Явление кавитации возникает в первую очередь там, где прочность жидкости наименьшая, т.е. на границе раздела сред клетка–жидкость. При образовании на поверхности клетки кавитационного пузырька в момент его уменьшения происходит как бы втягивание структуры стенки в полость каверны. В последующей фазе при захлопывании каверны возникает мощный гидродинамический удар, достигающий десятков МПа.

Выявлены положительные результаты дезинфекции воды посредством ультразвуковых колебаний; в течение 5 минут удается достигнуть полной стерилизации воды без применения каких-либо химических реагентов. Отмечается также положительный эффект применения ультразвуковых колебаний для стерилизации консервов и соков.

Выяснено, что при действии ультразвука повышается чувствительность микроорганизмов к дезинфицирующим веществам. Стерилизующий эффект при обработке водных взвесей бактерий кишечной палочки (*Escherichia coli*), которые предварительно подвергались действию ультразвука, был достигнут при значительно меньших концентрациях хлора, формалина и других дезинфицирующих веществ. Это обусловлено изменением («расшатыванием») макромолекулярных структур, входящих в состав оболочки озвучиваемых микроорганизмов, что приводит к нарушению проницаемости оболочек и мембран живых клеток.

Почти все микроскопические растения и организмы погибают, если подвергнуть их действию ультразвука высокой интенсивности. Этот факт в настоящее время рассматривается как альтернативный, безопасный путь к очищению воды и продуктов питания.

Разрушаются ультразвуком кишечная (*Escherichia coli*), брюшнотифозная (*Salmonella typhi*), дифтерийная (*Corynebacterium diphtheriae*), сенная (*Bacillus*

subtilis) палочки, столбняка (*Tetanus bacillus*), сальмонеллы (*Salmonella*), кокки (*Staphylococcus*), трипаносомы (*Trypanosoma bacillus*), трихомонады (*Trichomonas*), возбудитель тифа (*Typhus recurrens*) и др. Ультразвук высокой интенсивности оказывает разрушающее действие на вирусы табачной мозаики (*Tobacco mosaic virus*), энцефалита (*Encephalitis virus*), сыпнотифозные, гриппа (*Influentia*). Бактериофаги больших размеров также чувствительны к действию ультразвука. Из патогенных микроорганизмов наибольшую устойчивость к воздействию ультразвука проявляют различные штаммы туберкулезных палочек (*Tuberculum bacillus*).

Стерилизующее действие ультразвука на микроорганизмы проявляется на частотах 20 кГц и выше, при интенсивности более 0,5 Вт/см² в кавитационном режиме облучения.

Применение ультразвука возможно для стерилизации лекарственных препаратов, приготовленных как в заводских, так и в аптечных условиях. В аптечных условиях, применяя ультразвук частотой до 490 кГц и интенсивностью до 20 Вт/см² в течение 5 минут, достигали полной стерилизации глазных капель: 0,25 %-ного раствора сульфата цинка, 1%-ных растворов дионина, платифиллина гидротартрата, солянокислого пилокарпина. Анализ приготовленных растворов показал сохранение подлинности и количественного содержания лекарственных веществ в растворах до и после ультразвукового воздействия.

Известно, что высокую степень микробной обсемененности имеет лекарственное сырье, в особенности растительное. Поэтому настои, отвары и слизи в аптеках сохраняются не более 2 суток, так как после этого срока может бурно развиваться микрофлора. Ультразвук определенных частот и интенсивности вызывает эмульгирование двух несмешивающихся жидкостей и одновременно стерилизацию обращенных эмульсий. Если же возникает необходимость простерилизовать готовые эмульсии ультразвуком, то экспозицию озвучивания по сравнению с озвучиванием суспензии следует уменьшить до 5–10 мин при интенсивности до 5–10 Вт/см² независимо от частоты ультразвука. Одновременное использование антисептиков и ультразвуковой обработки позволяет снизить концентрацию антисептиков в 10–50 раз в лекарственных формах.

В настоящее время делаются попытки стерилизации большой группы жидких лекарственных форм с помощью ультразвука различных частот и интенсивности в сочетании с некоторыми антимикробными препаратами. Ионы серебра, меди, цинка, находящиеся в растворе в концентрациях, не поддающихся количественному определению («следы»), в комбинации с ультразвуком (интенсивностью 0,3–0,5 Вт/см², временем облучения 15–30 мин) проявляют олигодинамическое воздействие на всю микрофлору, которая находится в лекарственной форме. Активность ионов металлов в отношении, например, грибов снижается в ряду Ag^+ , Hg^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} . Соли тяжелых металлов в большой концентрации коагулируют белки, в малых – являются блокаторами меркаптогрупп.

При ультразвуковой обработке водных суспензий микобактерий частотой 20 кГц, происходит разрушение 93 % микобактерий, а при высокочастотном ультразвуковом воздействии (612 кГц) – 35,5 %.

Ультразвуковой капиллярный эффект – явление увеличения глубины и скорости проникновения жидкости в капиллярные каналы под действием ультразвука (по сравнению с глубиной и скоростью, обусловленных только капиллярными силами). Открытие ультразвукового капиллярного эффекта принадлежит белорусскому ученому академику Е.Г. Коновалову (1961) [46, 47]. В его эксперименте использовались стеклянные трубки с диаметром 2 мм, имевшие входной рупор. При нормальном падении волн на отверстие рупора в трубке наблюдался дополнительный подъем уровня жидкости (сверх высоты капиллярного уровня), пропорциональный силе звука. В серии работ Е.Г. Коновалова обнаружено, что дополнительный подъем под действием ультразвука линейно растет при повышении температуры и увеличении диаметра. Максимальная высота и скорость подъема наблюдались при контакте капилляров с поверхностью излучателя. Исследования позволили полагать, что ультразвуковой капиллярный эффект обусловлен ударами кумулятивных струй или в упрощенном варианте давлением, возникающим при захлопывании кавитационных пузырьков около устья капилляра. Подобно ультразвуковому капиллярному эффекту известно явление «обратного» ультразвукового капиллярного эффекта, нашедшего широкое применение, в том числе и в медицине (Педдер В.В, 2009) [49].

Влияние ультразвука на развитие черенков. В Ботаническом саду Одесского университета изучали влияние ультразвуковых колебаний на возможность ускорения корнеобразования и увеличения выхода укорененных черенков роз (*Rosa L.*) [48]. Черенки нарезали из средней части однолетних полуодревесневших побегов. Связанные в пучки черенки помещали в ванну, дном которой служила излучающая пластинка, после чего ванну заполняли водой. Опытные черенки озвучивали в течение 15, 30, 45 секунд, 1, 3, 5, 12 и 20 минут при интенсивности 1 Вт/см² и частоте колебаний 22 кГц, контрольные – выдерживали в водной среде. Для укоренения использовали смесь листовой земли, чернозема и речного песка в соотношении 2:2:1. Результаты опыта показали, что у всех сортов обработка в течение трех минут увеличивает укореняемость и ускоряет корнеобразование. Срок укоренения черенков в опыте составил 15 дней, в контроле 28 дней. Под действием ультразвука интенсивность транспирации у опытных растений по сравнению с контролем увеличивалась на 20–25 %. Применение ультразвука позволяет проводить черенкование без специальных туманообразующих установок 2–3 раза в год.

7.2 Предпосевная обработка семян

Для обеспечения высокого урожая необходим высококачественный поса-

дочный материал с высоким процентом всхожести. Для этого семена перед посадкой подвергают предварительной обработке (замачивание, протравливание и т.д.). Предпосевная обработка семян позволяет интенсифицировать процесс прорастания, уничтожает вредные микроорганизмы.

Используемые методы предпосевной обработки семян обладают рядом недостатков: длительность процесса замачивания, невозможность отделить всхожие семена от невсхожих до их прорастания. В связи с этим большой интерес представляет совершенствование и дальнейшее развитие существующих методов предпосевной обработки семян.

В 30–40 - е годы прошлого века в Советском союзе проводились исследования влияния ультразвуковых колебаний на процесс развития растений [47]. Исследования показали, что использование ультразвуковых колебаний благотворно сказывается на процесс прорастания семян и последующее развитие растений.

Так, обработанные ультразвуком зерна ячменя дают всходы на 2–3 дня раньше, чем контрольные посадки, длина колоса и количество зерен в нем увеличиваются на 30 %.

Процесс ультразвуковой обработки семян выглядит следующим образом [48]:

- 1) партия семян помещается в технологический объем с водой, при этом объем семян не должен превышать 30 % объема воды;
- 2) вносятся необходимые микроэлементы;
- 3) в течение 5–10 минут производится обработка ультразвуком.

Таким образом, ультразвуковая предпосевная обработка семян характеризуется высокой производительностью.

Кроме этого, ультразвуковая предпосевная обработка семян имеет еще одно неоспоримое преимущество, которое повышает ее ценность. После предпосевной обработки семян пустые, невсхожие семена остаются плавать на поверхности жидкости, а всхожие семена оседают на дно. Таким образом, можно достаточно легко отделить невсхожие семена от всхожих.

К сожалению, механизм ультразвукового воздействия на зерна и семена до конца не исследован. Ясно только, что ультразвук способен стимулировать жизненные силы, заложенные природой в каждую сельскохозяйственную культуру [49].

Для проведения исследований была разработана установка на базе ультразвукового технологического аппарата «Волна-0,4/22-М» (рисунок 7.1).



Рисунок 7.1 – Установка для предпосевной обработки семян

В ходе исследований ультразвуковой обработке подвергались семена дыни, томатов, кукурузы, пшеницы, гречихи. Результаты исследований приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты экспериментов по предпосевной обработке семян

Вид растений	Рост урожайности, %
Дыня	45
Томаты	15
Кукуруза	35
Пшеница	25
Гречиха	30

7.3 Применение ультразвука в медицине

7.3.1 Физиотерапевтическое воздействие ультразвука

Применение ультразвука существенно обогатило арсенал физиотерапевтических методов. Использование ультразвука позволило не только успешно бороться с некоторыми болезнями, но и повышать жизнеспособность и сопротивляемость здорового организма неблагоприятным внешним условиям [27].

Применение ультразвука, как, впрочем, и других лечебных воздействий, требует дозировки. При слишком низких интенсивностях и коротком времени воздействия ультразвук может оказаться неэффективным, а интенсивное и длительное воздействие может обусловить весьма существенные и необязательно желательные изменения в организме.

При некоторых вяло протекающих инфекционных и других заболеваниях весьма полезной оказывается проводимая с лечебной целью *аутогемотерапия* – внутримышечное или внутривенное введение больному (человеку или животному) его собственной крови. Такая процедура приводит, как правило, к улучшению обменных процессов и повышению защитных сил организма.

Эффективность аутогемотерапии можно повысить, если перед вливанием кровь облучить ультрафиолетом, осторожно взболтать или подвергнуть дейст-

вию ультразвука низких интенсивностей. При этом отмечается значительное улучшение общего состояния организма, повышение его жизнеспособности и сопротивляемости неблагоприятным изменениям внешней среды.

Рефлексотерапия – лечебное воздействие иглами, теплотой, надавливанием на определенные биологически активные точки, расположенные на поверхности тела, – имеет многовековую историю. В последнее время к традиционным методам воздействия добавились и современные – воздействие электрическим током, лазерным лучом, ультразвуком.

Совокупность биологически активных точек функционально представляет собой как бы вынесенный на поверхность тела пульт индикаторов и датчиков, сигналы с которых корректируют работу внутренних органов. Функции таких индикаторов, очевидно, выполняют многочисленные рецепторы и нервные окончания, расположенные на участках рыхлой соединительной ткани в области локализации биологически активных точек.

Как известно, реакция рецепторов на внешнее воздействие всегда сопровождается деполяризацией, снижением мембранного потенциала и изменением проницаемости их мембран, по крайней мере, по отношению к ионам натрия и калия. Известно также, что изменение проницаемости клеточных мембран – универсальная реакция клеток на ультразвуковое воздействие. Таким образом, очевидно, что действие ультразвука на биологически активные точки обусловлено деполяризацией мембран рецепторов содержащихся в этих точках.

Например, увеличивается половая потенция баранов и хряков после воздействия непрерывным ультразвуком с интенсивностью $0,05\text{--}0,2\text{ Вт/см}^2$ в течение 1–3 мин на точку «38 БАЙ ХУЭ», расположенную на средней линии спины, на уровне верхнего края крестцовой кости, и на три пары точек «38 МУ-Я», расположенных в 50 мм от средней линии, на уровне второго, третьего и четвертого крестцовых позвонков.

Воздействие ультразвуком на общеукрепляющие точки обуславливает изменение не только в воспроизводительной функции животных. Сразу же после воздействия на эти точки у человека и животных на 7–10 % увеличивается частота пульса и на 10–12 % – частота дыхания, но через несколько часов оба показателя возвращаются к норме.

Ультразвуковая физиотерапия весьма эффективна при лечении острых синовитов, тендовагинитов, периоститов, фиброзных и осцифицирующих периоститов.

Воздействие одним лишь ультразвуком на очаг заболевания (местное воздействие) при острых и хронических асептических процессах, касающихся суставов, сухожилий, связок и других звеньев конечностей, способствует быстрому восстановлению их опорно-двигательной функции. Обычно выздоровление наступает после 6–7 процедур, по одной ежедневно или через день. При хронических пролиферативных процессах курс лечения увеличивается до 11–12 про-

цедур. Если клинические проявления заболевания не проходят, то курс лечения необходимо повторить через 1–2 месяца.

Благодаря ярко выраженному обезболивающему действию ультразвук особенно эффективен при лечении неосложненных вывихов голеностопного и плечевого суставов. При острых синовитах, тендовагинитах и других заболеваниях весьма эффективен фонофорез гидрокортизона или дексазона, обеспечивающий одновременное действие ультразвука и лекарственного препарата.

Фонофорез – введение лекарственного препарата сквозь неповрежденную кожу благодаря силам, действующим в акустическом поле, – способствует также обусловленному ультразвуком повышению проницаемости клеточных мембран, причем толщина слоя ткани, состоящей из клеток, мембраны которых обладают повышенной проницаемостью, пропорциональна интенсивности ультразвука. Повышенная проницаемость сохраняется в течение полутора-двух часов, однако наибольшая проницаемость наблюдается в течение первых 25 мин после воздействия ультразвуком. Поэтому в ряде случаев после ультразвукового воздействия весьма эффективен электрофорез. При такой последовательности электрофоретически введенные лекарственные вещества локализуются не только в межклеточном пространстве, но и попадают во внутренний объем клетки.

В физиотерапии опорно-двигательного аппарата лучше всего действует, не вызывая отрицательных последствий и быстро приводя к выздоровлению, ультразвук с интенсивностями в интервале $0,1–0,4 \text{ Вт/см}^2$. Под влиянием низких интенсивностей ультразвука, стимулирующих обменные процессы, снижается экссудация, разрыхляется фиброзная ткань, начинается декальцификация сформировавшихся и формирующихся остеофитов и экзостозов. Увеличение интенсивности и длительности воздействия приводит к разрежению кортикального слоя кости в зоне воздействия ультразвука и другим нежелательным последствиям.

Способность ультразвука ускорять процессы синтеза соединительнотканых и других белков, а также РНК в клетках, его стимулирующее, противовоспалительное и болеутоляющее действие делают ультразвуковую терапию ран весьма эффективной.

Под действием ультразвука ($0,88 \text{ МГц}$; $0,5 \text{ Вт/см}^2$; 3–5 мин.) раны размером 3–5 см в поперечнике заживают на 18–20-й день после их появления. Таким образом, раны заживают на 8–10 дней быстрее, чем раны, кожу вокруг которых ежедневно обеззараживают 70 %-ным раствором винного спирта, а поверхность раны смазывают 50 %-ным водным раствором глицерина, и на 4–5 дней быстрее, чем раны, края и поверхность которых ежедневно покрывают синтомициновой эмульсией.

Следует отметить, что результат комбинированного действия ультразвука с синтомициновой эмульсией не превышает результатов, обеспечиваемых применением одного лишь ультразвука. Очевидно, ультразвуковое воздействие на-

столько полно реализует резервы организма, что влияние других факторов на этом фоне оказывается незначительным.

Заживление послеоперационных ран можно ускорить, используя ультразвук для предварительной подготовки тканей. Дооперационное воздействие ультразвуком, стимулируя защитные процессы, ускоряет послеоперационную регенерацию тканей, заживление операционного разреза, существенно упрочняет формирующийся рубец. Так, на четвертые сутки после операции, проведенной на коже, предварительно обработанной ультразвуком, прочность рубца оказывается более чем на 30 % выше, чем прочность рубца на неподготовленном участке.

Весьма целесообразно использовать ультразвук и для лечения воспалительных инфильтратов, нередко возникающих в качестве послеоперационных осложнений. После воздействия ультразвуком с интенсивностью 0,2–0,6 Вт/см² воспалительные явления обычно стихают после 4–5 процедур, а после 6–9 процедур инфильтраты чаще всего рассасываются. При ежедневном лечении ультразвуком площадь раны уменьшается в 1,5–2 раза быстрее, патогенные микробы исчезают из раны на 2–3 дня раньше обычного, а рубец формируется без келоидизации. В целом ультразвуковое облучение ускоряет заживление осложненных операционных ран на 2–3 дня.

Фурункулез - острое гнойно-некротическое воспаление волосяных мешочков, связанных с ними сальных желез и окружающей их клетчатки, вызывается стафилококком и возникает в местах патогенного заражения, а также механического или химического раздражения кожи. У животных фурункулы нередко образуются на вымени. Ежедневные десятиминутные воздействия ультразвуком (0,88 МГц; 0,2–1 Вт/см²) непосредственно на поверхность фурункулов через водно-глицериновую контактную среду значительно ускоряют лечение. Уже после первой процедуры уменьшается болезненность пораженного участка, после второй или третьей снижается воспаление, боли полностью исчезают, фурункулы уменьшаются в размерах. На пятый-шестой день большинство фурункулов вскрывается, из них выделяются гнойный экссудат и гнойные пробки. Образовавшиеся на месте фурункулов язвочки в последующие 5–6 дней полностью заживают. В некоторых случаях фурункулы не вскрываются: после 10-12 процедур инфильтраты рассасываются и на их месте под кожей обнаруживаются лишь безболезненные уплотнения.

Следует отметить, что использование в качестве контактной среды вместо водно-глицериновой смеси тетрациклиновой мази лишь незначительно ускоряет процесс лечения. Очевидно, в обоих случаях эффект обусловлен терапевтическим действием ультразвука, а не действием веществ, содержащихся в среде, обеспечивающей акустический контакт между фурункулом и излучателем ультразвуковых волн.

При абсцессах ультразвуковая терапия также дает хорошие результаты. Используются те же методы воздействия и параметры ультразвука, что и при ле-

чении фурункулеза. Применение ультразвука особенно эффективно при лечении абсцессов, расположенных неглубоко под поверхностью тела.

7.3.2 Влияние ультразвука на молочную железу и лечение ее заболеваний

Молочные железы являются придатками кожи, специализированными для секреции молока. Попытки повышения их продуктивности с помощью стимуляции самыми разными факторами, в том числе и ультразвуком, весьма многочисленны. Особенно эффективен ультразвук (0,88 МГц; 0,2–0,6 Вт/см²; 5–10 мин) при раздаивании. Стимулируя обменные процессы, нормализуя сократительную активность гладкой и поперечно-полосатой мускулатуры, ультразвуковое воздействие улучшает кровоснабжение молочной железы, повышает молокоотдачу, уменьшает явления застоя и задержки молока, сокращает сроки раздаивания.

Стимуляция секреции молока ультразвуком у активно лактирующих животных не всегда приводит к повышению их продуктивности. Эффект зависит от исходной продуктивности и резерва возможностей организма лактирующего животного, а также от интенсивности ультразвука, локализации и длительности его воздействия. Эффективной реализацией резерва продуктивности способствует воздействие ультразвуком низких интенсивностей (0,2–0,4 Вт/см²) на рефлексогенные зоны вымени животных, расположенные у основания соска. Общее воздействие на вымя также приводит к увеличению секреции на 10–12% при условии, что интенсивность ультразвука не превышает 1 Вт/см². При более высоких интенсивностях ультразвукового воздействия на вымя продуктивность животных или подавляется, или, если компенсаторным механизмам удастся справиться с повреждающим воздействием интенсивного ультразвука, продуктивность остается на исходном уровне.

Воздействие ультразвуком на молочные железы приводит к изменению качества молока. В молоке увеличивается содержание лизоцима, цепного фермента, придающего молоку бактерицидные свойства. Чем выше концентрация лизоцима в молоке, тем ниже вероятность инфицирования молочной железы, возникновения маститов и других заболеваний. В связи с этим ультразвук низких интенсивностей может рассматриваться как хорошее средство предупреждения маститов.

Увеличение интенсивности ультразвука до 1,5–2,0 Вт/см², как правило, несколько снижает молочную продуктивность, хотя содержание лизоцима в молоке возрастает, и тем значительнее, чем ниже было его содержание в молоке животных до ультразвукового воздействия.

Воспаления молочной железы, вызванные гноеродными микроорганизмами (маститы), часто встречаются у людей и животных. При маститах весьма эф-

фективны ультразвуковые методы, существенно ускоряющие и удешевляющие процесс лечения.

Первое же воздействие ультразвуком (0,88 МГц; 0,4–0,6 Вт/см²; 10 мин.) на пораженную долю вымени снимает болевую реакцию. При своевременном лечении катаральные маститы прекращаются после 2–5 процедур (по одной ежедневно). В конце курса лечения болезнетворные микроорганизмы в молоке совсем исчезают.

Успешно используют ультразвук и при других формах маститов, а также при абсцессах, актиномикозах, флегмонах и отеках различной этиологии. Процесс лечения обычно составляет 5–6 дней и не превышает 2–3 недель.

Эффективен для лечения маститов комбинированный метод, включающий лечение ультразвуком и антимикробными препаратами.

7.3.3 Ультразвук в офтальмологии

Ультразвук с интенсивностью, превышающей 1 Вт/см², вызывает нежелательные явления в структуре глаза - помутнение стекловидного тела, образование катаракты, слущивание эпителия на роговице, отек и некроз передних слоев стромы и пр. Поэтому для лечения болезней глаз используют ультразвук с интенсивностью 0,2–0,4 Вт/см², а время воздействия обычно не превышает 5 мин. Ультразвук в таком режиме заметно активизирует обменные процессы, а также увеличивает проницаемость тканей глаза для лекарственных препаратов. В связи с этим на практике, как правило, используют фонофорез [27].

В лечении глазных болезней была использована и способность ультразвука стимулировать обменные процессы, ускорять биосинтез соединительнотканых белков и ряда других веществ в клетке, активизировать восстановительные процессы в поврежденных тканях.

Весьма эффективен ультразвук (0,88 МГц; 0,3 Вт/см²; 5 мин) при лечении тяжелых проникающих ран роговицы и склеры. Под его влиянием ускоряется рассасывание фибрина и лейкоцитарной инфильтрации, уменьшается отек стромы роговицы. В результате образуется тонкий, почти бессосудистый рубец, похожий по своему строению на строму роговицы.

Вирусный кератит, в том числе у кроликов, собак, лошадей и других животных, после лечения ультразвуком быстро проходит и не оставляет грубых рубцов на роговице.

Для воздействия ультразвуком на глаза животных и человека в настоящее время используется несколько разных способов. Излучатели небольшого размера (диаметром от 0,5 до 1 см) позволяют облучать ультразвуком ограниченный участок глаза при непосредственном контакте с ним. Такой метод чаще всего используют при лечении рубцов, царапин и ран кожных покровов век и кожи вокруг глаз. Для воздействия на сам глаз применяют непрямой контактный метод. В качестве прокладки, передающей акустическую энергию, исполь-

зуют заполненный водой мешочек из тонкой резины, принимающий форму глаза и излучателя. Однако при этом теряется 50–60 % ультразвуковой энергии и становится затруднительной точная дозировка воздействия.

Фонофорез проводят, используя специальную ванночку-векорасширитель, которую устанавливают на предварительно анестезированное глазное яблоко. Края ванночки заводят под веки, а в широкую часть наливают лекарственный раствор, который одновременно используется в качестве среды, обеспечивающей акустический контакт. При стойких хронических патологических изменениях различных структур глаза ультразвуковая терапия малоэффективна.

7.3.4 Влияние ультразвука на внутренние органы

Ультразвук в ряде случаев весьма эффективен при лечении болезней внутренних органов.

При ранних воспалительных поражениях печени ультразвук (0,88 МГц; 0,3–0,6 Вт/см²; 5–10 мин) оказывает нормализующее и противовоспалительное действие. В зрелом возрасте, особенно при гипокинезии и гепатозе, это действие проявляется значительно слабее.

Ультразвуковое воздействие (0,2–0,4 Вт/см²) на область желчного пузыря усиливает его моторную активность. При хронических холециститах после лечения ультразвуком уменьшаются боли, исчезают диспепсические явления, значительно уменьшаются или даже полностью восстанавливаются размеры печени.

Ультразвуковое воздействие (0,5–0,85 Вт/см²) на область желудка или соответствующую паравертебральную зону нормализует его моторную, эвакуаторную и секреторную функции. При гастрите, в частности у собак, ультразвук нормализует всасывательную функцию в среднем на 32 дня, а секреторную - на 37 дней раньше, чем в контроле. Эффективен ультразвук (0,2–0,6 Вт/см²) и при язвенной болезни.

Под влиянием низкочастотного ультразвука (44–65 кГц) иммунная система испытывает существенные изменения. Воздействие на область селезенки ультразвуковым инструментом с амплитудой 0,3–3 мкм в течение минуты, повышая устойчивость иммунной системы к инфекциям, обеспечивает выживание, по крайней мере, 20 % животных в эксперименте после их заражения высококовирулентным штаммом коклюшных бактерий.

Интенсивность иммуногенеза в ответ на введение в организм антигена возрастает, если предварительно - за 24–48 ч - подвергнуть животное ультразвуковому воздействию. Интенсификация иммуногенеза, очевидно, обусловлена общей реакцией организма на внешнее неспецифическое воздействие и отчетливо проявляется в повышении содержания гемолизинов и гемагглютининов в крови, а также повышении количества антител и розеткообразующих клеток в селезенке.

7.3.5 Ультразвуковое лечение опухолей

Ультразвук низких интенсивностей ($0,4\text{--}2,5\text{ Вт/см}^2$) редко применяется в онкологии. С одной стороны, он стимулирует иммунную систему, что в ряде случаев приводит к рассасыванию опухолей, в том числе и тех, которые не подвергались непосредственному воздействию ультразвуком, а с другой – интенсифицирует обменные процессы, ускоряя разрастание опухолевых тканей. Такая двойственность обуславливает определенную степень непредсказуемости, что и препятствует применению ультразвука низкой интенсивности в онкологии.

Ультразвук высоких интенсивностей (1000 Вт/см^2) способен полностью разрушить опухолевую ткань. При этом, ввиду фокусирования, область, где интенсивность ультразвука превышает порог разрушения, может быть весьма ограничена, что позволяет воздействовать на опухоль или ее фрагменты, не нарушая целостности окружающих здоровых тканей [27]. Однако после разрушения новообразования весьма велика вероятность гибели организма от интоксикации продуктами распада опухоли, а разрушать ее по частям нельзя, так как оставшиеся фрагменты начинают бурно разрастаться, увеличивается и вероятность метастазирования.

Эффективность ультразвуковых методов в онкологии можно существенно повысить, комбинируя ультразвук с другими видами воздействия.

Значительно усиливает ультразвук низких интенсивностей действие противоопухолевых препаратов на клетки. Однако при введении в организм внутривенно, внутримышечно или перорально концентрация противоопухолевых препаратов в опухолях нередко оказывается ниже, чем в здоровых тканях.

Снижать количество вводимого в организм лекарства тоже нельзя, так как в низких концентрациях многие противоопухолевые препараты стимулируют злокачественный рост. Эти препараты вовсе не безвредны для организма и так же, как и в опухолях, подавляют или останавливают рост клеток в здоровых тканях.

При поверхностном расположении опухоли ультразвук может быть использован для фонофоретического введения противоопухолевых препаратов непосредственно в пораженную ткань. При этом он не только способствует накоплению препарата в опухоли, но и облегчает его проникновение внутрь клеток, поскольку увеличивает проницаемость клеточных мембран. Кроме того, благодаря синергизму ультразвука и противоопухолевых препаратов существенно интенсифицируется их действие.

Метод чрезкожного фонофореза противоопухолевых препаратов, очевидно, не пригоден для лечения новообразований, лежащих в глубине тканей. В этом случае для доставки препарата к опухоли можно использовать липосомы. Доставленные током крови к прогретой ультразвуком опухоли липосомы именно

здесь высвободят противоопухолевый препарат, который благодаря повышенной в результате ультразвукового воздействия проницаемости клеточных мембран будет депонироваться в основном в опухолевой ткани.

Аналогичный процесс, но значительно менее выраженный, наблюдается и при введении лекарственных препаратов непосредственно в кровь.

Сочетание ионизирующих излучений с ультразвуком низких интенсивностей, а также ультразвуком, обеспечивающим гипертермию опухолей, значительно повышает терапевтическую эффективность радиотерапии. Синергизм этих воздействий позволяет при тех же результатах в несколько раз снизить дозу лучевого воздействия и таким образом избежать сосудистых, воспалительных и других осложнений, наблюдающихся при традиционных способах радиотерапии.

7.3.6 Применение ультразвука в хирургии

Поиск и разработка методов снижения травматичности, кровопотери и болевые ощущений при хирургических операциях, методов, позволяющих ускорить заживление послеоперационных ран и рассасывание рубцов, а также методов, облегчающих труд хирурга-оператора, – важные задачи современной хирургии, решению которых способствует применение ультразвука.

Можно выделить две основные области использования ультразвука в оперативной хирургии. Это инструментальная ультразвуковая хирургия и локальные разрушения в глубине тканей с помощью фокусированного ультразвука.

За последние годы в практику стали широко внедряться физические методы хирургического воздействия с применением электрокоагуляционной, лазерной, криогенной и ультразвуковой техники.

Рабочая часть ультразвукового хирургического ножа имеет традиционную форму лезвия скальпеля, соединенного волноводом с магнитострикционным или пьезокерамическим преобразователем. Рабочая часть может иметь и другую форму в соответствии с требованиями выполняемой операции. Амплитуда колебаний режущей кромки в зависимости от поставленной задачи может быть изменена от 1 до

350 мкм, а частота выбирается в диапазоне от 20 до 100 кГц. Как известно, трение покоя больше, чем трение скольжения, поэтому трение между двумя поверхностями уменьшается, если одна из них совершает колебательные движения. Именно поэтому работа с ультразвуковыми инструментами требует от хирурга меньших усилий.

Характер разрушения тканей под действием ультразвукового хирургического инструмента зависит от строения его рабочей части, амплитуды и направления колебаний. Зависит он и от вязкоупругих свойств и однородности ткани.

При рассечении мягких тканей ультразвуковым ножом, лезвие которого совершает продольные ультразвуковые колебания, взаимодействует с тканью лишь кромка лезвия, обеспечивая процесс микрорезания, существенно усиливающего режущие свойства инструмента. Кроме того, у кромки лезвия колеблющегося инструмента выделяется теплота, локально повышающая температуру ткани и обуславливающая гемостатический эффект в результате термокоагуляции крови.

Так, применение ультразвукового скальпеля, амплитуда колебаний кромки которого лежит в интервале 15–20 мкм при частоте 44 кГц, в 6–8 раз уменьшает кровотечение из мелких и средних сосудов, в 4–6 раз снижает усилие резания, а также существенно облегчает строго послойное разделение кожи, подкожной жировой клетчатки и рубцовоизмененного хряща. Очевидно, что если на инструмент наложены лишь продольные колебания, то его воздействие на стенки раневого канала минимально.

Для разрушения некоторых патологических образований используют специальные волноводы - дезинтеграторы, рабочий конец которых помимо продольных совершает и поперечные колебания. Такие инструменты оказывают существенное влияние на окружающие ткани и по мере введения инструмента разрушают их.

Ультразвуковые инструменты обладают явными преимуществами перед электро- или криохирургическими, так как не прилипают к ткани и поверхности раневого канала и не вызывают дополнительных травм. Ультразвуковой скальпель не уступает в ряде случаев и лазерному хирургическому инструменту, так как, ощущая сопротивление ткани при операции, хирург лучше контролирует процесс ее рассечения.

В зависимости от поставленной задачи ультразвуковые инструменты могут иметь самые разные размеры и форму.

Применительно к операциям, проводимым на брюшной полости пациента, эффективность достигается благодаря применению методов лапароскопической (от греч. *lapára* – пах, *chrevo* и *skoréō* – смотрю) хирургии. Для лапароскопических операций используются лапароскоп и специальные инструменты, которые вводятся по троакарам через отдельные миниатюрные проколы (не более 1 см) в брюшной полости. Небольшие проколы, производимые при лапароскопических хирургических вмешательствах, практически не травмируют мышечную ткань.

Одной из основных и наиболее важной частью ультразвукового комплекса для лапароскопии является ультразвуковая колебательная система (УЗКС), преобразующая электрические колебания ультразвуковой частоты в механические. От того, насколько эффективно она осуществляет свою функцию, зависят такие эксплуатационные параметры аппарата, как: максимальная амплитуда ультразвуковых колебаний, допустимое время непрерывной работы, разогрев колебательной системы и рабочих инструментов.

Колебательная система, как правило, строится по полуволновой конструктивной схеме, сочетающей в себя электроакустический преобразователь (пьезоэлектрический) и концентратор.

Для осуществления ультразвукового резания и коагуляции необходимым и достаточным условием является достижение амплитуды колебаний порядка 150 мкм. К сожалению, при таком значении амплитуды колебаний велика вероятность возникновения изгибных колебаний. При этом наблюдается разрушение рабочего инструмента.

Для выполнения различного рода лапароскопических операций применяется несколько сменных рабочих инструментов (до 10 шт.), которые отличаются длиной, диаметром и формой окончаний. Длина всех сменных рабочих инструментов выбиралась из условий обеспечения кратности половине длины волны продольных ультразвуковых колебаний в материале инструмента (рисунок 7.2).

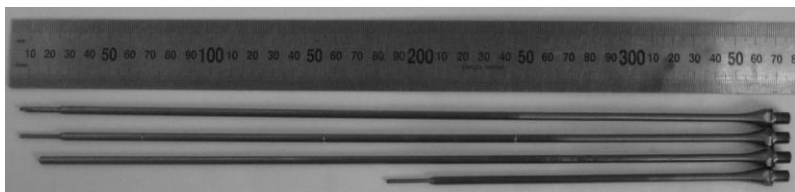


Рисунок 7.2 – Внешний вид рабочих инструментов
– волноводов
с различными рабочими окончаниями

Короткие рабочие инструменты длиной 185 ± 4 мм предназначены для открытой хирургии, рабочие инструменты длиной 365 ± 5 мм применяются при лапароскопии. Рабочая частота равна $29 \pm 1,5$ кГц, что удовлетворяет условию согласования преобразователя и рабочего инструмента.

Волноводы выполнены таким образом, что имеют два основных диаметра 6 мм и 3 мм. Тонкие инструменты наиболее предпочтительны, так как уменьшается размер необходимого прокола в брюшной полости пациента.

На рисунке 7.3 показан внешний вид волновода диаметром 3 мм с режущим рабочим окончанием с установленным одним демпфирующим кольцом.

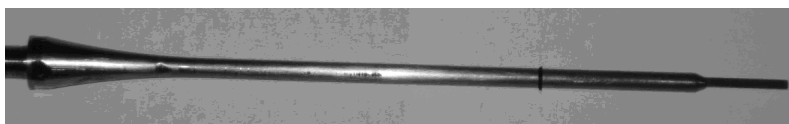


Рисунок 7.3 – Волновод-ножницы с демпфирующим кольцом

Этот тип волновода обеспечивает амплитуду 150 мкм и более даже без демпфирующих колец. После установки демпфирующего кольца и защитного тубуса характеристики волновода не изменились. Однако наблюдается силь-

ный разогрев установленного кольца на волноводе, и при длительной работе кольцо начинает дымить. Резонансная частота волновода с установленными демпфирующими кольцами и присоединенным преобразователем 29,76 кГц.

Аналогичное поведение отмечено и у волновода-ножниц длиной 369 мм. Наличие демпфирующих колец на этом типе волновода позволило поднять его амплитуду до 150 мкм. Наблюдался сильный нагрев в зоне третьей от рабочего окончания проточки.

Резонансная частота волновода с установленными демпфирующими кольцами и присоединенным преобразователем была равна 29,57 кГц. Следует отметить, что при использовании ультразвукового хирургического инструмента наряду с гемостатическим эффектом наблюдаются также анальгетический и бактерицидный и/или бактериостатические эффекты.

Бактерицидный эффект позволяет использовать простую и оригинальную методику самостерилизации хирургического инструмента. Рабочую часть инструмента опускают в раствор дезинфектанта и включают генератор. Ультразвуковые колебания вызывают интенсивные микротечения жидкости вблизи инструмента, очищающие его поверхность. Кроме того, увеличивая проницаемость мембран клеток болезнетворных бактерий по отношению к дезинфицирующему веществу, ультразвук повышает эффективность его действия, что позволяет в 10–100 раз снизить концентрацию этого вещества в растворе. Если, например, лезвие ультразвукового скальпеля погрузить в бульон со стандартной культурой гемолитического плазмокоагулирующего стафилококка, после этого включенный инструмент подвергнуть двухминутной самостерилизации в разбавленном (0,025–0,5%) растворе диоксида, выключить его и привести в соприкосновение с поверхностью кровяного агара, то число выросших микробных колоний окажется тем меньшим, чем выше была амплитуда колебаний инструмента.

На практике для стерилизации ультразвуковой инструмент, колеблющийся с максимальной амплитудой, опускают на несколько секунд в сосуд с любым дезинфицирующим раствором, например перекиси водорода.

7.3.7 Ультразвуковая липосакция

Уже более 40 лет для липосакции используют устройства, обеспечивающие удаление подкожных жировых отложений через проколы в коже (внутренняя липосакция). Такие устройства постоянно совершенствуются и кульминацией их развития стало применение для удаления подкожно-жировой клетчатки устройств, использующих ультразвуковые колебания высокой интенсивности [7, 8].

Применение ультразвуковых колебаний для удаления подкожно-жировой клетчатки позволило интенсифицировать процесс и сделать липосакцию безо-

пасной операцией в сравнении с применявшимися ранее устройствами для механического разрушения и вакуумного отсоса жира.

Для создания и введения УЗ колебаний высокой интенсивности в области человеческого тела, где необходимо удалить излишки подкожно-жировой клетчатки, применяются специальные устройства, основу которых составляют ультразвуковые колебательные системы [7, 8], содержащие закрепленный в корпусе пьезоэлектрический преобразователь и сменный ультразвуковой хирургический инструмент, соединенный и акустически связанный с преобразователем (рисунок 7.4). Пьезоэлектрический преобразователь обеспечивает преобразование электрических колебаний в ультразвуковые.

Сменный ультразвуковой хирургический инструмент вводится в тело пациента на необходимую глубину и обеспечивает передачу ультразвуковых колебаний от пьезоэлектрического преобразователя в подкожно - жировую клетчатку.



Рисунок 7.4 – Ультразвуковая колебательная система для внутренней липосакции

Сменный ультразвуковой хирургический инструмент вводится в тело пациента на необходимую глубину и обеспечивает передачу ультразвуковых колебаний от пьезоэлектрического преобразователя в подкожно – жировую клетчатку. Сменный ультразвуковой хирургический инструмент выполняется в виде полого стержня переменного сечения, на конце которого имеется рабочее окончание (рисунок 7.5).



Рисунок 7.5 – Рабочие инструменты ультразвуковой колебательной системы для внутренней липосакции

Центральный сквозной канал в колебательной системе обеспечивает откачивание получаемой жировой эмульсии при помощи вакуумного насоса в процессе проведения операции.

Среди современных устройств для ультразвуковой липосакции наибольшее распространение получили устройства фирмы MENTOR [50].

Анализ конструктивных особенностей и функциональных возможностей известных устройств позволяет утверждать, что основными их недостатками являются необходимость выполнения проколов в коже, механическое разрушение внутренней структуры подкожно - жировой клетчатки за счет механических перемещений рабочих инструментов длиной до 400 мм и диаметром до 7 мм, термические ожоги, невозможность контроля зоны кавитационного разрушения и отсоса. Недостатки приводят к операционной травматичности и необходимости длительной реабилитации после проведения процедуры, что существенно ограничивает возможности внутренней ультразвуковой липосакции.

Для устранения недостатков устройств, предназначенных для внутренней липосакции, в последние годы начали применяться устройства для внешней (наружной) липосакции, обеспечивающие введение ультразвуковых колебаний в подкожно - жировую клетчатку через поверхность кожи пациента. Благодаря введению ультразвуковых колебаний через поверхность кожи в жировой ткани возникает эффект кавитации (образуются взрывающиеся кавитационные пузырьки). Кавитационные пузырьки разжижают жир и вытесняют его из клеток. Перемещаясь из области с низким давлением в область с высоким давлением, кавитационный пузырек увеличивается в размерах и схлопывается – происходит своего рода «микровзрыв», который разрушает мембраны жировых клеток. В конечном счете освободившийся жир выводится из организма через лимфатическую и кровеносную системы.

Внешняя ультразвуковая липосакция совершенно безвредна для всех систем организма просто потому, что в других клетках, кроме жировых, эффекта кавитации не возникает. При этом осложнения после ультразвуковой липосакции не возникают, она не травматична, не требует реабилитационного периода, а противопоказаний против внешней ультразвуковой липосакции практически нет.

Уникальность метода внешней липосакции при помощи эффекта кавитации заключается в том, что при небольшом воздействии ультразвука исключительно на жировую клетчатку происходит разжижение жировой клетки и полное её опустошение без повреждения соединительной и костной ткани, капилляров и прочих органов. Для появления эффекта кавитации необходимы определенные условия, а именно давление 0,6 кПа и вибрация с частотой от 39–41 кГц, благодаря этому удается достичь более глубокого проникновения до 8–10 см.

На сегодняшний день существует несколько устройств (медицинских аппаратов), реализующих процедуру внешней липосакции при помощи ультразвуковых низкочастотных колебаний (итальянской фирмы TriWorks – «Synetica»),

американской фирмы *Ultrashape Inc* – «UltraShape Contour I», итальянской фирмы *Manola Tesoro* – «ULTRA», американской фирмы *RAH-MediCell* и др.). Наиболее известным и эффективным (по отзывам врачей и пользователей) из таких устройств является аппарат американской фирмы *Ultrashape Inc* (Yonkeam Plite, Иллинойс) – «UltraShape Contour I»[51].

Устройство для внешней ультразвуковой липосакции состоит из двух основных узлов: электронного генератора ультразвуковой частоты и пьезоэлектрической колебательной системы (рисунок 7.6).

Электронный генератор ультразвуковой частоты обеспечивает преобразование электрической энергии промышленной частоты (50 Гц) в электрическую энергию ультразвуковой частоты (40 кГц), соответствующей собственной резонансной частоте колебательной системы.

Пьезоэлектрическая ультразвуковая колебательная система обеспечивает преобразование электрических колебаний, поступающих от электронного генератора, в механические колебания ультразвуковой частоты заданной интенсивности (амплитуды) и их введение через поверхность кожи в подкожно - жировую клетчатку.



Рисунок 7.6 – Аппарат для внешней ультразвуковой липосакции

Колебательная система устройства ультразвуковой внешней липосакции содержит закрепленный в корпусе пьезоэлектрический преобразователь, выполненный в виде последовательно размещенных на соединительном стержне и акустически связанных между собой цилиндрической тыльной частотнопонижающей резонансной накладкой, кольцевых пьезоэлектрических элементов и цилиндрической частотнопонижающей излучающей накладкой.

Для преобразования электрических колебаний, поступающих от электронного генератора, в механические колебания ультразвуковой частоты применяются две пары кольцевых пьезоэлектрических элементов, диаметр которых соответствует диаметрам симметрично расположенных относительно них тыльной частотнопонижающей и рабочей излучающей накладок. Колебательная система может иметь максимальный размер, в поперечном сечении равный 60 мм, что, с точки зрения эргономических требований (удобство работы оператора), считается наиболее приемлемым.

Суммарная длина пьезоэлектрического преобразователя колебательной системы соответствует половине длины волны на рабочей частоте 40 кГц, и это позволяет формировать резонансные продольные колебания на рабочей частоте и обеспечивать их введение в тело человека через излучающую поверхность рабочей накладки.

Технические характеристики известного устройства для внешней ультразвуковой липосакции:

- максимальная выходная мощность – 30 Вт;
- рабочая частота – 40 кГц;
- излучающая поверхность диаметром – 50–60 мм.

При проведении внешней липосакции эффект получается равномерным, отсутствуют гематомы мягких тканей и нет необходимости ношения компрессионного белья. А особая физиология жировой ткани позволяет гарантировать, что на месте удаленных избытков жира проблема не возникнет повторно. Результат виден после первой процедуры. Например, в области талии женщины теряют от 4 до 7 см в течение 12 дней. В области галифе сбросить 5 см тоже не составляет никакого труда. У кого-то эффект более заметен, у кого-то чуть меньше, но результат есть у всех и это без операции, без боли. Женщина не испытывает вообще никакого дискомфорта и значительно экономит свое драгоценное время.

7.3.8 Ультразвуковые ингаляционные аппараты

Ингаляционные аппараты предназначены для индивидуального применения лицами, страдающими отоларингологическими заболеваниями, с целью лечения и профилактики заболеваний верхних дыхательных путей и легких, аэрозолями жидких лекарственных веществ (минеральных вод, водных растворов солей, отваров лекарственных трав и т.д.). Так же их применение может быть эффективно для ароматизации и/или очистки помещений от вредных для здоровья веществ и микроорганизмов путем распыления дозированных порций жидкостей по заданной программе.

В связи с этим существует потребность в ультразвуковых ингаляторах, характеризующихся высокой надежностью, малыми габаритами, весом и стоимостью, высокой производительностью, полным использованием лекарственных препаратов и пригодных для профилактики и лечения дыхательных органов мелкодисперсными аэрозолями как в лечебных учреждениях, так и в домашних условиях.

Рассмотрим несколько конструкций УЗ ингаляторов: ингалятор для лечебных учреждений «Муссон» (рисунок 7.7), ингалятор индивидуального применения «ИНАЛ» (рисунок 7.8) и модификацию ингалятора «ИНАЛ-М» для групповой аэрозоль терапии), отличающихся простотой в изготовлении и на-

стройке, малой стоимостью, отсутствием дефицитных комплектующих, высокой надежностью и эффективностью [52].

Отличительной особенностью разработанных ингаляторов является наличие системы автоматического отслеживания уровня распыляемой жидкости относительно области фокусирования ультразвука, что обеспечивает, с одной стороны, ее полное расхождение, а с другой – высокую стабильность дисперсного состава аэрозоля и его плотности.



Рисунок 7.7 – Ультразвуковой ингалятор «Муссон»

Второй отличительной особенностью всех разработанных конструкций ингаляторов является применение узла магнитогидродинамической активации аэрозоля.

Выбор оптимальных параметров УЗ ингаляторов позволил обеспечить формирование аэрозоля с размерами частиц до 2 мкм (90 % от общего количества), оптимальную производительность (не менее 4 мл/мин для ингалятора «ИНАЛ» и не менее 1 мл/мин для ингалятора «ИНАЛ-М»), полное распыление используемых препаратов, оптимальный уровень подогрева аэрозоля и его магнитную активацию.



Рисунок 7.8 – Ультразвуковой ингалятор «ИНАЛ»

Для получения сфокусированного ультразвукового поля в ингаляторе «ИНАЛ» используется пьезоэлектрический элемент в форме диска, соединенный с алюминиевой вогнутой линзой. Применение линзы обеспечивает не только фокусировку ультразвуковых колебаний, но и защиту серебрянных электродов пьезоэлемента от воздействий используемых лекарственных препаратов.

Внешний вид ингаляторов показан на рисунках 7.7 и 7.8 (на фото показаны два варианта выполнения распылительной камеры).

Ингалятор состоит из электронного блока и подключаемой к его выходному разъему с помощью соединительного кабеля распылительной камеры.

Электронный блок содержит источник питания и высокочастотный генератор, вырабатывающий электрические колебания частотой 2,64 МГц для возбуждения ультразвуковых колебаний в распылительной камере.

Распылительная камера (показано два варианта использования распылительной камеры – с трубкой для вдыхания аэрозоля пациентом и с раструбом для насыщения аэрозолем помещения-ингалятория) служит для образования аэрозоля из лекарственных препаратов, его магнитной активации и транспортировки к пациенту (пациентам).

Электрические колебания, подаваемые по соединительному кабелю в распылительную камеру от электронного блока преобразуются пьезоэлектрическим элементом в ультразвуковые. Ультразвуковые колебания, проходя через фокусирующую линзу, контактную жидкость и дно кюветы, фокусируются на поверхности лекарственного препарата, обеспечивая его распыление.

При транспортировке аэрозоля к пациенту через трубку лекарственный препарат подвергается магнитной обработке в ультразвуковом поле.

Кювета для лекарственного препарата состоит из двух колец (наружного и внутреннего), между которыми расположена тонкая фторопластовая или лавсановая пленка. Такая кювета позволяет использовать для распыления до 30 мл лекарственного препарата.

Применение в качестве дна кюветы тонкой полимерной пленки обеспечивает наилучшие условия прохождения ультразвуковых колебаний (отсутствие ослабления) и исключает плавление (прогар) дна после выработки всего жидкого лекарственного препарата.

Особым достоинством, отмечаемым потребителями, была возможность распыления маслосодержащих лекарственных препаратов.

Опыт применения показал, что такой ингалятор наиболее пригоден для лечебных учреждений. Использование его в домашних условиях для индивидуального лечения не всегда оправдано из-за достаточно высокой стоимости и необходимости соблюдения определенных технологических приемов (применения в качестве контактной жидкости диэрированной дистиллированной воды с температурой 35–40 градусов, точная дозировка контактной жидкости).

По этим причинам, для индивидуального потребителя потребовалось создать более простой в обращении и менее дорогой ингалятор.

Одновременная обработка потока магнитным и УЗ полями создает эффект больший, чем сумма эффектов от каждого вида воздействий порознь. Создаваемый в результате этого фактора запас по эффективности омагничивания был трансформирован при разработке ингаляторов в снижение требований к силе магнитов и числу ступеней реверсирования вектора магнитной индукции, что, в свою очередь, позволяет уменьшить габариты и стоимостные показатели аппарата.

В части совершенствования существующих ингаляторов необходим малогабаритный, переносной (карманный), малоэнергоёмкий (с батарейным питанием) ультразвуковой аэрозольный аппарат постоянной готовности.

Такой ультразвуковой аэрозольный аппарат состоит из генератора электрических колебаний, питающего пьезоэлектрический преобразователь, соединенный акустически с промежуточной средой. В качестве промежуточной среды используется элемент в виде тела вращения с конусным, экспоненциальным или ступенчатым изменением диаметра вдоль длины (концентратор). При этом большая торцевая поверхность концентратора образована плоскими гранями, выполненными симметрично относительно его продольной оси на равных расстояниях от центра меньшей торцевой поверхности. Преобразователь выполнен в виде пьезоэлектрических пластин, соединенных с каждой из граней. В центре меньшей из торцевых поверхностей концентратора размещена полость сообщающаяся с одной стороны, с этой поверхностью посредством капиллярного отверстия для выхода аэрозоля, а с другой стороны с резервуаром для подачи распыляемой жидкости.

Наиболее эффективным вариантом реализации аэрозольного аппарата является одновременное питание преобразователя электрическими колебаниями двух частот. Одна из питающих частот соответствует половине длины волны в материале пьезоэлектрических пластин, а вторая соответствует половине длины волны ультразвуковых колебаний в материале элемента в виде тела вращения. При этом меньшая из торцевых поверхностей концентратора имеет поверхность произвольной геометрической формы, например, в виде чаши.

Существенного расширения функциональных возможностей аэрозольного аппарата можно добиться соединением полости, выполненной в центре меньшей из торцевых поверхностей, посредством капилляров, проходящих через концентратор и выходящих на большую торцевую поверхность концентратор, с резервуарами для подачи различных по свойствам распыляемых жидкостей.

На рисунке 7.9 для иллюстрации конструкции и пояснения принципа работы представлен эскиз аэрозольного аппарата.

Ультразвуковой аэрозольный аппарат состоит из генератора электрических колебаний 1, пьезоэлектрических пластин 2, размещенных на гранях большей торцевой поверхности элемента в виде тела вращения 3. Грани большей торце-

вой поверхности расположены симметрично относительно продольной акустической оси элемента 3, на равных расстояниях от центра меньшей торцевой (распылительной) поверхности 4. В центре распылительной поверхности 4 элемента 3 размещена (выполнена) полость 5, образующая распылительную камеру, имеющая капиллярное отверстие 8 для вывода образованного аэрозоля потребителю. По капилляру 6 полость 5 сообщается с резервуаром для распыляемой жидкости 7.

Распылительная поверхность 4 может иметь поверхность произвольной геометрической формы, например, в виде чаши (рисунок 7.10, а), имеющей произвольный наклон относительно продольной акустической оси элемента 3 (рисунок 7.10, б).

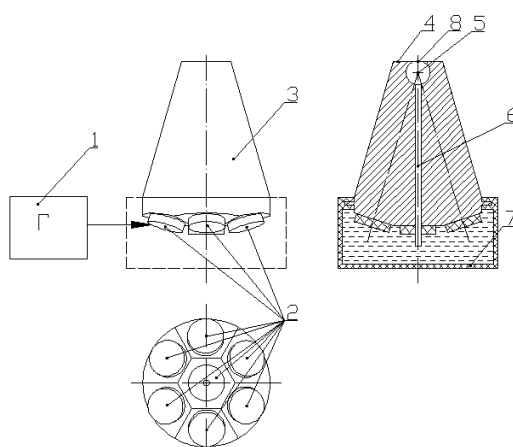
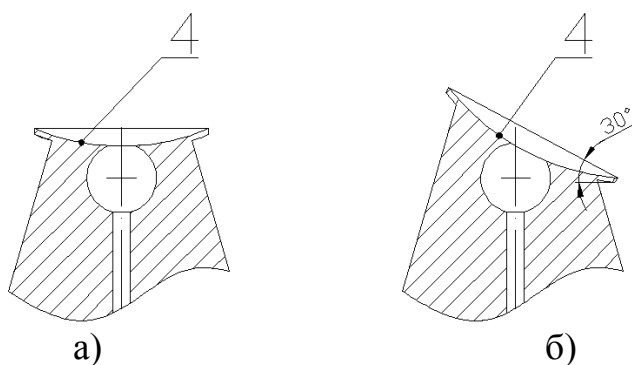


Рисунок 7.9 – Эскиз аэрозольного аппарата



а) – чашеобразная распылительная поверхность; б) – наклонная распылительная поверхность

Рисунок 7.10 – Возможная форма распылительной поверхности

Полость 5, выполненная в центре распылительной поверхности 4, может соединяться с резервуарами 7 для подачи различных по свойствам распыляемых жидкостей, посредством нескольких капилляров 6, проходящих через

концентратор и выходящих на большую из торцевых концентратора (рисунок 7.11).

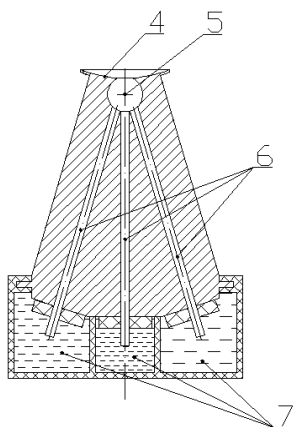


Рисунок 7.11 – Аэрозольный аппарат с возможностью одновременного распыления трех различных жидкостей

В целом конструкция предлагаемого распылителя представляет собой двухчастотную ультразвуковую колебательную систему с ярко выраженными резонансами киллогерцового (низкочастотного) и мегагерцового (высокочастотного) диапазонов (резонансы пьезоэлектрических пластин, например, 2,5 МГц и всей конструкции, например, 120 кГц). Система может возбуждаться одновременно на двух резонансах или на каждом в отдельности.

При возбуждении на частоте киллогерцового диапазона (120 кГц), распылитель представляет собой пьезоэлектрическую колебательную систему с концентратором ультразвуковых колебаний, роль которого выполняет элемент 3. В этом случае генератор 1 создает электрические колебания ультразвуковой частоты, равной продольной резонансной частоте элемента 3. Мощности ультразвуковых колебаний, генерируемые пьезоэлектрическими пластинами 2, складываются на распылительной поверхности 4, и распыление жидкости происходит со всей поверхности 4. Форма и направление формируемого факела распыления определяются формой распылительной поверхности 4.

На рисунке 7.12 показан факел распыления, формирующийся поверхностью распыления в форме чаши, с углом наклона 30° . Подача жидкости на распылительную поверхность 4 происходит посредством капилляра 6 за счет разрежения возникающего на поверхности 4. Средний диаметр капель аэрозоля, формируемого на этой частоте, равен 18-20 мкм.

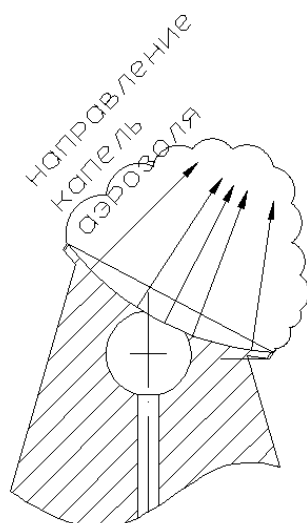


Рисунок 7.12 – Формируемый факел аэрозоля

На частоте мегагерцового диапазона генератор 1 создает электрические колебания высокой частоты, равной резонансной частоте (например, 2,5 МГц) пьезоэлектрических пластин 2, преобразуемые за счет пьезоэффекта пьезоэлектрическими пластинами 2 в ультразвуковые колебания, собираемые в полости 5 в центре распылительной поверхности 4 концентратора 3. Ультразвуковые колебания, возникающие в полости 5, вызывают разряжение внутри этой полости, обеспечивающие подачу распыляемой жидкости по капилляру 6 в полость 5. При этом сечение капилляра 6 выбирается таким образом, чтобы силы поверхностного натяжения удерживали находящуюся в нем жидкость, исключая ее самопроизвольное вытекание при любом положении аэрозольного аппарата. При выполнении нескольких капилляров 6 одновременная подача различных распыляемых жидкостей осуществляется аналогичным образом, и под действием ультразвуковых колебаний в полости 5 происходит их смешивание. После заполнения полости 5, ультразвуковые колебания, приходящие в эту полость, окончательно фокусируются в распыляемой жидкости, вызывая ее мелкодисперсное (3–5 мкм) распыление через капиллярное отверстие 8.

Наиболее эффективным является режим работы, при котором генератор 1 создает электрические колебания высокой частоты мегагерцового диапазона (2–5 МГц), модулированные колебаниями килогерцового диапазона (120 кГц) (рисунок 7.13). В этом случае происходит одновременное высокочастотное распыление жидкости из полости 5 и низкочастотное распыление с поверхности 4.

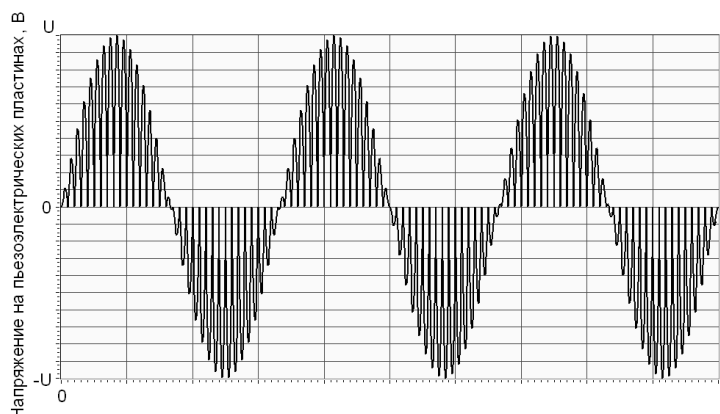


Рисунок 7.13 – Форма напряжения, питающего распылитель

Получаемый в таком режиме распыления аэрозоль имеет распределение капель различного размера в общем объеме аэрозоля, показанное на рисунке 7.14.

На гистограмме, показанной на рисунке 7.14 (ось X – диаметр капли, ось Y – процентное содержание капель указанного диаметра в общем объеме составе аэрозоля) отчетливо видны два максимума, соответствующие диаметрам капель (3–5 мкм и 18–20 мкм), образующихся при возбуждении распылителя на частотах его основных резонансов (2,5 МГц – резонанс пьезоэлектрических пластин 2 и 120 кГц – резонанс элемента в виде тела вращения 3). Промежуток между основными диаметрами капель (3–5 мкм и 18–20 мкм) также достаточно «плотно» заполнен каплями промежуточного диаметра. Изменяя взаимное расположение основных резонансов распылителя, можно регулировать плотность заполнения этого промежутка.

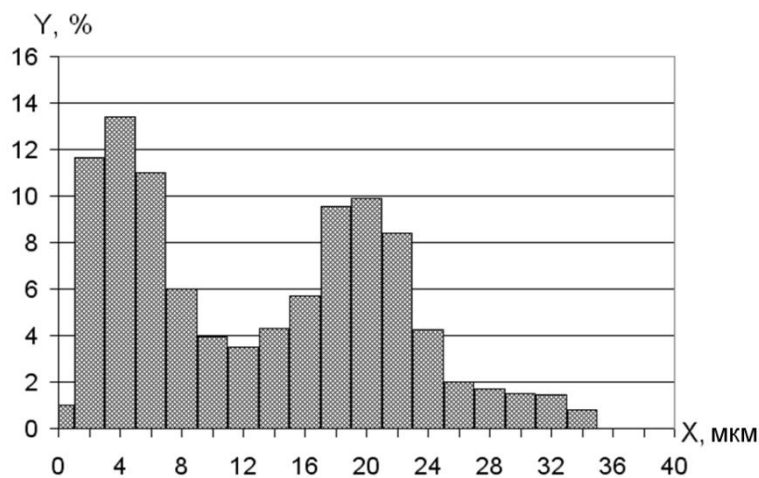


Рисунок 7.14 – Распределение капель формируемого аэрозоля

Таким образом, в предлагаемой конструкции происходит двойное фокусирование ультразвуковых колебаний:

- 1) в металлическом концентраторе;
- 2) в малом объеме жидкости, находящейся в полости 5 (в активной зоне распылителя).

Это позволяет говорить об эффективности применения предлагаемого аэрозольного аппарата для генерации аэрозоля с заданными дисперсными характеристиками. Об энергетической эффективности предлагаемой конструкции распылителя можно судить по степени фокусировки ультразвуковой энергии в материале концентратора 3 (рисунок 7.15). Интенсивность звуковой энергии в полости 5 в центре торцевой поверхности 4 (в распылительной камере) не менее чем в 30 раз превосходит интенсивность звуковой энергии на поверхности пьезоэлектрических пластин 2, при этом в процессе распыления воды с производительностью распыления 1 мл /мин расходуется не более 3 Вт электрической энергии. Все это позволяет говорить о высокой энергетической эффективности преобразователя.

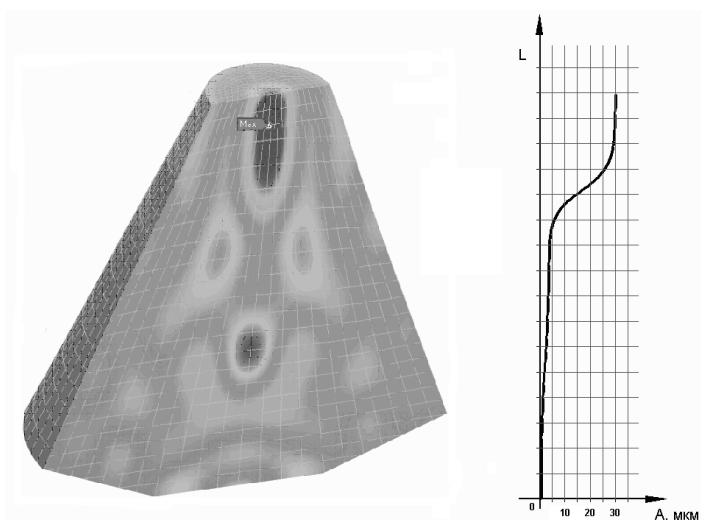


Рисунок 7.15 – Фокусирование УЗК в концентраторе

Такая конструкция ультразвукового аэрозольного аппарата позволяет создать портативные ультразвуковые аэрозольные аппараты, в которых отсутствует возможность вытекания распыляемой жидкости. Применение такого аэрозольного аппарата максимально просто – аналогично применению ингалятора для астматиков. Нажал кнопку – происходит генерация аэрозоля. Однако в отличие от существующих портативных ингаляторов, использующих гидродинамический способ распыления, в предложенном устройстве формируется мягкий равномерный аэрозоль, легко проникающий в альвеолы легких.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Радж Балдаев** Применения ультразвука. [Текст] / Р. Балдаев, В. Раджендран. – М.: Издательство Техносфера, Паланичами, 2006. – 576 с.
2. **Шутилов, В.А.** Основы физики ультразвука [Текст] / В.А. Шутилов. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1980. – 280 с.
3. **Розенберг, Л.Д.** Источники мощного ультразвука [Текст] / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 380 с.
4. **Новицкий, Б.Г.** Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) [Текст] / Б.Г. Новицкий. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
5. **Хмелев, В. Н.** Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности [Текст] / В. Н. Хмёлев [и др.]. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 416 с.
6. **Касаткин, А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А. Г. Касаткин. – 9-е изд. – М.: Химия, 1973. – 750 с.
7. **Агранат, Б.А.** Основы физики и техники ультразвука [Текст] / Б.А. Агранат [и др.]. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
8. **Теумин, И.И.** Ультразвуковые колебательные системы [Текст] / И.И. Теумин. – М.: Машгиз, 1959. – 331 с.
9. **Жуков, С.Н.** Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение [Текст] / С.Н. Жуков. – Минск: ООО «ФУАинформ», 2003. – 112 с.
10. **Кикучи, Е.** Ультразвуковые преобразователи [Текст] / Е. Кикучи. – М.: Мир, 1972. – 424 с.
11. Ультразвуковое оборудование [Электронный ресурс]. – ПКФ ООО «Сапфир». – Режим доступа: <http://www.sapphire.ru/>.
12. Active ULTRASONICS [Электронный ресурс]. – Innovative & Unique Ultrasonic Solutions. – Режим доступа: <http://activeultrasonics.com/>.
13. **Khmelev, V.N.** System of Phase–Locked–Loop Frequency Control of Ultrasonic Generators [Текст] / 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.
14. **Хмелев, В.Н.** Способ повышения качества работы систем ФАПЧ электронных ультразвуковых технологических аппаратов [Текст] / В.Н. Хмелев [et al.] // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник / под ред. Г.В. Леонова. – Бийск, 2002. – С. 178–184.
15. **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. Серия «Технологическая системотехника». – 2004. – Вып. 2. – С. 32–40.

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

17. **Хмелев, В.Н.** Способ управления работой ультразвукового технологического аппарата для оптимизации ультразвукового воздействия [Текст] / В.Н. Хмелев, И.И. Савин, Р.В. Барсуков // Известия Тульского государственного университета. Серия «Технологическая системотехника». – Тула, 2006. – Вып. 6. – С. 12–18.

18. **Хмелев, В.Н.** Полуволновые пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы [Электронный ресурс] / В.Н. Хмелев [и др.] // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2005. – 26. – 12 с. – Режим доступа: <http://www.ejta.org/ejta/rus/abstracts2005rus/khmelev2rus.shtml>

19. **Эльпинер, И.Е.** Биофизика ультразвука [Текст] / И.Е. Эльпинер. – М.: Наука, 1973. – 384 с.

20. **Маргулис, М.А.** Звукотехнические реакции и сонолюминисценция [Текст] / М.А. Маргулис. – М.: Химия, 1986. – 300 с.

21. **Молчанов, Г.И.** Ультразвук в фармации [Текст] / Г.И. Молчанов. – М.: Медицина, 1980.

22. **Кардашев, Г.А.** Физические методы интенсификации процессов химической технологии [Текст] / Г.А. Кардашев. – М.: Химия, 1990. – 208 с.

23. **Заяс, Ю.Ф.** Ультразвук и его применение в технологических процессах мясной промышленности [Текст] / Ю.Ф. Заяс // Пищевая промышленность. – 1970.

24. **Рогов, И.А.** Физические методы обработки пищевых продуктов [Текст] / И.А. Рогов, А.В. Горбатов // Пищевая промышленность. – 1974.

25. **Шерстюк, В.М.** Физические методы обработки рыбы [Текст] / В.М. Шерстюк, П.Д. Беляев // Пищевая промышленность. – 1971. – С. 148.

26. **Соколов, А.А.** Получение с помощью ультразвука эмульсии животных жиров с их использование в колбасном производстве [Текст] / А.А. Соколов, Ю.Ф. Заяс // Мясная промышленность СССР. – 1962. – № 1. – С. 46

27. **Акопян, В.Б.** Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. Ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии [Текст] / В.Б. Акопян, Ю.А. Ершов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 225 с.

28. Ультразвуковой ингалятор [Текст]: 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.: ил.

29. **Экнадиосянц, О.К.** Получение аэрозолей [Текст] / О.К. Экнадиосянц // Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – С. 337–395.

30. **Келлер, О.К.** Ультразвуковая очистка [Текст] / О.К. Келлер, Г.С. Кротыш, Г.Д. Лубяницкий. – Л.: Машиностроение, 1977. – 325 с.

31. 31. Каталог разработанного оборудования лаборатории акустических процессов и аппаратов . – 2010 . – 45 с. – Режим доступа: <http://ultrasonic.ru/downloads/price/catalogproduct.pdf>

32. Ультразвуковая колебательная система [Текст]: пат. №2141386 Российская Федерация: МПК⁶ В06В3/00 / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 97120873/28; заявл. 15.12.97; опубл. 20.11.99, Бюл. № 20. – 3 с.: ил.

33. **Хмелев, В.Н.** Ультразвуковой рабочий инструмент для пластической хирургии [Текст] / В.Н. Хмелев [и др.] // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник / под ред. Г.В. Леонова. – Бийск, 2002. – С. 203–212.

34. Ультразвуковая колебательная система для пластической хирургии [Текст]: пат. №2239383 Российская Федерация: МПК⁷ А61В18/00, 17/32 / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Сливин А.Н., Шалунов А.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №2002135760; заявл. 30.12.02; опубл. 10.11.04, Бюл. № 31. – 4 с.: ил.

35. **Марков, А.И.** Ультразвуковая обработка материалов [Текст] / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с., ил.

36. **Кумабе, Д.** Вибрационное резание [Текст] / Д. Кумабе; пер. с англ. изд. С.Л. Масленникова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

37. Способ управления процессом ультразвуковой размерной обработки [Текст]: пат. 2131794 Российская Федерация: МПК⁶ В23В37/00 / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №98105730/02; заявл. 26.03.98; опубл. 20.06.99, Бюл. № 17. – 4 с.: ил.

38. **Хмелев, В.Н.** Ультразвуковая размерная обработка материалов [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок. – Барнаул: АлтГТУ, 1999. – 123 с.

39. **Хмелев, В.Н.** Интенсификация процесса алмазного сверления с помощью ультразвуковых колебаний [Текст] / В.Н. Хмелев, А.М. Фирсов, В.В. Чириков // Измерение, контроль и автоматизация производственных процессов: материалы 4-й Международной конференции. В 3 т. Т. 3. – Барнаул, 1997. – С. 139–141.

40. Ультразвуковая колебательная система для размерной обработки [Текст]: пат. №2250814 Российская Федерация: МПК⁷ В24В1/04, В23В37/00, В06В1/08 / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Савин И.И., Чипурин

Е.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №2003129489/02; заявл. 02.10.03; опубл. 27.04.05, Бюл. № 12. – 3 с.: ил.

41. **Шестопал, А.Н.** Справочник по сварке и склеиванию пластмасс [Текст] / А.Н. Шестопал, Ю.С. Васильев, Э.А. Минеев. – Киев: Техніка, 1986. – 194 с.

42. **Зайцев, К.И.** Сварка пластмасс [Текст] / К.И. Зайцев, Л.Н. Мацюк. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.

43. **Холопов, Ю.В.** Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов [Текст] / Ю.В. Холопов. – Л.: Машиностроение, 1988.

44. **Волков, С.С.** Сварка пластмасс ультразвуком [Текст] / С.С. Волков, Б.Я. Черняк. – 9-е изд. – М.: Химия, 1986. – 256 с.

45. Устройство для сушки капиллярно-пористых сыпучих материалов [Текст]: пат. 2095707 Российская Федерация: МПК⁶ F26B17/12 / В.Н. Глазнев; заявитель и патентообладатель Институт теоретической и прикладной механики СО РАН. – № 95107580; заявл. 11.05.95; опубл. 10.11.97.

46. **Прохоренко, П.П.** Ультразвуковой капиллярный эффект / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежкунов, Г.Е. Коновалов. – Минск.: Наука и техника, 1981. – 135 с.

47. Открытие № 181 СССР. Ультразвуковой капиллярный эффект / Е.Г. Коновалов // Открытия. Изобретения. – 1977. – № 2.

48. **Верещагин, А.Л.** Влияние ультразвукового облучения и регуляторов роста на ризогенную активность растительных объектов: монография [Текст] / А.Л. Верещагин, А.Н. Хмелева; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: АлтГТУ, 2010. – 74 с.

49. **Педдер, В.В.** «Обратный» ультразвуковой капиллярный эффект и некоторые направления его клинического применения / В.В. Педдер и др. // X-я международная конференция-семинар EDM 2009, 1-6 июля, Эрлагол. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного технического ун-та. 2009. – С 414–423.

50. Ультразвуковое оборудование для липосакции Mentor – Режим доступа: www.mentorcorp.com

51. Ультразвуковое оборудование для липосакции **UltraShape Contour I** – Режим доступа: www.ultrashape.com

52. **Хмелев, В.Н.** Ультразвуковое распыление жидкостей: монография [Текст] / 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.

Учебное издание

Хмелев Владимир Николаевич
Сливин Алексей Николаевич
Барсуков Роман Владиславович
Цыганок Сергей Николаевич
Шалунов Андрей Викторович

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Курс лекций

Редактор Соловьева С.В.

Подписано в печать 17.05.2009. Формат 60×84 1/16

Усл. п. л. – 11,6. Уч.-изд. л. – 12,5

Печать – ризография, множительно-копировальный
аппарат «RISO EZ-300»

Тираж 100 экз. Заказ 2009–36

Издательство Алтайского государственного
технического университета
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Оригинал-макет подготовлен ИИО БТИ АлтГТУ
Отпечатано в ИИО БТИ АлтГТУ
659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27



Хмелев Владимир Николаевич

Доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, лауреат премии Алтайского края в области науки и техники.

Специалист в области создания и применения ультразвуковых колебаний высокой интенсивности.

Автор более 400 печатных работ, 65 патентов.



Сливин Алексей Николаевич

Кандидат технических наук, доцент, лауреат премии Алтайского края в области науки и техники.

Специалист в области применения ультразвуковых колебаний для процессов сварки термопластических полимерных материалов.

Автор более 100 печатных работ, 14 патентов.



Барсуков Роман Владиславович

Кандидат технических наук, доцент, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники для молодых ученых, лауреат премии Алтайского края в области науки и техники.

Специалист в области проектирования ультразвуковых электронных генераторов.

Автор более 200 печатных работ, 20 патентов.



Цыганок Сергей Николаевич

Кандидат технических наук, доцент, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники для молодых ученых, лауреат премии Алтайского края в области науки и техники.

Специалист в области проектирования ультразвуковых колебательных систем.

Автор более 200 печатных работ, 20 патентов.



Шалунов Андрей Викторович

Кандидат технических наук, доцент, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники для молодых ученых, лауреат Всероссийского конкурса «Инженер года».

Специалист в области интенсификации технологических процессов в газовых средах под действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности.

Автор более 200 печатных работ, 15 патентов.

