

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Н. К. Толочко, А. Н. Челединов**

**КАВИТАЦИОННЫЕ  
МОЕЧНО-ОЧИСТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ  
В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Минск  
БГАТУ  
2018

**Толочко, Н. К.** Кавитационные моечно-очистные технологии и их применение в сельском хозяйстве / Н. К. Толочко, А. Н. Челединов. – Минск : БГАТУ, 2018. – 284 с. : ил. – ISBN 978-985-519-942-8.

Рассмотрены современное состояние и перспективы развития кавитационных моечно-очистных технологий в сельском хозяйстве, особенности их применения для очистки поверхностей деталей сельскохозяйственной техники и плодовоовощных продуктов от различных загрязнений.

Монография адресуется научным, инженерным и производственным работникам, специализирующимся в агропромышленной сфере, а также студентам аграрных и технических вузов, магистрантам, аспирантам и преподавателям, интересующимся проблемами научно-технологического развития агропромышленного производства.

Табл. 22. Ил. 174. Библиогр.: 337 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Учреждения образования «Белорусский государственный  
аграрный технический университет»  
(протокол № 1 от 22.01.2018 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры  
электронной техники и технологии Белорусского государственного  
университета информатики и радиоэлектроники *В. Л. Ланин*;  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
технологии металлов Белорусского государственного  
аграрного технического университета *В. М. Катцевич*

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Разновидности загрязнений и методы контроля загрязненности поверхностей.....	7
1.1. Загрязнения сельскохозяйственной техники.....	7
1.2. Загрязнения плодоовощных продуктов.....	14
1.3. Методы контроля загрязненности поверхностей.....	22
2. Разновидности технологий очистки поверхностей.....	34
2.1. Моечно-очистная обработка.....	34
2.2. Травление.....	51
2.3. Механическая обработка.....	52
2.4. Обработка физическими воздействиями.....	54
2.5. Обработка дезинфектантами и биопрепаратами.....	56
3. Общая характеристика процессов кавитационной очистки.....	58
3.1. Возникновение и развитие кавитации.....	58
3.2. Основные закономерности кавитационной очистки.....	61
3.3. Особенности действия кавитации на микроорганизмы и насекомых-вредителей.....	81
4. Технологии гидрокавитационной очистки.....	85
4.1. Гидродинамические излучатели.....	85
4.2. Моющие жидкости для гидрокавитационной очистки.....	100
5. Технологии акустико-кавитационной очистки.....	107
5.1. Ультразвуковые колебательные системы.....	107
5.2. Ультразвуковое моечно-очистное оборудование.....	110
5.3. Особенности очистки труднодоступных поверхностей.....	119
5.4. Моющие жидкости для акустико-кавитационной очистки.....	123
6. Технологии абразивно-кавитационной очистки.....	127
6.1. Абразивная гидрокавитационная очистка.....	127
6.2. Абразивная акустико-кавитационная очистка.....	135
7. Кавитационная очистка деталей сельскохозяйственной техники.....	137
7.1. Очистка от масляно-грязевых загрязнений.....	137
7.2. Очистка от углеродистых загрязнений.....	139
7.3. Очистка от окалины, накипи и продуктов коррозии.....	143
7.4. Очистка от старых лакокрасочных покрытий.....	147
7.5. Очистка от шаржированных частиц.....	147
8. Кавитационная очистка плодоовощных продуктов.....	149

8.1. Очистка от загрязнений микроорганизмами.....	149
8.2. Очистка от загрязнений пестицидами.....	159
8.3. Очистка от загрязнений насекомыми-вредителями.....	177
9. Влияние кавитации на качество очищаемых объектов.....	181
9.1. Качество деталей сельскохозяйственной техники.....	181
9.2. Качество плодоовощных продуктов.....	197
10. Способы обеспечения равномерной кавитационной очистки.....	211
10.1. Обеспечение равномерной гидрокавитационной очистки....	211
10.2. Обеспечение равномерной акустико-кавитационной очистки.....	214
10.3. Ультразвуковые моечно-очистные МММ системы.....	244
11. Перспективы развития технологий кавитационной очистки в сельском хозяйстве.....	245
11.1. Ремонт и техническое обслуживание сельскохозяйственной техники.....	245
11.2. Хранение и переработка плодоовощных продуктов.....	248
Список использованной литературы.....	251

## ВВЕДЕНИЕ

Моечно-очистная обработка является одним из наиболее распространенных технологических процессов в сельском хозяйстве. Она широко применяется для удаления разнообразных загрязнений с поверхностей деталей сельскохозяйственной техники и плодоовощных продуктов.

На деталях тракторов сельскохозяйственных и транспортных машин во время их работы постоянно скапливаются эксплуатационные загрязнения, которые по мере накопления отрицательно влияют на рабочие характеристики техники. Кроме того, в процессе производства и ремонта деталей их поверхность покрывается технологическими загрязнениями, которые вызывают снижение качества выполняемых производственно-ремонтных работ. К основным видам загрязнений деталей относятся масляно-грязевые и углеродистые загрязнения, окалина, накипь, продукты коррозии, остатки старых лакокрасочных покрытий, шаржированные частицы. Плодоовощные продукты загрязняются в основном микроорганизмами, остатками пестицидов и насекомых, а также пылью и грунтом. Все эти загрязнения необходимо удалять с поверхности продуктов перед их переработкой или отправкой на хранение, а также перед использованием в пищу в свежем виде.

В последние годы для удаления загрязнений с поверхностей деталей сельскохозяйственной техники и плодоовощных продуктов получают все более широкое распространение кавитационные моечно-очистные технологии, которые характеризуются высокой производительностью и качеством очистки, и, кроме того, позволяют существенно уменьшить или полностью исключить применение моющих химических средств, обычно используемых в традиционных моечно-очистных технологиях. Существуют следующие разновидности кавитационной моечно-очистной обработки: гидрокавитационная и акустико-кавитационная, а также абразивно-кавитационная обработка. Все они имеют те или иные особенности в условиях реализации, в конструкции и технических характеристиках оборудования и, соответственно, в достигаемых эффектах очистки. Знание этих особенностей необходимо для обеспечения рационального выбора кавитационных технологий, их наиболее эффективного применения с учетом конкретных свойств обрабатываемых поверхностей и удаляемых с них загрязнений.

Монография посвящена всестороннему рассмотрению современного состояния и перспектив развития кавитационных моечно-очистных технологий, опыта их применения в сельском хозяйстве для удаления загрязнений с поверхностей деталей сельскохозяйственной техники и плодоовощных продуктов.

Книга адресуется специалистам в области сельскохозяйственного производства. При этом основная цель авторов книги заключается в том, чтобы обратить внимание на значительные потенциальные возможности кавитационных моечно-очистных технологий и тем самым способствовать более широкому применению этих технологий в сельском хозяйстве. Монография также может быть полезна студентам аграрных и технических вузов, магистрантам, аспирантам и преподавателям, интересующимся проблемами научно-технологического развития сельского хозяйства.

# 1. РАЗНОВИДНОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

## 1.1. Загрязнения сельскохозяйственной техники

Все загрязнения поверхности деталей сельскохозяйственной техники по месту и времени своего образования делятся на две большие группы: эксплуатационные и технологические. Первые образуются в процессе эксплуатации сельскохозяйственной техники, вторые – в процессе ее производства и ремонта [1–4]. И эксплуатационные, и технологические загрязнения по химическому составу могут быть органическими и неорганическими, а также комбинированными, представляющими собой сочетания органических и неорганических загрязнений [5]. Эксплуатационные загрязнения по мере накопления отрицательно влияют на рабочие характеристики машин, технологические загрязнения вызывают снижение качества выполнения производственно-ремонтных работ [6].

Разнообразные загрязнения поверхностей деталей имеют свои особенности, которые необходимо учитывать при выборе методов очистки и определении рациональных условий проведения очистных процессов [7, 8]. Загрязнения могут характеризоваться разной стойкостью к разрушающим воздействиям, толщиной образовавшегося слоя, силой сцепления с поверхностью детали и занимаемой площадью на поверхности и, в конечном счете, разной трудоемкостью удаления. Кроме того, загрязнения могут находиться в разных местах конструкции машины – как в легко-, так и в труднодоступных. С учетом этих и других особенностей загрязнений для их удаления следует применять универсальные очистные технологии, обеспечивающие высокую степень полноты очистки сельскохозяйственной техники [4].

Наиболее трудновыполняемыми являются работы по очистке двигателей машин. Между тем к качеству выполнения этих работ предъявляются повышенные требования с учетом их большой практической важности. Так, некачественная очистка блоков цилиндров и их головок от нагара и накипи приводит к снижению эффективной мощности двигателей на 5–8 %, увеличению расхода горюче-смазочных материалов на 10–20 %, а из-за некачественной очистки деталей в процесс сборки двигателей послеремонтный ресурс снижается на 25–30 % [9].

## Эксплуатационные загрязнения

Загрязнения, образующиеся во время эксплуатации сельскохозяйственной техники, могут существенно различаться по своему составу и накапливаемому количеству в зависимости от того, на каких поверхностях деталей они образуются – наружных или внутренних.

На наружных поверхностях деталей скапливаются дорожная пыль и грязь; остатки смазочных материалов, ядохимикатов, удобрений, растительности, перевозимых грузов (цемент, бетон, асфальт и др.); продукты коррозии [2, 5, 6]. В тех случаях, когда пыль и грязь попадают на поверхности, загрязненные маслом, либо, наоборот, когда масло попадает на поверхности, загрязненные пылью и грязью, формируются масляно-грязевые отложения [3].

Особым видом загрязнений наружных поверхностей являются отслоившиеся лакокрасочные покрытия [2].

На внутренних поверхностях деталей скапливаются масляные отложения в сочетании с продуктами изнашивания и углеродистые отложения [1, 2]. К последним относятся: асфальтосмолистые отложения, представляющие собой плотные, не растворяющиеся в масле мазеподобные сгустки; лаковые отложения в виде пленок, образующихся в результате послыйного окисления масла; нагар в виде твердых углистых частиц, образующихся при сгорании масла и топлива.

Особым видом загрязнений внутренних поверхностей является накипь – осадки содержащихся в воде солей металлов [1, 2].

Как правило, все эксплуатационные загрязнения образуются преимущественно на поверхностях деталей определенных типов – с учетом особенностей конструкции машин и условий их эксплуатации (табл. 1.1) [1, 2].

Таблица 1.1

Эксплуатационные загрязнения поверхностей деталей машин

Виды загрязнений	Загрязняемые детали
Остатки смазочных материалов	Корпусные детали, валы, шатуны, детали системы смазки
Пыле-грязевые загрязнения	Детали ходовой части, кабины, кузова, рамы
Масляно-грязевые загрязнения	Наружная поверхность двигателя и коробки передач
Продукты коррозии	Детали шасси, кабины, кузова, рамы



Виды загрязнений	Загрязняемые детали
Асфальтосмолистые отложения	Стенки картеров, щеки коленчатых валов, распределительные шестерни, шатуны, картер блока цилиндров, масляные насосы и фильтры, маслопроводы
Лаковые пленки	Шатуны, поршни
Нагар	Детали двигателей: стенки камеры сгорания, клапаны, свечи, днище поршня, выпускной трубопровод, распылители форсунок, головки цилиндров
Накипь	Детали системы водяного охлаждения двигателя: стенки рубашек охлаждения двигателя и радиатора
Отслоившиеся лакокрасочные покрытия	Детали кабины, кузова, рамы, крылья

Разные виды эксплуатационных загрязнений имеют особенности в характере своего накопления на поверхностях деталей (табл. 1.2) [1].

Таблица 1.2

Особенности накопления эксплуатационных загрязнений на поверхностях деталей автомобиля

Виды загрязнений	Максимальная толщина слоя загрязнения, мм	Максимальная площадь загрязненной поверхности, %*	
		автомобиля**	двигателя
Дорожная грязь	30	70	-
Масляно-грязевые загрязнения	10	10	15
Продукты коррозии	20	10	5
Асфальтосмолистые отложения	3	1	2
Нагар	10	-	3
Накипь	5	1	2
Отслоившиеся лакокрасочные покрытия	1	90	70

Примечания.\*Суммарная площадь поверхностей автомобилей и их агрегатов составляет 75–150 м<sup>2</sup>, площадь двигателей и их деталей – 10–25 м<sup>2</sup>.

\*\*Без двигателя

Особое внимание уделяется удалению эксплуатационных загрязнений с деталей двигателей внутреннего сгорания, поскольку условия работы двигателей способствуют окислению кислородом воздуха части углеводородов топлива и масла, что приводит к образованию различных продуктов окисления – альдегидов, кетонов, эфиров, карбоновых и других кислот и кислотосодержащих продуктов, откладывающихся на деталях двигателя [10]. В дальнейшем эти соединения, подвергаясь конденсации и полимеризации, превращаются в сложные высокомолекулярные вещества. Кроме указанных органических веществ, на поверхности деталей со временем накапливаются мельчайшие частицы сажи – коксообразных веществ, являющихся продуктами сгорания и термического распада топлива и масла, а также неорганические вещества – пыль и продукты износа деталей.

Большую сложность представляет удаление эксплуатационных загрязнений с деталей топливной аппаратуры дизельных и карбюраторных двигателей, что обуславливается наличием на поверхности деталей трудноудаляемых загрязнений типа нагаров и лаковых отложений, конструктивной сложностью очищаемых деталей и высокими требованиями к качеству очистки [11]. Трудность удаления нагаров и лаковых отложений связана с тем, что в их составе присутствуют соединения, которые практически не поддаются растворению в моющих растворах. Такие загрязнения обычно образуются на распылителях форсунок. Их появление является результатом неполного сгорания, образования продуктов термического крекинга и глубокого окисления топлива. Уплотняясь, продукты окисления образуют высокомолекулярные соединения, которые откладываются на поверхностях деталей в виде тонкой лаковой пленки, обладающей большой липкостью и удерживающей на своей поверхности углеродистые частицы сгоревшего топлива и масла.

На деталях газовой топливной аппаратуры образуются эксплуатационные загрязнения, которые в общей своей массе состоят из углеводородов серий  $C_nH_{2n+1}$  и  $C_nH_{2n-1}$ , элементарной серы, меркаптанов (пентадекантиол), пластификаторов (дибутилфталат и диоктилфталат) и большого количества механических примесей [12]. Механизм образования загрязнений может быть объяснен составом компримированного природного газа, используемого

в качестве топлива, условиями эксплуатации топливной аппаратуры, а также химическими преобразованиями самих загрязнений.

О важности проблемы загрязнения деталей топливной аппаратуры двигателей можно судить на примере форсунок дизельных двигателей [13].

Около 40 % неисправностей этих двигателей приходится на топливную аппаратуру, причем около 80 % отказов и свыше 40 % затрат на устранение неисправностей топливной аппаратуры связано с распылителями форсунок, которые являются наиболее уязвимыми элементами топливной аппаратуры, поскольку в процессе работы подвергаются воздействию высоких температур, химически активных продуктов сгорания, переменных давлений топлива и цилиндрических газов.

Обычно нарушения в работе форсунок возникают через 500–1000 часов работы дизельных двигателей из-за накопления загрязнений (закоксовывания) на внутренних и наружных поверхностях корпуса и иглы распылителя, обусловленных термоокислительными превращениями топлива при высоких температурах, прорывом газов во внутреннюю полость распылителя и других факторов. В результате закоксовывания распылителей повышается неравномерность подачи топлива по распыливающим отверстиям и изменяется характеристика впрыска, что приводит к падению мощности двигателя, увеличивает дымность отработавших газов и расход топлива, т. е. происходит отклонение от оптимальных параметров процесса смесеобразования и горения топлива в цилиндре.

Как показывает анализ распылителей, поступающих на ремонтные предприятия, большинство из них (свыше 90 %) имеют дефекты, обусловленные закоксовыванием, поэтому очистка распылителей является важнейшим элементом технологического процесса их ремонта.

Типовая схема накопления загрязнений на поверхностях распылителя форсунки показана на рис. 1.1 [13]. Основными видами загрязнений являются: наружная поверхность корпуса – нагар, сажистые отложения; внутренняя поверхность корпуса – нагар, асфальтосмолистые и лаковые отложения, а в распыливающих отверстиях и колодце – кокс; игла – лаковые отложения, а на кончике иглы – нагар.

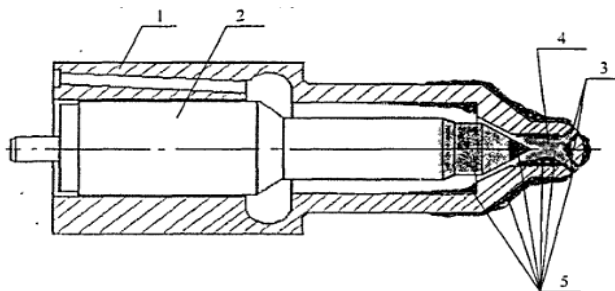


Рис. 1.1. Схема накопления загрязнений на поверхностях распылителя:  
 1 – корпус; 2 – игла; 3 – распыливающие отверстия;  
 4 – колодец; 5 – загрязнения

На загрязненной поверхности иглы можно выделить четыре наиболее характерные зоны: кончик иглы, запорный конус, шейка, несущая часть (рис. 1.2) [13].

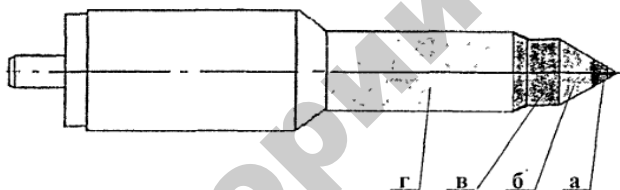


Рис. 1.2. Наиболее характерные зоны на поверхности иглы распылителя:  
 а – кончик иглы; б – запорный конус; в – шейка; г – несущая часть

### Технологические загрязнения

Загрязнения, образующиеся во время производства и ремонта сельскохозяйственной техники, накапливаются в гораздо меньшем количестве, чем эксплуатационные загрязнения. Они образуются на поверхностях деталей при осуществлении определенных видов их обработки (табл. 1.3) [1, 2, 14, 15] и перед определенными видами обработки подлежат удалению [10]. В частности, высокие требования к очистке деталей от загрязнений предъявляются перед нанесением покрытий, для того чтобы обеспечить их надежное сцепление с поверхностями деталей. При недостаточной очистке деталей от загрязнений происходит их интенсивный износ в процессе приработки поверхностей трения. Как правило, детали подлежат тщательной очистке от загрязнений перед проведением монтажно-сборочных работ [2].

Разнообразные загрязнения возникают на поверхности корпусных деталей двигателей внутреннего сгорания в процессе их изготовления. К ним относятся продукты обработки лезвийным инструментом, пленки эмульсии смазочно-охлаждающих средств, остатки от доводочных и притирочных паст и др. [16].

Таблица 1.3

Технологические загрязнения поверхностей деталей машин

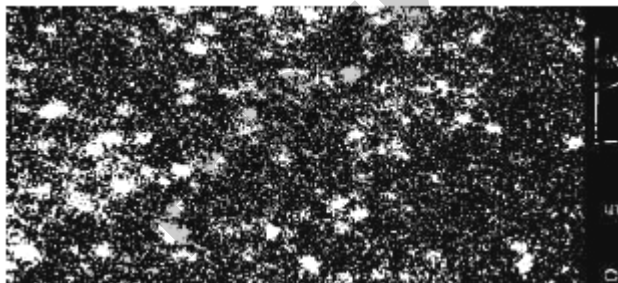
Виды обработки	Виды загрязнений
Обработка резанием	Стружка, опилки, абразивные частицы (в том числе шаржированные), остатки притирочных, шлифовальных и полировальных паст и смазочно-охлаждающих жидкостей
Обработка давлением и литьем	Графитные и жировые смазки, пригары, формовочная земля
Термообработка	Окалина, покрытая пленкой пригоревшего масла; окислы, сажа
Сварка и пайка	Остатки флюсов и шлаков, окалина
Обкатка	Продукты изнашивания

Технологические загрязнения, могут возникать на поверхностях не только деталей, но и технологической оснастки, применяемой при их производстве или ремонте. Типичным тому примером являются отложения на поверхности оформляющих полостей пресс-форм, используемых в термопластавтоматах для изготовления полимерных изделий литьем под давлением [17]. Причины их образования связаны с термодеструкцией полимерных материалов. Своевременная очистка пресс-форм от этих загрязнений способствует сохранению требуемого качества изготавливаемых изделий и продлению срока службы пресс-форм.

Поверхности деталей машин перед хранением и транспортировкой покрывают консервационными смазками, которые затем приходится удалять при последующем вводе машин в эксплуатацию [14].

Особым видом технологических загрязнений являются шаржированные частицы, которые отличаются своими физико-химическими свойствами и характером сцепления с поверхностью и поэтому требуют для удаления нестандартных подходов к организации очистных

процессов [10, 18]. Наличие шаржированных частиц на поверхностях деталей является следствием их финишной обработки, осуществляемой с применением абразива (доводочных паст). Такой обработке обычно подвергаются детали прецизионных узлов автотракторной техники, например, детали топливной аппаратуры, гидропривода и др. В процессе абразивной обработки создаются условия, при которых абразивные частицы вдавливаются и закрепляются на обрабатываемой поверхности, т. е. происходит шаржирование поверхности абразивом. Вдавливание абразивных частиц в поверхность происходит при больших удельных давлениях, что приводит к появлению прочных механических связей шаржированных частиц с поверхностью детали. Как правило, шаржированные частицы представляют собой осколки разрушенных в процессе доводки абразивных зерен (рис. 1.3 [19]). Остающиеся на поверхности деталей шаржированные частицы весьма негативно влияют на надежность работы прецизионных узлов, вызывают ускоренный износ сопрягаемых пар, затрудняют сборку узлов.



*Рис. 1.3* Частицы абразива, шаржированные в поверхность образца из стали ХВГ при вибродоводке (x 2000)

## 1.2. Загрязнения плодоовощных продуктов

Плодоовощные продукты, употребляемые в пищу в свежем виде или же подвергаемые переработке, должны соответствовать определенным санитарно-гигиеническим требованиям. Их безопасность в существенной мере определяется наличием на их поверхности загрязнений, попадание которых в организм человека может причинять вред здоровью. Кроме того, загрязнения поверхности приводят

к ухудшению сохранности продуктов. Поэтому поверхность плодов и овощей перед их использованием в пищу или для переработки, а также перед отправкой на хранение подвергаются очистке от загрязнений. Основными видами загрязнений поверхности плодоовощных продуктов являются пыль и остатки почвы, микроорганизмы, остатки пестицидов и насекомых. Все эти загрязнения удаляются в большинстве случаев путем мойки продуктов [8, 19–24].

### **Пылевые и почвенные загрязнения**

На поверхность плодоовощных продуктов, особенно если они выращиваются на открытом грунте, осажается атмосферная пыль [25, 26]. Вместе с ней на поверхность попадают микроорганизмы, различные химические соединения. При этом наибольшему загрязнению подвергаются продукты, выращиваемые промышленным способом в местах, расположенных вблизи источников загрязнения атмосферы (производственных предприятий, транспортных магистралей). Гораздо более чистыми являются продукты, выращиваемые на участках личного подворья в экологически чистых условиях.

Пылевые загрязнения образуются на поверхности любых видов плодоовощных продуктов. В отличие от них почвенные загрязнения образуются в основном на поверхности овощей. Обычно они формируются в виде комочков почвы различного состава – в соответствии с видами почв (суглинок, торф, песок и др.) [19, 26]. Наибольшей загрязненностью характеризуются корнеплоды, что связано с условиями их произрастания. Особенно много трудноудаляемых остатков почвы скапливается в углублениях ребристых поверхностей и в глазках корнеплодов. Вместе с остатками почвы, так же как и вместе с пылью, на поверхность попадают микроорганизмы. Кроме того, следует учитывать, что в почве, остающейся на поверхности продуктов, содержатся минеральные удобрения.

Наличие остатков почвы на поверхности продуктов резко снижает скважистость в их слоях, уложенных на хранение, что вызывает увеличение сопротивления потоку воздуха при их активном вентилировании [20].

### **Загрязнения микроорганизмами**

На поверхности плодоовощных продуктов могут находиться различные виды микроорганизмов, в основном это бактерии, грибы (плесень) и дрожжи. Одни из них являются типичными для вегетирующих

растений, другие появляются случайным образом: заносятся насекомыми, птицами или ветром, попадают вместе с атмосферной или почвенной влагой, пылью, почвенным грунтом [27].

Значительная часть микроорганизмов пребывает в неактивном состоянии. Однако немало и таких микроорганизмов, которые растут и размножаются, питаясь нормальными выделениями растительных тканей и имеющихся на поверхности растений органических загрязнений [25, 27]. Эти микроорганизмы не только участвуют в процессах заболеваний и порчи продуктов, но также причиняют вред здоровью людей (например, дизентерийные и брюшнотифозные бактерии, возбудители ботулизма и др.), причем сроки выживания многих из них на продуктах могут быть довольно велики (до нескольких недель).

Количество микроорганизмов на поверхности здоровых плодов и овощей колеблется в широких пределах – от десятков до сотен тысяч, а иногда и более на  $1 \text{ см}^2$  [24]. Их численный и видовой состав зависит от многих факторов: сорта и степени зрелости продуктов, условий выращивания (климатических, метеорологических, свойств почвы, агротехнических приемов и др.), сроков и способов уборки и транспортировки.

Многие бактерии (*Bacillus*, *Salmonella*, *Listeria*, *Staphylococcus*, *Escherichia* и др.), осаждающаяся на поверхности плодов и овощей, способны формировать биопленки, представляющие собой скопления микроорганизмов, в которых клетки довольно прочно сцеплены друг с другом и с поверхностью [28–34].

Растения имеют защитную систему против микроорганизмов [27]. Во-первых, микроорганизмы обычно не могут попасть внутрь неповрежденных плодов и овощей, поскольку они задерживаются специальными тканевыми структурами, предохраняющими растения от механических воздействий и высыхания. Во-вторых, в растительных клетках имеются защитные вещества: красящие (антоцианы, флавоноиды), эфирные масла, дубильные вещества, органические кислоты, фитонциды. В-третьих, живые растения способны активно реагировать на внедрение в них возбудителей болезней путем выработки специфических антимикробных веществ – фитоалексинов, имеющих преимущественно фенольную природу.

Поверхность большинства плодов и овощей характеризуется гидрофобностью, главным образом из-за эпикутикулярного воска [35]. Гидрофобная природа поверхности продуктов уменьшает



вероятность водного доступа к ним бактерий. Сцепление клеток с поверхностью усиливается, если поверхности характеризуется шероховатостью [36–38]. Определенную роль в прилипании бактерий к поверхности играют состав поверхности, поверхностный заряд и свободная поверхностная энергия растений, а также температура [39]. Предполагается, что для разных микроорганизмов существуют некоторые оптимальные температуры прилипания [40].

Как правило, свежие (только что собранные) плоды и овощи могут оставаться жизнеспособными в течение длительного срока, в них протекают физиологические процессы, свойственные растительным организмам. Однако со временем в них происходят необратимые изменения, характеризующие их старение, ослабевают их природные иммунные свойства, в результате чего они становятся более подверженными вредному действию микроорганизмов.

Интенсивность развития микроорганизмов в плодах и овощах определяется их видовыми особенностями и физиологическим состоянием, а также свойствами среды, в которой они хранятся [24]. Инфицированию продуктов способствуют биологические (перезревание, переохлаждение, обводнение) и механические (проколы, потертости, царапины) повреждения. Болезни плодов и овощей (так называемые «гнили») чаще всего вызываются плесневыми грибами, реже – дрожжами и бактериями.

Хорошая сохранность плодов и овощей обеспечивается своевременностью их уборки (недозрелые и перезрелые продукты хранятся хуже) [27].

На сохранность плодоовощных продуктов также влияют условия хранения (температура, влажность, состав газовой среды), которые способны замедлять протекающие в них биохимические процессы, приводящие к их старению и перезреванию, обеспечивать сохранение природных свойств (иммунитета), тормозить развитие микроорганизмов [41, 42]. Лучше хранить фрукты в охлажденном состоянии (при температуре 1–5 °С) и при умеренной влажности. Сохранность продуктов улучшается при снижении концентрации кислорода в воздухе, так как при этом уменьшается интенсивность дыхания плодов и предотвращается развитие аэробных микроорганизмов – возбудителей порчи (это достигается при хранении плодов в атмосфере диоксида углерода).

Микроорганизмы могут входить в устьяца (поры в эпидермисе) и края разреза свежих плодов и овощей [33, 34]. Проникнув в растение, микроорганизмы могут мигрировать через его сосудистую систему [35]. Как отмечалось выше, проникновению микроорганизмов внутрь продуктов способствуют повреждения, которые приводят к их быстрой порче [25, 27]. Покровы плодов и овощей (их толщина, наличие кутикулы, воскового налета и др.) являются мощным барьером для микроорганизмов. Поэтому бережное обращение с плодами и овощами с целью сохранения целостности их покровов – один из главных путей снижения потерь продуктов питания. Повышенная опасность механического повреждения плодов и овощей возникает на заключительном этапе их хранения, когда в результате созревания происходит размягчение мякоти и снижается прочность продуктов.

Грязные плодоовощные продукты, содержащие на поверхности большое количество микроорганизмов, во время переработки вызывают микробные загрязнения технологического оборудования, которое подлежит очистке так же, как и сами продукты [27].

Типичные проблемы загрязнения плодовой продукции микроорганизмами можно рассмотреть на примере наиболее распространенного ее представителя – яблока [21, 25, 27].

Яблоки обладают многими лечебно-питательными свойствами, благодаря чему занимают важное место в рационе питания человека. Однако не вполне достаточное производство яблок и значительные потери при хранении (около 25 %) создают их дефицит, который является особенно ощутимым в зимне-весенний период. Одна из главных причин потерь яблок (как, впрочем, и других видов плодов) при хранении – это микробиологические заболевания, которые вызываются в основном бактериями, грибами и дрожжами. Развитие микроорганизмов на поверхности плодов существенно повышается при повреждениях поверхности, поскольку вытекающий из поврежденных мест сок служит питательным материалом для микроорганизмов.

Разрушение плодов под действием микроорганизмов называется гнилью. При этом вещества, входящие в состав плодов, подвергаются глубоким изменениям, а сами плоды деформируются, темнеют или буреют, их ткани разрыхляются и превращаются в полужидкую массу с неприятным запахом; в других случаях плоды становятся дряблыми, высыхают и превращаются в бесформенные комки.

Наиболее распространенными и вредоносными являются болезни, вызываемые грибами. Во время хранения плоды чаще всего поражаются плесневыми грибами. Высокая влажность воздуха в хранилище способствует развитию плесневых грибов. Наиболее энергично разрастаются плесневые грибы в том случае, если кожица плода повреждена и открыт доступ к богатой питательными веществами плодовой мякоти.

Преобладание грибов в процессах порчи объясняется кислой реакцией соков плодов и значительным содержанием в них углеводов. Такие условия для бактерий являются неблагоприятными. Бактерии участвуют в процессах разрушения плодов обычно в конечной стадии, когда благодаря жизнедеятельности грибов кислотность и содержание углеводов в разлагаемой среде снижаются.

Порча плодов также вызывается дрожжами, которые сбраживают содержащийся в них сахар в спирт и углекислый газ. В дальнейшем эти плоды подвергаются действию уксуснокислых бактерий и прокисают.

Активному развитию вредной микрофлоры способствуют физиологические заболевания плодов – результат нарушения метаболизма. Их развитие может быть обусловлено биологическими особенностями сорта, условиями выращивания, погодными условиями, сроками уборки, неблагоприятными условиями хранения.

### **Загрязнения пестицидами**

Пестициды представляют собой разнообразные по своей природе химические вещества, которые широко применяются в растениеводстве для повышения урожайности и качества сельскохозяйственных культур. Они наносятся на поля путем опрыскивания, при этом их большая часть осаждается на поверхность продуктов.

В зависимости от назначения пестициды подразделяются на различные виды: фунгициды и бактерициды – используются для борьбы с грибковыми и бактериальными болезнями растений, соответственно; инсектициды – служат для борьбы с вредными насекомыми; зооциды – для борьбы с грызунами; гербициды – для борьбы с сорными растениями и др. Особым видом пестицидов являются дефолианты – средства для удаления листьев и ботвы.

По характеру действия различают системные и несистемные пестициды. Системные пестициды проникают внутрь тканей

растения и перемещаются по его сосудистой системе ко всем его органам, вызывая отравление у вредителей, питающихся растением, или уничтожая само растение. Несистемные пестициды отличаются низкой подвижностью в растениях, поэтому внутрь растений они практически не проникают и остаются в основном на их поверхности, оказывая губительное действие на вредителей непосредственно при контакте с ними или при попадании в их кишечник.

В мировой практике используется около 10 тыс. наименований пестицидов, а их мировое производство составляет более 2 млн т в год [28, 29]. В случае отказа от использования пестицидов потери урожая составили бы 30 %, продукты подорожали бы на 50–70 % [29].

Вместе с тем увеличение масштабов применения пестицидов ведет к обострению проблемы обеспечения безопасности пищевых продуктов, в которых, как показывают результаты мониторинга последних лет, общее содержание пестицидов неуклонно возрастает [28]. В частности, это в значительной мере касается таких продуктов растительного происхождения, как картофель, репчатый лук, капуста, помидоры, огурцы, морковь, свекла, яблоки, виноград, пшеница, ячмень и др. Причем в широком ассортименте пищевых продуктов содержание пестицидов превышает в 5 и более раз допустимый уровень.

К основным причинам накопления пестицидов в продовольственном сырье и пищевых продуктах относятся нарушения гигиенических норм их хранения, транспортировки и применения, а также низкая культура работы с ними [28]. При этом следует учитывать способность пестицидов аккумулироваться и передаваться по пищевым цепям, что ведет к их широкому распространению и вредному влиянию на здоровье человека [30, 31].

Установлено, что приблизительно 80–85 % пестицидов человек получает с пищей [32]. Они могут попадать в организм человека различными путями, наиболее часто – при употреблении немытых фруктов и овощей, которые были подвергнуты обработке. Неизбежным результатом применения пестицидов являются острые и хронические отравления людей. Пестициды оказывают канцерогенное и мутагенное действие, влияют на иммунную и эндокринную системы.

Важная роль, которую играют пестициды в сельском хозяйстве, с одной стороны, и их отрицательное влияние на окружающую среду

и здоровье человека, с другой стороны, вызывают неоднозначные оценки различных специалистов относительно перспектив их дальнейшего применения [28]. Но поскольку полностью отказаться от применения пестицидов невозможно, то особо важен надежный контроль их применения с учетом последствий их влияния на организм человека. Однако обеспечить такой контроль не всегда представляется возможным. Это связано с тем, что пестициды, поступающие в организм вместе с пищевыми продуктами, подвергаются различным превращениям и изменениям, а это затрудняет их обнаружение и раскрытие механизмов воздействия на человека [28].

Остатки пестицидов относятся к наиболее значительным загрязнителям плодоовощных продуктов, поэтому требуется применение эффективных мер по обработке продуктов с целью предотвращения попадания пестицидов в организм человека.

### **Загрязнения насекомыми-вредителями**

Существуют разнообразные вредители сельскохозяйственных растений, которые повреждают растения или вызывают их гибель [33]. К ним относятся некоторые виды грызунов, птиц, моллюсков, многие круглые черви (нематоды). Наиболее многочисленными вредителями растений являются насекомые, наносящие самый большой ущерб урожаю. Они образуют особый вид загрязнений поверхности плодоовощных продуктов, оказывающих значительное влияние на состояние продуктов во время хранения [20].

Насекомые-вредители делятся на полифагов, питающихся растениями разных семейств, олигофагов, питающихся растениями разных видов одного семейства, и монофагов, питающихся преимущественно растениями какого-либо одного вида. Типичными представителями полифагов являются саранчовые, медведки, щелкуны, чернотелки, озимая совка, стеблевой и луговой мотыльки. К олигофагам относятся шведская муха, гессенская муха, зеленоглазка (питаются злаковыми растениями); клубеньковые долгоносики, гороховые плодоярки, гороховая тля (наносит вред бобовым растениям); капустная белянка, капустная моль, крестоцветные блошки, капустная муха (повреждают растения семейства капустных). Из монофагов особенно вредоносны филлоксера, повреждающая виноградную лозу, гороховая зерновка – горох, клеверный долгоносик – клевер.

Различают два основных типа повреждений растений, один из которых характерен для насекомых с грызущими, а другой – с колюще-сосущими ротовыми органами. Насекомые с грызущим ротовым аппаратом объедают растения; перегрызают листья, стебли и побеги; выгрызают под корой луб, камбий и древесину. Насекомые с колюще-сосущим ротовым аппаратом (тли, клопы, трипсы и др.) перед питанием вводят в растения выделения слюнных желез, ферменты которых вызывают биохимические изменения. По направленности действия насекомых на определенные органы растений различают вредителей корней, стеблей, листьев, бутонов, цветков, плодов и т. д.

Известно несколько тысяч видов насекомых-вредителей. Они активно размножаются, обычно самки откладывают более сотни яиц. Основные повреждения растениям наносят личинки насекомых, характеризующиеся большой прожорливостью. Так, оказавшись на поверхности плодовоовощных продуктов, они пронизывают их ходами, способствуя их загниванию в период хранения, поскольку в местах ходов личинок они легко поражаются микроорганизмами [20]. Поэтому важно вести своевременную борьбу с насекомыми-вредителями в полевых условиях и закладывать на хранение здоровые продукты.

### **1.3. Методы контроля загрязненности поверхностей**

Существуют разнообразные методы контроля загрязненности поверхностей (контроля качества очистки поверхностей от загрязнений).

По форме представления результатов контроля различают качественные и количественные методы контроля. Качественный контроль осуществляется путем сравнения исследуемых загрязненностей с эталонными. Более точным является количественный контроль, в ходе которого степень загрязнения оценивается с помощью численных параметров.

Методы контроля загрязненности бывают прямыми и косвенными. В прямых методах характер загрязнений оценивается путем их определения непосредственно на контролируемой поверхности, в косвенных методах соответствующие оценки делаются после

удаления загрязнений с поверхности, в том числе после их перехода в моющую жидкость.

Все методы контроля загрязненности по принципу действия объединяются в следующие основные группы:

- 1) методы визуального контроля;
- 2) методы весового контроля;
- 3) методы контроля, основанные на использовании физических явлений;

- 4) методы химического анализа;

- 5) методы микробиологического анализа.

В пределах каждой такой группы могут быть методы, различные по своему назначению: одни из них используются для контроля загрязненности поверхностей сельскохозяйственной техники, другие – поверхностей плодоовощных продуктов.

### **Визуальный контроль**

Существуют различные методы визуального контроля загрязненности поверхностей, одни из них используются применительно к деталям сельскохозяйственной техники, другие – применительно к плодоовощным продуктам.

К методам визуального контроля загрязненности поверхностей деталей сельскохозяйственной техники относятся: визуальное сравнение поверхности с эталоном, метод протирки поверхности, определение площади загрязненной поверхности, капельный метод.

**Визуальное сравнение поверхности с эталоном** предполагает прямое визуальное сравнение загрязненности поверхностей с условной эталонной шкалой [13, 34, 35]. Этот метод визуального контроля получил широкое распространение благодаря простоте осуществления и сравнительно высокой точности оценки качества очистки, основанной на большой разрешающей способности человеческого глаза, который может различать отдельные частицы размером до 40 мкм [34]. Разработаны различные методики построения эталонных шкал, позволяющие сравнительно точно (до 10 %) оценивать качество очистки. Как правило, эти методики разрабатываются применительно к определенным типам поверхностей, с учетом особенностей их загрязнения (табл. 1.4 [34] и табл. 1.5 [13]).

Таблица 1.4

Шкала оценки качества очистки поверхности автомобилей

Описание состояния поверхности	Баллы
Очистки практически нет	1
Слой загрязнения незначительно размыт, удалена большая часть пылегрязевых загрязнений	2
Имеются разрывы сплошности загрязнений, удалены пылегрязевые загрязнения и большая часть маслогрязевых загрязнений	3
Удалены маслогрязевые загрязнения и часть асфальтосмолистых загрязнений	4
Отдельные скопления асфальтосмолистых отложений, разрыхленные углеродистые отложения	5
Остатки асфальтосмолистых отложений в виде тонкого налета в отдельных местах, удалена большая часть углеродистых отложений, продуктов коррозии	6
Отдельные частицы углеродистых отложений, нагара, накипи, старых лакокрасочных покрытий	7
Очистка почти полная. Имеется незначительное количество отложений, нагара, накипи	8
Очистка полная. Возможны следы тонких масляных пленок	9
Очистка полная	10

Таблица 1.5

Шкала оценки степени загрязненности поверхности иглы распылителя дизельного двигателя

Описание состояния поверхности	Баллы
Поверхность покрыта сплошным слоем нагара черного цвета	1
Поверхность покрыта темно-серым слоем нагара, имеются отдельные разрывы темно-коричневого цвета (лакоподобные отложения)	2
Поверхность покрыта лакоподобными отложениями темно-коричневого цвета с небольшими включениями нагара	3
Поверхность покрыта тонким слоем лаковых отложений (светлая пленка)	4
Чистая поверхность серебристого цвета (загрязнения не заметны)	5



**Метод протирки поверхности** реализуется путем контрольной протирки поверхности чистой белой бумажной или тканевой салфеткой, сухой или смоченной в этиловом спирте, которую затем исследуют визуально [35–37]. Степень очистки поверхности от пылевых и жировых загрязнений определяют путем сравнения загрязненности салфетки с условной эталонной шкалой.

**Определение площади загрязненной поверхности** предполагает прямой подсчет площади загрязненной поверхности с помощью специальных шаблонов [36]. В качестве шаблонов используются накладываемые на поверхность прозрачные пластины или пленки, на которые нанесена прямоугольная измерительная сетка с заданными размерами ячеек. Степень очистки поверхности определяется по отношению числа ячеек, занятых загрязнением, к общему числу ячеек.

**Капельный метод** применяют для контроля качества очистки поверхностей после обезжиривания органическими растворителями или водными моющими растворами [36]. На обезжиренную и высушенную поверхность наносят 2–3 капли растворителя и выдерживают в течение 15 с, после чего накладывают на поверхность лист фильтровальной бумаги и прижимают его к ней до полного впитывания растворителя в бумагу. Параллельно на другой лист фильтровальной бумаги наносят 2–3 капли растворителя и выдерживают до его полного испарения. Сравнивая внешний вид обоих листов фильтровальной бумаги, определяют степень обезжиривания поверхности по наличию или отсутствию масляных пятен на первом листе.

**Метод липкой ленты** применяют в соответствии с международным стандартом ISO 8502-3 «Подготовка стальных подложек перед нанесением красок и связанных с ними продуктов. Испытания для оценки чистоты поверхности. Часть 3. Оценка запыленности стальных подложек, приготовленных для нанесения краски (метод липкой ленты)». Этим методом определяется содержание остаточной пыли на очищенной поверхности. Самоклеющаяся бесцветная прозрачная пленка прижимается к поверхности. Затем пленка вместе с прилипшей к ней пылью отдирается и исследуется визуально. Степень загрязнения определяют по количеству и размерам частиц пыли путем сравнения со стандартными эталонами в баллах от 0 до 5 (табл. 1.6).

Таблица 1.6

Шкала оценки степени загрязненности стальной поверхности пылью

Описание состояния поверхности	Баллы
Частицы не видны под десятикратным увеличением	0
Частицы видны под десятикратным увеличением, но не видны при обычном или более тщательном осмотре (меньше, чем 50 микрон в диаметре)	1
Частицы едва видны при обычном или более тщательном осмотре (обычно частицы между 50 микрон и 100 микрон в диаметре)	2
Частицы видны четко при обычном или более тщательном осмотре (частицы до 0,5 мм в диаметре)	3
Частицы от 0,5 мм до 2,5 мм в диаметре	4
Частицы больше, чем 2,5 мм в диаметре	5

К методам визуального контроля загрязненности поверхностей плодовоовощных продуктов относятся: внешний осмотр поверхности и метод визуального подсчета.

**Внешний осмотр** проводят для выявления на поверхности продуктов пыли и остатков почвы.

**Метод визуального подсчета** применяют для контроля качества очистки поверхности продуктов от насекомых-вредителей (их яиц или личинок) [38–40]. Подсчет численности учетных элементов может осуществляться как невооруженным глазом, так и с помощью лупы (с 7–10-кратным увеличением) или бинокулярного микроскопа. Бинокулярный микроскоп более удобен для работы, поскольку дает рельефное стереоскопическое прямое изображение исследуемых объектов и обеспечивает достаточно большое увеличение (в 100 раз и более).

### **Весовой контроль**

Методы весового контроля загрязненности поверхностей используются применительно к деталям сельскохозяйственной техники. Существуют две разновидности этого метода: метод взвешивания загрязнений и метод взвешивания изделия.

**Метод взвешивания загрязнений** осуществляется несколькими путями [2, 34, 35, 41]:

– сбор загрязнений с поверхности изделия экстрагированием с помощью различных растворителей с последующим отделением загрязнений от растворителя и взвешиванием; данный вариант метода применяется для контроля качества очистки деталей большой массы [35];

– сбор загрязнений с поверхности изделия соскабливанием с последующим взвешиванием их;

– сбор загрязнений с поверхности изделия протиранием предварительно взвешенной бумажной или тканевой салфеткой с последующим взвешиванием ее (вместо салфетки также можно использовать ватный тампон); данный вариант метода применяется для контроля качества очистки каналов и внутренних полостей изделий [2, 41];

– выделение загрязнений из моющей жидкости в результате ее выпаривания [37].

**Метод взвешивания изделия** предполагает взвешивание загрязненного, подвергнутого очистке и чистого изделия с последующим определением разности измеренных масс [34, 35]. Об эффективности очистки можно судить по величине массы  $\Delta M$  загрязнения, оставшегося на поверхности после очистки:

$$K = (M_2 - M_3) / S, \quad (1.1)$$

а также по величине массы  $\Delta M$  загрязнения, удаленного с поверхности после очистки:

$$K_0 = (M_1 - M_2) / S, \quad (1.2)$$

где  $M_1$  – масса загрязненного изделия;  $M_2$  – масса изделия, подвергнутого очистке;  $M_3$  – масса чистого изделия;  $S$  – площадь очищаемой поверхности [35].

Исследуемые изделия взвешивают на аналитических весах с погрешностью до 0,001 г. Для деталей сельхозтехники, поступающих на дефектацию и сборку, приняты допустимые значения остаточной загрязненности поверхности (в зависимости от ее шероховатости – параметров  $Rz$  или  $Ra$ ) (табл. 1.7) [35].

Таблица 1.7

Допустимая остаточная загрязненность поверхности

$K$ , мг/см <sup>2</sup>	1,25	0,70	0,25
$Rz$	До 10	-	-
$Ra$	-	2,5-0,63	0,63-0,16

## **Контроль на основе использования физических явлений**

Методы контроля загрязненности поверхностей, основанные на использовании физических явлений, применяются в отношении деталей сельскохозяйственной техники. К этим методам относятся: метод смачивания; люминесцентный метод; метод электропроводности; рефрактометрический метод; метод реплик.

**Метод смачивания** получил наибольшее распространение. Существует несколько его разновидностей: метод разрыва водной пленки, метод распыления воды, метод запотевания, метод конденсации, измерение угла смачивания.

**Метод разрыва водной пленки** основан на способности воды к образованию сплошной пленки на металлической поверхности, если эта поверхность не содержит гидрофобных (масляно-жировых) загрязнений [2, 35, 37, 40–44]. Испытуемую деталь погружают в чистую воду, затем извлекают из воды и дают стечь избытку воды с контролируемой поверхности. При этом вода сохраняется в виде сплошной пленки на поверхности и не собирается в капли в течение некоторого времени.

Сущность метода заключается в определении времени сохранения сплошной пленки воды на поверхности детали до ее разрыва. Таким образом, это время служит ориентировочной оценкой степени загрязнения [33]. Так, на сильно загрязненной поверхности, содержащей минеральное масло в количестве более  $0,01 \text{ мг/см}^2$ , пленка разрывается практически мгновенно, в то время как при его количестве  $0,005 \text{ мг/см}^2$  разрыв наступает через 4–7 с [2, 41]. На тех участках поверхности, где загрязнения очень малы, пленка может сохраняться до разрыва в течение 30–60 с [2]. Места разрыва пленки соответствуют тем местам поверхности, где имеются остаточные масляные загрязнения [35]. Разрывы пленки фиксируются визуально, при этом не принимаются во внимание участки поверхности, удаленные от краев и острых кромок менее чем на 10 мм [33].

При применении данного метода следует иметь в виду, что сплошная пленка воды может образоваться также на загрязненной маслом поверхности детали, если она плохо отмыта от моющих жидкостей, т. е. на ней находятся остатки поверхностно активных веществ. Во избежание этого деталь погружают в слабый раствор кислоты, при этом имеющиеся на поверхности остатки моющих веществ переходят в гидрофобные жирные кислоты, разрывающие водную пленку [32].

Точность метода зависит от толщины пленки воды, образующейся на поверхности: чем тоньше пленка, тем точнее контроль [32]. Поэтому время стекания избытка воды с деталей имеет большое значение, оно подбирается экспериментально для каждого вида обрабатываемых деталей. При этом следует учитывать, что при длительном времени стекания может произойти разрыв пленки воды из-за испарения [34]. Кроме того, точность метода может зависеть от шероховатости поверхности. Обычно метод применяют для деталей с шероховатостью поверхности  $Rz < 3,2$  мкм [2, 41].

**Метод распыления воды** подобен по принципу действия методу разрыва водной пленки и отличается от него тем, что на контролируемую поверхность наносят чистую воду не путем погружения детали в нее, а путем ее распыления на поверхности пульверизатором [42–44]. При этом распыленные водные капельки либо смыкаются друг с другом, образуя сплошную водную пленку, если поверхность чистая, либо остаются разрозненными, если на поверхности имеются гидрофобные загрязнения. В результате на поверхности образуется своеобразный узор из капелек.

Данный метод позволяет делать количественную оценку степени загрязнения, о которой можно судить по относительной площади, занимаемой каплями на поверхности. Чтобы повысить чувствительность метода, в распыляемую воду добавляют краситель и контролируемую поверхность с образовавшимся на ней капельным узором сушат. При этом краситель остается преимущественно в местах загрязнений, благодаря чему капельный узор становится более контрастным [42, 44].

**Метод запотевания** заключается в том, что контролируемую поверхность обрабатывают в течение 2–3 минут струей пара [34]. При отсутствии гидрофобных загрязнений на поверхности образуется сплошная пленка конденсата, а при их наличии поверхность покрывается капельками конденсата.

**Метод конденсации** состоит в следующем [34]. Испытуемая деталь охлаждается в сосуде Дьюара с жидким азотом. После извлечения из азота на контролируемой поверхности детали образуется слой инея, который через некоторое время начинает таять. При отсутствии гидрофобных загрязнений появляющаяся в результате таяния инея вода покрывает поверхность сплошной пленкой, а при их наличии собирается на поверхности в отдельные капли.

**Измерение угла смачивания** каплей воды, помещенной на контролируемую поверхность, позволяет сделать заключение о степени ее гидрофобного загрязнения, которое будет тем меньше, чем меньше угол смачивания [42, 44]. Так, если поверхность чистая (гидрофильная), то угол смачивания мал и, соответственно, капля хорошо растекается по поверхности, и, наоборот, если поверхность загрязнена, то угол смачивания велик (например, он может составлять около  $90^\circ$ ) и, соответственно, капля остается на поверхности в виде шарика.

Для измерения угла смачивания применяют различные методы. Из них наиболее простым является метод проекции [42]. Согласно этому методу каплю жидкости, находящуюся на горизонтальной контролируемой поверхности, проецируют на экран и полученному изображению (фотографии или рисунку) определяют угол между касательной к капле в точке соприкосновения трех фаз и поверхностью образца. Угол смачивания  $\theta$  вычисляют по высоте  $h$  капли и радиусу  $r$  области контакта капли с исследуемой поверхностью (рис. 1.4), пользуясь следующими формулами:

$$\cos \theta = \frac{(r^2 - h^2)}{(r^2 + h^2)} \text{ при } \theta < 90^\circ; \quad (1.3)$$

$$\cos \theta = 1 - \frac{h}{r} \text{ при } \theta > 90^\circ. \quad (1.4)$$

Среди других методов измерения угла смачивания наиболее распространенными являются гониометрический метод и метод диаграммы отраженного света, для реализации которых требуется специальная измерительная аппаратура [42].

**Люминесцентный метод** основан на способности масел светиться под действием ультрафиолетового облучения [2, 34, 35, 41–43]. Качество очистки поверхности от масляных загрязнений определяется по наличию свечения и его интенсивности. Для грубой оценки качества очистки осуществляют визуальный контроль свечения, для более точной оценки измеряют интенсивность свечения с помощью специальных приборов, определяющих содержание масляных загрязнений в количестве  $0,0005 \dots 0,05$  мг/см<sup>2</sup> [2, 35, 41]. Свечение масляных загрязнений можно контролировать как в моющей жидкости, так и на поверхности детали [45]. Также можно контролировать свечение масляных загрязнений, собранных на салфетке, которой была протерта поверхность детали [46].

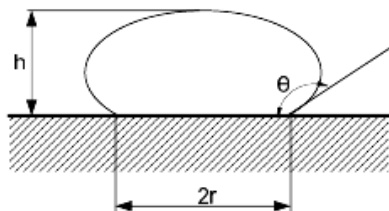


Рис. 1.4. Проекция капли, находящейся на исследуемой поверхности

**Метод электропроводности** применяют для контроля содержания растворимых загрязнений на поверхности деталей. Существуют два варианта этого метода.

Первый вариант метода заключается в том, что качество очистки поверхности деталей от загрязнений оценивается по разности значений электропроводности моющей жидкости до и после очистки [42].

Второй вариант метода применяют в соответствии с международным стандартом ISO 8502-6 «Подготовка стальной поверхности перед нанесением красок и относящихся к ним продуктов. Испытания для оценки чистоты поверхности. Часть 6. Извлечение растворимых загрязняющих веществ для анализа. Метод Бресле». Для контроля качества очистки поверхности проводится специальная процедура отбора проб растворимых загрязнений – с помощью специально приготовленных ячеек (клеяких накладок с центральным карманом), приклеиваемых к поверхности. В ячейку впрыскивается шприцем определенная доза дистиллированной воды, которая, спустя некоторое время, этим же шприцем вытягивается обратно и поступает на анализ для определения электропроводности, по величине которой судят о содержании на поверхности остаточных солей или других растворимых загрязнений.

**Рефрактометрический метод** состоит в определении коэффициента преломления светового потока в моющей жидкости и сопоставлении полученных результатов с коэффициентом преломления светового потока в жидкости, содержащей известные загрязнения в определенной концентрации [45].

**Метод реплик** основан на получении «реплики» загрязненности поверхности путем снятия загрязнения с поверхности детали посредством прозрачной клейкой ленты типа «скотч», которая наклеивается на контролируруемую поверхность [47, 48]. Полученная

таким образом «реплика» наклеивается на белую (фоновую) бумагу, после чего определяется ее отражательная способность с помощью рефлектометра, которая уменьшается по мере увеличения количества загрязнений.

### **Химический анализ**

Существуют различные методы химического анализа, используемые для контроля загрязненности поверхностей. Одни из них применяются в отношении деталей сельскохозяйственной техники, другие – в отношении плодоовощных продуктов.

Путем химического анализа контролируется содержание солевых загрязнений на поверхности деталей. Контроль загрязненности проводят в соответствии с международным стандартом ИСО-8502-2 «Подготовка стальной поверхности перед нанесением красок и относящихся к ним продуктов. Испытания для оценки чистоты поверхности. Часть 2. Лабораторное определение содержания хлорида на очищенных поверхностях». Данный метод основан на смывании хлоридов с определенной площади поверхности определенным количеством воды и последующим титрованием полученного раствора с помощью нитрата ртути. Количество хлоридов оценивают по количеству получившегося осадка хлорида ртути.

Также путем химического анализа контролируется загрязненность поверхности плодоовощных продуктов пестицидами. При определении содержания различных видов пестицидов на поверхности продуктов обычно применяют стандартные методы химического анализа, такие как газовая или жидкостная хроматография [49–53] и масс-спектрометрия [49, 51, 52].

### **Микробиологический анализ**

Методы микробиологического анализа используют для контроля загрязненности поверхности плодоовощных продуктов микроорганизмами.

Отбор и подготовку образцов продуктов осуществляют в соответствии с Межгосударственными стандартами ГОСТ 26668-85 «Продукты пищевые и вкусовые. Методы отбора проб для микробиологических анализов» и ГОСТ 26669-85 «Продукты пищевые и вкусовые. Подготовка проб для микробиологических анализов».



В опытных и контрольных образцах продуктов определяют количественный состав поверхностной микробиоты (совокупности различных видов микроорганизмов), а именно: общее количество мезофильных аэробных (МА) и факультативно-анаэробных (ФАнМ) микроорганизмов (МАФАнМ) – общая бактериальная обсемененность, а также количество дрожжей и плесневых грибов. Микробиологический анализ проводят в соответствии с межгосударственными стандартами ГОСТ 10444.15-94 «Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов» и ГОСТ 10444.12-88 «Продукты пищевые. Метод определения дрожжей и плесневых грибов». В процедурном отношении микробиологический анализ заключается в смыве поверхности продуктов, помещении смывной жидкости в благоприятную для размножения микроорганизмов питательную среду, которая находится в чашках Петри при определенных температурных и временных параметрах, и последующем определении характера развития микроорганизмов.

Количественную оценку результатов анализа делают в специальных единицах измерения – колониеобразующих единицах КОЕ. Колониеобразующая единица (colony-forming unit – CFU) – это одна живая микробная клетка, из которой вырастает колония (по другим определениям – видимая колония микроорганизмов, выросшая из одной клетки или из группы клеток). Обычно при проведении анализа количество КОЕ относят к массе анализируемого продукта (или его фрагмента). Соответственно, результаты анализа выражают в КОЕ/г. Также при проведении анализа количество КОЕ можно относить к общей поверхности анализируемого продукта. Соответственно, результаты анализа выражают в КОЕ.

Сравнивая численные значения КОЕ, установленные для различных образцов, можно судить о степени их микробиального загрязнения и, соответственно, об эффективности очистки.

## 2. РАЗНОВИДНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Существуют разнообразные технологии очистки поверхностей деталей сельскохозяйственной техники и плодоовощных продуктов от загрязнений. Детали очищают в процессе их изготовления, ремонта (восстановления) и эксплуатации, продукты – в послеуборочный период, при подготовке к хранению и переработке, а также непосредственно перед употреблением в пищу. Для очистки деталей применяются моечно-очистная обработка, травление, механическая обработка и обработка физическими воздействиями. Кроме того, моечно-очистная обработка и обработка физическими воздействиями используются для очистки продуктов. Удаление с поверхностей продуктов микробных загрязнений проводят с помощью дезинфектантов и биопрепаратов.

Особым, высокоэффективным видом очистки и деталей сельскохозяйственной техники, и плодоовощных продуктов является кавитационная обработка.

### 2.1. Моечно-очистная обработка

Моечно-очистная обработка заключается в удалении загрязнений с поверхностей деталей с помощью моющих жидкостей. При этом загрязнения могут подвергаться двум видам воздействий: механическим и физико-химическим [1, 5, 54, 55]. В первом случае загрязнения удаляются в результате воздействия интенсивными потоками жидкости или струями, во втором – в результате растворения или диспергирования, приводящего к образованию эмульсий или суспензий.

Работа очистки поверхности от загрязнений определяется формулой

$$A = A_m + A_{фх}, \quad (2.1)$$

где  $A_m$  и  $A_{фх}$  – работы, связанные с использованием, соответственно, механических и физико-химических воздействий для разрушения загрязнений и их отрыва от поверхности [1, 15].

Чем ниже физико-химическая активность очистной жидкости (чем меньше  $A_{\text{фх}}$ ), тем больше требуемая энергия механических воздействий (тем больше  $A_{\text{м}}$ ), и, наоборот, с повышением физико-химической активности очистной жидкости требуемая энергия механических воздействий уменьшается.

### **Мойка сельскохозяйственной техники**

**Моющие жидкости.** Существуют разнообразные по составу и свойствам моющие жидкости, которые применяются для удаления различных видов загрязнений с поверхностей деталей сельскохозяйственной техники. В основном они используются для обезжиривания поверхностей, в процессе которого поверхности очищаются не только от масляных загрязнений – масел, полировальных паст, консервационных смазок, но также от частиц пыли, почвы и абразива, стружки, продуктов износа, которые, связываясь масляными загрязнениями, образуют масляно-грязевые отложения.

Обезжиривание осуществляется с помощью органических растворителей и водных щелочных растворов, которые, взаимодействуя с масляными загрязнениями, образуют водные эмульсии, что облегчает их последующее отделение от поверхности металла [56]. При этом вместе с каплями масляной фазы от поверхности отделяются и мелкие механические загрязнения. Эффект эмульгирования значительно усиливается при введении в органические растворители и щелочные растворы поверхностно активных веществ (ПАВ), которые способствуют образованию устойчивых эмульсий. Кроме того, ПАВ способствуют диспергированию механических загрязнений. В последние годы в практике обезжиривания широко применяются водные растворы синтетических моющих средств (СМС), основу которых составляют ПАВ [1, 54].

С помощью органических растворителей и водных щелочных растворов можно удалять не только масляные загрязнения, но и старые лакокрасочные покрытия. Кроме того, щелочные и кислотные растворы служат для очистки металлических поверхностей от накипи [1, 54, 57]. В качестве очистной жидкости используется также обычная вода, однако ее применение ограничено, поскольку многие виды загрязнений не растворяются в воде и являются гидрофобными [57].

К органическим растворителям относятся керосин, бензин, ацетон, этиловый спирт, трихлорэтилен, тетрахлорэтилен, тетрахлорид углерода и др. [1, 57–59]. Их применяют для внутренней промывки картера двигателя, коробки передач, ведущих мостов и других деталей и узлов машин. Обезжиривание органическими растворителями может быть местным и полным [60]. При местном обезжиривании обрабатываются только отдельные участки поверхности деталей – с помощью чистой ветоши, смоченной в растворителе. При полном обезжиривании детали целиком промываются в специальном баке, заполненном растворителем.

Ниже приведены некоторые примеры обезжиривания различных деталей машин органическими растворителями [61].

Топливные баки автомобилей очищают в несколько стадий. Сначала бак промывают с помощью сильной струи воды, которую направляют внутрь бака. Затем в бак заливают бензин, взбалтывают его и сливают обратно. Окончательную промывку осуществляют ацетоном и водой.

Детали предварительно разобранного карбюратора промывают в бензине, после чего погружают в ацетон и выдерживают в нем в течение определенного времени.

Масляный радиатор промывают смесью, состоящей из бензина (75 %) и ацетона (25 %).

Для снятия нагара с головок блока цилиндров, поршней, клапанов, выпускных трубопроводов и свечей зажигания двигателей служат препараты, содержащие растворители (керосин, ксилол и др.) и автомобильное моторное масло (очистку проводят при прогретом двигателе).

Щелочное обезжиривание выполняется химическим или электрохимическим способами [56, 62]. В случае химического обезжиривания детали загружают в горячий щелочной раствор и выдерживают в нем определенное время. В случае электрохимического обезжиривания детали, погруженные в щелочной раствор, включают в цепь электрического тока в качестве одного из электродов. При этом пузырьки, выделяющиеся на электроде, способствуют отрыву загрязнений от поверхности и облегчают их эмульгирование. Как следствие, электрохимическое обезжиривание обеспечивает более качественную очистку поверхности металла по сравнению с химическим обезжириванием. Обычно с его помощью

удаляют тонкие, плотно держащиеся на металле масляные пленки. Как правило, его применяют после проведения химического обезжиривания, с помощью которого удаляется основная масса загрязнений [58, 63, 64].

Обычно электрохимическое обезжиривание проводят в щелочных растворах, аналогичных по составу растворам, применяемым при химическом обезжиривании [64]. Основными компонентами этих растворов являются: едкий натр, кальцинированная сода, фосфаты, для повышения моющей способности в них вводят ПАВ, силикат натрия и другие добавки [58].

Химическое и электрохимическое обезжиривание проводят в специальных ваннах из полипропилена (при рабочей температуре до 80 °С) или коррозионностойкой стали (рис. 2.1) [65, 66]. Обычно такие ванны оснащаются нагревателями. Кроме того, ванны для химического обезжиривания могут оснащаться барботером для перемешивания раствора воздухом или устройствами для безвоздушного перемешивания раствора.



*Рис. 2.1.* Ванна из полипропилена для химического и электрохимического обезжиривания

Обезжиривающее действие СМС обусловлено особыми свойствами содержащихся в них ПАВ [1, 54]. Молекулы ПАВ обладают гидрофобно-гидрофильными свойствами: они адсорбируются на поверхности масляных капель или промасленных твердых частиц таким образом, что одна часть молекулы всегда ориентируется в сторону масла, в то время как другая – в сторону воды. При этом ПАВ образуют вокруг загрязнений тонкие молекулярные пленки и создают раскливающее давление и, как следствие, способствуют разрушению загрязнений и отрыву их от поверхности. Действие ПАВ усиливается щелочными добавками, которые вводят в состав растворов СМС.

Особенности очистки поверхности от гидрофобных загрязнений (масляных, масляно-грязевых и т. п.) с помощью моющих жидкостей поясняются на рис. 2.2 [54].

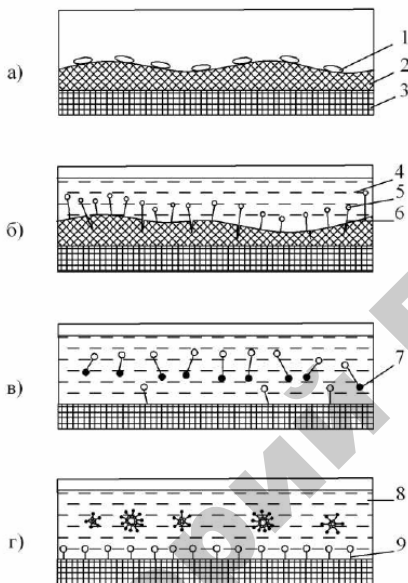


Рис. 2.2. Схема моющего процесса:

- 1 – капли воды; 2 – загрязнение; 3 – очищаемая поверхность; 4 – моющий раствор;
- 5 – гидрофильная часть молекулы ПАВ; 6 – гидрофобная часть молекулы ПАВ;
- 7 – перевод частиц загрязнения в раствор;
- 8 – частицы загрязнения, стабилизированные в растворе;
- 9 – адсорбированные молекулы ПАВ на очищенной поверхности

Вода, оказавшись на поверхности, покрытой слоем гидрофобных загрязнений, стягивается в отдельные капли, поскольку она не смачивает их (рис. 2.2, а). Водный раствор СМС, наоборот, смачивает загрязнения и легко проникает в их трещины и поры (рис. 2.2, б). Как следствие, ослабляется сцепление частиц загрязнений между собой и с поверхностью. При механическом воздействии частицы загрязнений, увлекаемые молекулами ПАВ, переходят в моющий раствор (рис. 2.2, в). Молекулы ПАВ адсорбируются на загрязнениях и отмытой поверхности, что препятствует укрупнению

частиц путем слияния, а также оседанию их на поверхность (рис. 2.2, г). В результате частицы загрязнения оказываются в моющем растворе в стабильном взвешенном состоянии и удаляются вместе с ним из приповерхностной зоны.

Физико-химические процессы, приводящие к удалению загрязнений с поверхности, протекают тем интенсивнее, чем выше температура моющего раствора [1, 54]. На рис. 2.3 представлена схема воздействия горячего моющего раствора на масляную пленку, находящуюся на поверхности металлической детали [1]. Исходное состояние пленки на поверхности детали показано на рис. 2.3, а. Под действием горячего моющего раствора пленка нагревается и в результате расширения и действия сил поверхностного натяжения приобретает волнистый вид с характерными углами кривизны  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 2.3, б) и  $\alpha \leq 90^\circ$  (рис. 2.3, в). Далее масляная пленка деформируется настолько сильно, что начинает разрушаться, образуя отдельные масляные капли, которые обволакиваются молекулами ПАВ моющего раствора. Как следствие, сила сцепления этих частиц с поверхностью уменьшается, и частицы удаляются с поверхности потоком раствора.

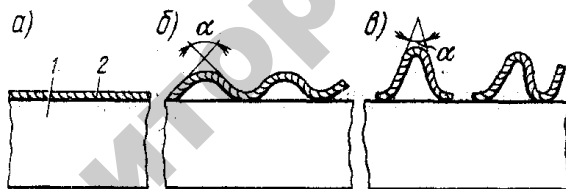


Рис. 2.3. Схема воздействия горячего моющего раствора на масляную пленку:

1 – деталь; 2 – масляная пленка

Современные СМС представляют собой многокомпонентные системы, в состав которых входят обезжиривающие, диспергирующие, эмульгирующие и противокоррозионные вещества, а также растворители, стабилизаторы, дезодоранты и противовспениватели [67]. Их применяют для обезжиривания различных металлических поверхностей. В зависимости от моющих свойств растворы СМС могут предназначаться для моечных машин разного типа: струйного, погружного и др. [1]. Рабочие концентрации растворов СМС обычно выбирают

от 5 до 20 г/л – с учетом загрязненности поверхности. Наилучшее моющее действие растворов СМС проявляется при температурах 80–85 °С (при более низких температурах оно резко уменьшается).

Для удаления накипи, которая обычно образуется в системах охлаждения (водяных рубашках) двигателей транспортных средств, применяют водные щелочные и кислотные растворы. Первые готовят на основе каустической или кальцинированной соды, вторые – на основе соляной, а также серной или фосфорной кислот [1, 54, 57, 68, 69]. Приготовленные растворы заливают в систему охлаждения, затем запускают двигатель и дают ему поработать в течение определенного времени, после чего раствор сливают, а систему охлаждения промывают водой.

Для наружной мойки деталей обычно используется вода [2, 56]. Поверхности деталей обрабатывают струями холодной или горячей воды под давлением, которые смывают пылегрязевые загрязнения, имеющие слабое сцепление с очищаемой поверхностью.

В отдельных случаях осуществляют внутреннюю мойку. Например, водой промывают топливные баки до и после обезжиривания органическими растворителями, а также системы охлаждения двигателей после их очистки от накипи щелочными или кислотными растворами (об этом упоминалось выше).

Также вода используется для межоперационной промывки деталей при осуществлении ряда технологических процессов их обработки. Так, перед нанесением электрохимических покрытий поверхности деталей обезжиривают щелочными растворами, после чего тщательно промывают сначала в горячей (60 °С), а затем в холодной (20 °С) воде [2]. При этом качество промывки может оказывать значительное влияние на качество наносимых покрытий. Аналогично поверхности деталей промывают в воде после травления кислотами [70].

**Моечное оборудование.** Для проведения моечно-очистой обработки с помощью моющих растворов применяются струйные, погружные и комбинированные (струйно-погружные) моечные установки [15, 71].

Струйные установки служат для очистки поверхностей деталей от пыли, грязи, стружки, абразивных частиц, а также масляных загрязнений. В них используют слабokonцентрированные растворы СМС с низким содержанием ПАВ, обработка которыми ведется при



температурах около 20 °С. Струйная мойка часто применяется в тех случаях, когда нежелательно полное обезжиривание металлических поверхностей из-за опасности появления коррозии. Она не обеспечивает требуемой полноты очистки деталей сложной формы, с участками поверхностей, экранированными от прямого попадания струй.

Перспективный путь повышения эффективности струйной очистки связан с усилением механического воздействия струй моющей жидкости на очищаемую поверхность [72]. При этом становится возможным использовать дешевую моющую жидкость – чистую воду (без каких-либо моющих средств). Интенсификацию процесса струйной очистки можно обеспечить установкой перед насадками специальных устройств, формирующих струи, в частности, повышающих их компактность, характеризующуюся наличием плотного ядра с большой кинетической энергией. Также струйная очистка может быть интенсифицирована повышением действия нормальных разрушающих давлений путем перемещения струи относительно очищаемой поверхности. Так, для мойки мобильной техники широко используются моечные проездные установки, которые характеризуются тем, что обрабатываемая машина перемещается через моечную установку, в то время как рабочие органы установки – сопла работают таким образом, что подаваемые посредством их струи воды или моющей жидкости на обмываемые поверхности совершают колебательные или круговые движения [73].

Погружные установки, в отличие от струйных, позволяют использовать растворы СМС с высоким содержанием ПАВ и осуществлять нагрев растворов в процессе мойки до 100 °С, благодаря чему становится возможным очищать поверхности деталей сложных форм от смазочных материалов, полировальных паст, асфальтосмолистых отложений, остатков мастик, флюсов, смол, формовочных смесей. Одним из недостатков таких установок является то, что загрязнения, удаленные с поверхностей деталей, остаются в объеме раствора вблизи поверхностей и при извлечении деталей из моющего раствора вновь осаждаются на очищенных поверхностях. Кроме того, с помощью таких установок трудно удалять загрязнения, скопившиеся в глухих отверстиях и впадинах, в которые доступ раствора ограничен. Для повышения эффективности работы погружных установок применяются различные технические приемы, обеспечивающие интенсивное относительное

перемещение моющего раствора и очищаемой поверхности, турбулизацию потоков раствора, барботирование раствора и т. п.

В настоящее время серийно выпускаются разнообразные по конструкции и функциональным возможностям моечные установки, предназначенные для очистки поверхностей деталей от загрязнений с помощью моющих жидкостей. Ниже в качестве примера рассмотрены некоторые из них.

1. Струйная моечная машина Cemastir серии OXY – применяется для мойки деталей сравнительно простой формы (рис. 2.4) [74]. Детали помещаются на моечную платформу, которая в процессе работы машины вращается вокруг вертикальной оси. Моющий раствор подается через систему форсунок и промывает детали со всех сторон.

2. Струйная моечная машина AquaClean серии AS – применяется для мойки крупногабаритных деталей относительно простой формы (зубчатых колес, валов, корпусов и т. п.) (рис. 2.5) [75]. В процессе работы машины поддон с деталями остается в неподвижном положении, вокруг вертикальной оси вращаются форсунки, промывая детали с разных сторон.

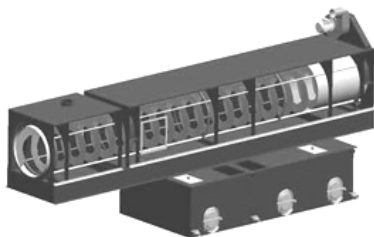


Рис. 2.4. Струйная моечная машина Cemastir серии OXY



Рис. 2.5. Струйная моечная машина AquaClean серии AS

3. Шнековая моечная машина CemastirCoclea – предназначена для поточной очистки мелких деталей (болты, шурупы, фитинги, вентили и т. д.) (рис. 2.6) [76]. Моечные машины такого типа способны последовательно осуществлять отмывку, ополаскивание и сушку деталей.



*Рис. 2.6.* Шнековая моечная машина SemaStirCoclea

4. Туннельная моечная машина AquaClean SR-T – высокопроизводительное устройство, рассчитанное на обработку большого количества деталей (рис. 2.7) [77]. Детали проходят сквозь моечный туннель по цепи или конвейеру. В зонах мойки и ополаскивания подогретый моющий раствор под давлением подается на детали со всех сторон через форсунки. В зависимости от количества и размера моющихся деталей выбираются скорость движения конвейера и длина моечной зоны, тем самым регулируется скорость обработки деталей.



*Рис. 2.7.* Туннельная моечная машина AquaClean SR-T

5. Карусельная моечная машина РМО 950К – применяется для очистки деталей сложной формы, в том числе с глухими отверстиями (рис. 2.8) [78]. В отличие от туннельных моечных машин конструкция РМО 950К имеет малое расстояние между станциями загрузки и выгрузки. В процессе работы машины детали перемещаются по кругу, проходя различные стадии обработки: очистку, полоскание и сушку.



Рис. 2.8. Карусельная моечная машина PMO 950K

6. Моечная машина REIN RDS – обеспечивает высокую степень очистки деталей, поскольку сочетает в себе струйную, струйно-погружную и струйно-погружную с частичным заполнением мойку деталей в качающейся или вращающейся корзине (сыпучие детали) или кассете (зафиксированные детали); позволяет последовательно выполнять мойку, полоскание и сушку деталей (рис. 2.9) [79]. Машина используется для удаления масла, грязи, шлама с поверхности деталей, имеющих сложную форму, с вогнутыми и выпуклыми поверхностями, скрытыми полостями.

Для очистки мелких деталей применяются погружные моечные установки, в которых детали во время мойки находятся в решетчатом или перфорированном барабане [1]. Барабан с загруженными деталями помещается в ванну, заполненную моющей жидкостью, и приводится во вращение вокруг продольной оси, расположенной горизонтально. При этом детали хаотично перемещаются в барабане и равномерно омываются раствором. В качестве моющей жидкости используют растворы СМС или органические растворители.

Для очистки внутренних поверхностей трубчатых деталей служат специальные моечные устройства, в которых моющий раствор подается в трубки под давлением [15].

В последние годы получили распространение пароструйные установки для мойки деталей машин [54]. В этих установках в специальных агрегатах образуется пароводяная смесь с температурой 75–140 °С, которая подается с помощью распылителя на очищаемую поверхность под давлением. При этом также допускается применение моющих растворов.



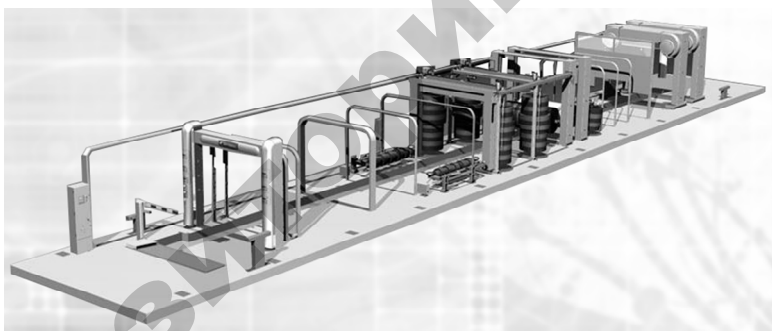
Рис. 2.9. Моечная машина REIN RDS

Во время ремонта, перед проведением разборочных работ, сельскохозяйственную технику и транспортные средства необходимо обязательно подвергать наружной мойке. В практике наружной мойки широкое распространение получила струйная очистка под высоким давлением [80–82]. Она заключается в механическом разрушении слоя загрязнений и его смыва с очищаемой поверхности за счет нормальных и касательных напряжений, возникающих при ударе о поверхность струи жидкости (воды или моющего раствора) о преграду. Загрязнения удаляются в том случае, если сила удара

струи превышает прочностные характеристики загрязнений, такие, как прочность на сжатие, изгиб или сдвиг, прочность адгезии. Современные высоконапорные моечные аппараты обеспечивают обработку очищаемой поверхности водяной или пароводяной струей под давлением от 10 до 25 МПа и выше с температурой 20–140 °С [82].

При очистке машин в закрытых помещениях с использованием струй высокого давления, вследствие распыла и разбрызгивания моющей жидкости, влажность воздуха рабочих мест превышает предельно допустимые нормы. Для снижения влажности используют воздушный экран, позволяющий отделить рабочее место оператора от брызг и воздуха, содержащего водяной туман [83]. Такой экран создается направленным потоком воздуха высокого давления, преграждает выход частиц жидкости за его пределы и уменьшает гидравлический прыжок потока.

На станциях мойки для улучшения качества очистки наружных поверхностей широко применяются щеточные моечные установки, в которых щетки, оказывая механическое воздействие на поверхность, способствуют удалению загрязнений (рис. 2.10) [54, 84].



*Рис. 2.10. Щеточная моечная установка*

### **Мойка плодоовощных продуктов**

В процессе мойки водой с поверхностей плодов и овощей удаляется значительная часть загрязнений: пыль, остатки земли, следы пестицидов, а также снижается обремененность микроорганизмами [85, 86].

Флодоовощные продукты моют свежей чистой и холодной водой (питьевого качества). Сильно загрязненные продукты, особенно с неровной поверхностью, моют мягкой щеткой под краном с душевой насадкой. Нежные ягоды ополаскивают водой под душем или погружают несколько раз в теплую воду в сите или дуршлаге.

Следует иметь в виду, что если мойка не была проведена должным образом, то может иметь место перекрестное загрязнение [87, 88].

Мойка оказывается малоэффективной, если продукты содержат препараты, которые, обладая липофильными свойствами, прочно связываются с восками кутикулы [89]. В то же время известно немало веществ (например, производные карбаминовой и тиокарбаминовой кислот), которые хорошо смываются водой. Эффективность мойки существенно повышается при использовании различных моющих средств, удаляющих жиры и воски (детергенты, каустическая сода, спирты). При этом объемное соотношение между продуктами и моющей жидкостью обычно составляет не менее 1:5.

Для улучшения качества очистки продуктов от пестицидов их обрабатывают водными растворами щелочей и ПАВ [55, 89]. При этом следует учитывать, что эффективность снижения остаточных количеств пестицидов зависит от характера их распределения в разных частях плодов и овощей. В частности, основное количество фосфорорганических и хлорорганических пестицидов концентрируется в кожуре или на поверхности продуктов, практически не проникая внутрь их.

Эффективность очистки поверхностей плодов и овощей в процессе мойки зависит от интенсивности их взаимодействия между собой, с моющими жидкостями и элементами конструкции моечных машин, а также от продолжительности мойки [23]. Довольно трудно отмывать сильно загрязненные продукты, а также продукты с негладкой поверхностью, на которой загрязнения могут скапливаться и прочно удерживаться. В таких случаях требуется предварительное вымачивание продуктов, а также более продолжительная мойка.

В зависимости от механических свойств обрабатываемых плодовоовощных продуктов моечные машины принято делить на два типа: с мягким и жестким режимами мойки [23, 90].

К первому типу относятся машины для мойки продуктов с мягкой структурой: помидоров, слив, вишен и т. д. В процессе мойки важно не повредить их структуру, для чего следует не допускать их сильных соударений между собой и с элементами конструкции машин. Для мойки таких продуктов предпочтительно использовать машины, снабженные оросительными системами.

Ко второму типу относятся машины для мойки продуктов с жесткой структурой: корнеплодов, огурцов, яблок и т. д. Обычно их моют в машинах, оснащенных лопастями, щетками и другими приспособлениями, оказывающими механические воздействия

на поверхность продуктов. С помощью таких машин можно эффективно очищать сильно загрязненные продукты.

При выборе моечного оборудования, а также условий мойки следует учитывать степень сцепления загрязнений с продуктами, которая может быть различной для разных видов загрязнений и продуктов. Так, установлены следующие ранжирования в порядке уменьшения удельного усилия адгезии: 1) в зависимости от почв: суглинок – супесь – чернозем – торф (для всех видов овощей); 2) в зависимости от вида овощей: картофель – морковь – огурцы – томаты (для всех видов почв) [8].

Особенности применения разных типов моечных машин для мойки плодоовощных продуктов приведены в табл. 2.1 [86].

Таблица 2.1  
Применение моечных машин для мойки плодоовощных продуктов

Виды продуктов	Типы используемых моечных машин, условия мойки
Зеленый горошек	Мойка во флотационной моечной машине, в которой отделяются легковесные и раздробленные зерна и легкие примеси (тяжелые примеси оседают на дно)
Бобы, фасоли	Мойка в вентиляторных или встряхивающих машинах
Томаты, баклажаны, кабачки, перец	Мойка последовательно в элеваторной и вентиляторной машинах
Свекла	Мойка последовательно в барабанной и вибрационной машинах (сильном загрязнении предварительная обработка в лопастной машине)
Шпинат, салат и др. зелень	Мойка под душем при давлении воды в водопроводе 200–300 кПа
Косточковые плоды	Мойка в вентиляторных или встряхивающих машинах
Семечковые плоды	Мойка последовательно в роторных и вентиляторных машинах
Ягоды	Мойка под душем

На многих консервных предприятиях эксплуатируются моечные машины, входящие в состав комплексных технологических линий по переработке разных видов плодов и овощей. В рамках этой



переработки выполняются следующие операции: отмочка продуктов, предварительная и основная мойка, ополаскивание, а также инспекция, во время которой отбираются гнилые, битые, неправильной формы продукты и посторонние примеси [86].

В последние годы серийно выпускаются разнообразные по конструкции и функциональным возможностям моечные установки, предназначенные для очистки поверхностей плодоовощных продуктов от загрязнений с помощью воды и моющих растворов. Ниже в качестве примера рассмотрены некоторые из них.

1. Щеточная моечная машина Т1-КУМ-3 – предназначена для мойки огурцов, баклажанов, кабачков и других твердых плодов и овощей (рис. 2.11) [23, 91]. Машина оборудована ванной, в верхней части которой установлены щеточные барабаны, а в нижней – неподвижный щеточный поддон. В конце ванны расположен элеватор (цепной транспортер с лотками), над которым находятся душевые коллекторы. Продукты загружаются во входную часть ванны, где происходит их предварительная замочка. Там же отделяются камни (они оседают в камнеотделитель), а также органические примеси (с помощью переливного устройства). Затем продукты передаются к вращающимся щеточным барабанам, где они очищаются от загрязнений, и далее поступают вдоль поддона на элеватор, где они оmyваются водой.

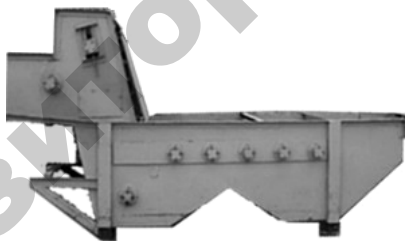
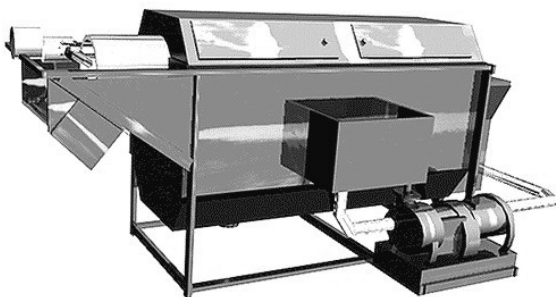


Рис. 2.11. Щеточно-моечная машина Т1-КУМ-3

2. Барабанная моечная машина А9-КМ-2 – предназначена для мойки баклажанов, кабачков, корнеплодов и других твердых плодов и овощей в жестком режиме (рис. 2.12) [23, 92]. Продукты загружаются в машину через загрузочный лоток, из него попадают в барабан первичной мойки, а затем в барабан вторичной мойки, после чего ковшом переносятся в третий барабан, в котором ополаскиваются под душем.



*Рис. 2.12. Моечная барабанная машина А9-КМ-2*

3. Моечная машина АТІR II – позволяет осуществлять мойку больших объемов овощей (включая салаты) без повреждения их структуры (рис. 2.13) [93]. Машина оснащена системой, создающей в моечной ванне регулируемый водоворот или вихрь. При этом вода проникает сквозь погруженные в машину продукты и интенсивно их омывает, избавляя от загрязнений. Мощность водного напора регулируется в зависимости от вида очищаемых продуктов.



*Рис. 2.13. Моечная машина АТІR II*

4. Моечная барботажная машина – предназначена для предварительного замачивания и первичной мойки картофеля, свеклы, томатов с твердой структурой, моркови, репы, кабачков и других овощей (рис. 2.14) [94]. Продукты перемещаются по транспортеру в моечной ванне с водой, которая в процессе мойки барботируется.

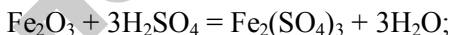
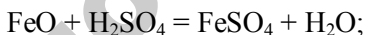


Рис. 2.14. Моечная барботажная машина

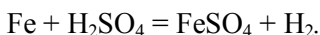
## 2.2. Травление

Травление применяется для удаления с металлических поверхностей окалины, а также продуктов коррозии. Различают химическое и электрохимическое травление.

Химическое травление металлов обычно проводят в водных растворах соляной или серной кислот и их смесях (также используются некоторые другие кислоты) [56, 58, 60, 62, 95]. Оно заключается в химическом взаимодействии кислоты с оксидным слоем на металле с образованием водорастворимых солей [56]. Так, в случае травления окалины на железе, состоящей из окислов  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , с использованием в качестве травителя серной кислотой имеют место следующие реакции:



Наряду с травлением окислов может происходить частичное травление отдельных участков поверхности металлического железа, если они оказались непокрытыми слоем окалины. При этом происходит следующая реакция:



Во избежание этого нежелательного явления в травильные растворы вводят специальные вещества – ингибиторы травления, которые покрывают очищенные участки металлической поверхности тонкой пленкой, не пропускающей травящий раствор.

Как правило, травление проводят при повышенных температурах. Добавление ПАВ к растворам кислот позволяет выполнять очистную обработку поверхностей одновременно и травлением, и обезжириванием [56].

Химическое травление характеризуется сравнительно малой производительностью. Более производительным является электрохимическое травление, которое к тому же обеспечивает более полное удаление загрязнений, что обусловлено активным действием выделяющихся на электродах пузырьков газа, которые интенсифицируют разрушение слоя окислы и его отрыв от металла [56].

Ванны для травления изготавливают из полипропилена и некоторых полимерных материалов (рис. 2.15) [66].

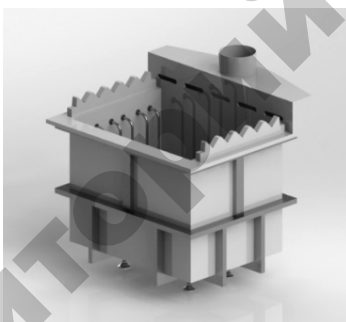


Рис. 2.15. Ванна из полипропилена для травления

### 2.3. Механическая обработка

Механическая обработка применяется для очистки металлических поверхностей деталей от окислы, продуктов коррозии, нагара, старых лакокрасочных покрытий, а также для устранения дефектов поверхности [56, 84, 96, 97]. Главным образом она включает различные варианты абразивной обработки; в гораздо меньшей мере используется обработка фрезами, щетками (крацевание), дробью (дробеструйная обработка).

Основными видами абразивной обработки, применяемыми для очистки поверхностей, являются шлифование и полирование, струйная абразивная и гидроабразивная обработка.

Шлифование вызывает на поверхности металла прижоги, которые возникают вследствие ее сильного нагрева в зоне контакта шлифовального круга и обрабатываемой детали. Кроме того, оно приводит к образованию на поверхности микротрещин и царапин, в которых могут скапливаться остатки смазочно-охлаждающих жидкостей. Подобным недостатком обладает и полирование – после него в микропорах и микротрещинах поверхности могут оставаться остатки полировальной пасты. И шлифование, и полирование трудно реализовывать в тех случаях, когда обрабатываемые поверхности обладают сложной трехмерной формой.

Струйная абразивная (пескоструйная) обработка заключается в ударном воздействии потока абразивных частиц на обрабатываемую поверхность [97]. Подача абразива осуществляется с помощью сжатого воздуха или центробежной силы. В воздушно-абразивный поток добавляется небольшое количество воды для предотвращения образования мелкой абразивной пыли.

В последние годы получила развитие очистка поверхностей деталей путем струйной обработки гранулами сухого льда [98]. Преимущество такой очистки состоит в том, что чистящее средство полностью испаряется с обрабатываемой поверхности, не повреждая при этом саму поверхность. Данный вид обработки по характеру осуществления подобен струйной абразивной обработке, однако он не дает абразивного эффекта, заключающегося в разрушении поверхности.

Гидроабразивная обработка осуществляется погружением обрабатываемых деталей в контейнер с абразивной суспензией и сообщением деталям и суспензии движения друг относительно друга путем вращения детали в контейнере с суспензией, создания струй жидкости с абразивом, прокачки абразивной суспензии через обрабатываемые отверстия или полости деталей [96].

В гидроабразивной обработке сочетаются достоинства моечно-очистной и абразивной обработки. Эффективность гидроабразивной обработки значительно повышается, если в качестве рабочей жидкости использовать не обычную воду, а водные моющие растворы, благодаря чему становится возможным вымывать загрязнения из пор и микротрещин [99].

Особым видом абразивной обработки является вибрационная обработка, осуществляемая с помощью абразивных материалов [100]. Она позволяет выполнять следующие операции: очистные (удаление окалины, накипи, коррозии); отделочно-зачистные (удаление заусенцев, скругление острых кромок); отделочно-упрочняющие (полирование, поверхностное упрочнение). Сущность вибрационной очистки состоит в том, что загрязненные детали и абразивный материал помещают в рабочую камеру, которой сообщаются вибрации, благодаря чему абразивные частицы наносят многочисленные микроудары по поверхности деталей, вызывающие разрушение загрязнений. Для удаления фрагментов разрушенных загрязнений и интенсификации очистки в камеру подают технологическую жидкость или сжатый воздух.

## **2.4. Обработка физическими воздействиями**

### **Обработка деталей сельскохозяйственной техники**

К способам очистки металлических поверхностей деталей от загрязнений, основанным на использовании физических воздействий, относятся лазерная, плазменная и термическая обработка.

Лазерная обработка применяется для очистки металлических поверхностей деталей от окалины, продуктов коррозии, лакокрасочных, масляных и других загрязнений, которые удаляются в результате испарения, вызванного лазерным нагревом [7, 63]. Также возможно удаление загрязнений в результате быстрого теплового расширения материала загрязнений при поглощении лазерного излучения, приводящего к возникновению в материале (или воздухе) ударной волны.

Плазменная обработка заключается в ионной бомбардировке материала загрязнений, в результате которой загрязнения «выбиваются» с обрабатываемой поверхности [101]. Такой механизм очистки имеет место в том случае, когда плазма образуется из нейтральных газов, например, аргона. Если плазма образуется из активных газов, таких как кислород и водород, то удаление загрязнений может происходить в результате химического взаимодействия ионов газа с материалом загрязнений. Так, в результате воздействия плазмы удаляются органические загрязнения, которые превращаются в низкомолекулярные газовые со-

единения [101]. Аналогично под воздействием плазмы удаляется окалина за счет восстановления железа из его окислов [95].

Термическая обработка применяется для удаления загрязнений с поверхности термостойких деталей. Так, в установках вакуумного пиролиза при температурах около 500 °С удаляются органические отложения в виде продуктов деструкции полимерных материалов [102]. Аналогично при таких же температурах происходит сжигание остатков масел [103]. Особенно интенсивное удаление масел с поверхности достигается при их нагреве в вакууме [59, 64]. При этом масляные загрязнения переводятся в летучие продукты, которые затем откачиваются из вакуумной камеры.

Термическая обработка обеспечивает эффективную очистку металлических поверхностей от окалина и продуктов коррозии [96]. Поверхности нагревают с помощью кислородно-ацетиленовой или керосиново-кислородной горелки. Окалина вследствие малого коэффициента теплового расширения при нагревании растрескивается и отслаивается. В свою очередь, ржавчина разрыхляется, после чего ее можно легко убрать с поверхности проволочной щеткой.

### **Обработка плодоовощных продуктов**

Плоды и овощи обрабатывают ультрафиолетовым облучением, обеспечивающим устранение бактериальной и вирусной инфекции продуктов и увеличение сроков их хранения [103]. Также их подвергают обработке электромагнитными полями, оказывающими губительное воздействие на насекомых-вредителей, что объясняется диэлектрическим нагревом компонентов организма, приводящим к денатурации белка, а также различными биологическими явлениями, не связанными с тепловыми эффектами [105].

Одним из перспективных способов продления сроков хранения плодоовощных продуктов в послеуборочный период является радиационная обработка. Установлено, что обработка плодов и овощей гамма-излучением от источников кобальт-60 и цезий-137, а также ускоренным электронами с энергией квантов не выше 10 МэВ практически исключает какую-либо возможность проявления наведенной радиоактивности [106].

В зависимости от доз облучения радиационная обработка приводит к подавлению жизнедеятельности либо к полному уничтожению микроорганизмов [107]. Также она способствует уничтожению

насекомых-вредителей [106]. Биологическое действие радиации обусловлено ионизацией и возбуждением атомов и молекул живой материи, что влечет за собой разрыв молекулярных связей, изменение структуры различных химических соединений, расщепление воды на водород и гидроксильную группу и т. д.

Радиационная обработка плодов с коротким сроком хранения (земляника, малина, черешня, вишня, абрикосы, персики) позволяет увеличить сроки их хранения на 1–2 недели [106].

Высокая эффективность очистки поверхностей плодоовощных продуктов от загрязнений обеспечивается при использовании комбинированных способов очистки, сочетающих различные виды обработки поверхностей. Например, существенное сокращение потерь плодоовощной продукции достигается за счет радиационной обработки, проводимой в сочетании с холодильным хранением в регулируемой газовой среде или с обработкой антисептическими препаратами [106].

Комбинированные способы очистки особенно перспективно использовать в тех случаях, когда к сохранности овощей и фруктов предъявляются повышенные требования. Так, довольно высокие требования предъявляются к сохранности яблок премиум-сортов, а также яблок, предназначенных для специального употребления. Такие яблоки подвергают, как правило, комбинированным методам обработки. В частности, предложена технология подготовки к хранению свежих яблок для их последующего использования в космическом питании. Согласно такой технологии яблоки при заданных режимных параметрах моют в питьевой воде, затем последовательно выдерживают в растворах 0,02 % перманганата калия и 0,5 % лимонной кислоты и в 0,005 % суспензии препарата, полученного из биомассы микромицета *Mortierella sarnyensis*, после чего плоды подвергают ультрафиолетовому облучению [108].

## **2.5. Обработка дезинфектантами и биопрепаратами**

Для повышения степени очистки поверхности плодов и овощей от микробиальных загрязнений применяют различные дезинфицирующие средства [109]. Так, для уменьшения количества



микроорганизмов в воде в нее добавляют хлор. С этой же целью используют О-фенилфенат натрия, способный удалять споры на продуктах и снижать количество спор в воде, применяемой для мойки, а также дифенил, замедляющий образование спор на гниющих продуктах. Таким образом, предотвращается заражение других продуктов спорами плесени.

Среди разнообразных дезинфектантов, используемых для обработки плодов и овощей, наиболее распространенным является озон (озоновоздушные смеси или озонированная вода) [110, 111]. Благодаря озонированию существенно снижается обсемененность продуктов гнилостной микрофлорой. Например, обработка яблوك в процессе их хранения озоном в концентрации 30–35 мг/м<sup>3</sup> при 3-кратной 15-минутной экспозиции с перерывом по 45 минут обеспечивает уменьшение потерь ябллок на 30–40 % за счет снижения их микробной загрязненности [111].

Для уменьшения потерь от микробиологической порчи плоды и овощи обрабатывают различными биопрепаратами. Так, существенное продление срока хранения ябллок может быть достигнуто применением антиоксидантов группы гуанидинов [112]. Кроме того, повышение устойчивости ябллок к воздействию микроорганизмов обеспечивается использованием бактериальных препаратов на основе бактерий-антагонистов фитопатогенов [113].

В заключение следует заметить, что микроорганизмы можно уничтожать консервированием продуктов [114–116]. Аналогично остатки пестицидов можно удалять высокотемпературной кулинарной обработкой продуктов (варкой, жарением, печением, бланшированием) [32, 51, 117–123]. Однако переработанные такими способами продукты теряют свой первоначальный свежий вид.

### 3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ КАВИТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ

#### 3.1. Возникновение и развитие кавитации

Кавитация – это процесс образования в жидкости пузырьков (каверн, полостей), заполненных газом, паром или их смесью, и их последующего захлопывания. Кавитационные пузырьки образуются в результате сильного локального понижения давления в жидкости и захлопываются – в результате его повышения.

Различают гидродинамическую и акустическую кавитацию. Гидродинамическая кавитация возникает в результате понижения давления в потоке жидкости, которое происходит при резком увеличении скорости потока. Акустическая кавитация возникает в результате понижения давления в жидкости, которое происходит при прохождении в жидкости высокоинтенсивной звуковой волны во время полупериода разрежения. Перемещаясь с потоком в область с повышенным давлением (в случае гидродинамической кавитации) или во время полупериода сжатия (в случае акустической кавитации), пузырьки захлопываются.

Пузырьки образуются в тех местах, где давление в жидкости оказывается ниже некоторого критического значения, соответствующего порогу кавитации [124, 125]. Для спонтанного образования пузырьков в идеальной однородно чистой жидкости требуются достаточно большие растягивающие напряжения. В реальных условиях разрывы сплошности жидкости происходят при давлениях, которые лишь немного меньше давления насыщенного пара при данной температуре, что объясняется наличием зародышей кавитации – микроскопических газовых пузырьков, присутствующих в объеме жидкости или в трещинах и порах на поверхности твердых тел (частиц), находящихся в жидкости. Эти зародыши, оказавшись в области пониженного давления, теряют свою устойчивость и начинают быстро расти в размерах. Их расширение обусловлено диффузией газа из жидкости в пузырек и испарением жидкости в пузырек, а также коагуляцией зародышей.

Характерной особенностью акустической кавитации является реализация резонансного механизма накопления энергии пузырьками в результате периодического изменения давления в жидкости, обусловленного прохождением звуковой волны [124, 125].

Пузырьки, возникшие в звуковом поле, совершают интенсивные радиальные пульсации. Поведение пульсирующего пузырька определяется соотношением периода изменения звукового давления  $T$  и периода собственных колебаний пузырька  $\tau$ , который растет с увеличением радиуса пузырька и зависит от амплитуды избыточного давления. Сравнительно мелкие пузырьки (у которых  $\tau < T$ ) совершают вынужденные пульсации, следуя изменению давления в звуковой волне до тех пор, пока его амплитуда невелика. С увеличением амплитуды пузырек уже не в состоянии следовать в своем поведении за изменением давления: быстро расширяясь в течение полупериода растяжения, он, в силу инерции жидкости, не успевает захлопнуться, а лишь несколько уменьшает свой радиус в течение последующего полупериода сжатия, так что захлопывание пузырька приходится на начало следующего полупериода растяжения. В итоге пульсирующий пузырек может захлопнуться с пропуском одного или нескольких полупериодов сжатия (при достаточно большой амплитуде звукового давления).

Степень сжатия пузырька при захлопывании определяется отношением его максимального радиуса  $R_{\max}$  к минимальному  $R_{\min}$ . Она тем больше, чем больше давление в жидкости  $P$  и меньше содержание газа в пузырьке, характеризуемое давлением  $p$ :

$$\frac{R_{\max}}{R_{\min}} = \left[ \frac{P(\gamma - 1)}{p} \right]^{\frac{1}{3}(\gamma - 1)}, \quad (3.1)$$

где  $\gamma = C_p/C_v$  – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и объеме;  $P = P_0 + p_a$ ,  $P_0$  – гидростатическое давление;  $p_a$  – амплитуда звукового давления [124].

Если пузырек содержит много газа, то после достижения минимального радиуса он восстанавливается и совершает несколько циклов затухающих колебаний, если же газа мало, то он захлопывается в первом полупериоде сжатия. При захлопывании пузырька газ (или пар) вследствие адиабатического сжатия сильно нагревается (до  $10^4$  К). Максимальное давление  $P_{\max}$  в пузырьке, соответствующее его минимальному размеру, выражается следующей формулой [124]:

$$P_{\max} = p \left[ \frac{P(\gamma - 1)}{p} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}. \quad (3.2)$$

Пузырек захлопывается с большой скоростью, максимальная скорость захлопывания достигается в окрестности пузырька минимального радиуса.

Пузырьки, образующиеся в процессе акустической кавитации, скапливаются в объеме жидкости, формируя «облако» пузырьков – кавитационную область. В развитой кавитационной области количество пузырьков намного превышает количество зародышей [125, 126]. Это объясняется тем, что процесс образования пузырьков идет подобно цепной реакции: при захлопывании пузырек может терять устойчивость и распадаться на множество более мелких пузырьков, которые становятся новыми зародышами кавитации. Степень развития и характер протекания кавитации могут изменяться с изменением газосодержания в жидкости, а также гидростатического давления.

В жидкости при распространении в ней ультразвука, наряду с акустической кавитацией, возникают акустические течения (вихревые течения, образующиеся в жидкости, под действием УЗ колебаний) и радиационное давление (давление, испытываемое препятствием, находящимся в УЗ поле) [124].

Для возбуждения кавитации применяются различные по конструкции устройства – кавитаторы. В практике кавитационной очистки поверхностей от загрязнений используют следующие два типа кавитаторов, работающих в УЗ диапазоне частот: гидродинамические излучатели и электроакустические преобразователи-излучатели (соответственно, первые служат для создания гидродинамической кавитации, вторые – акустической кавитации). Гидродинамические излучатели отличаются сравнительной простотой конструкции, надежностью работы и низкой стоимостью. Вместе с тем гидродинамическая кавитация менее эффективна при воздействии на обрабатываемые объекты, чем акустическая кавитация [124, 127].

Важной в практическом отношении характеристикой кавитации является ее активность, т. е. способность вызывать специфические кавитационные эффекты, которые используются в разных технологических процессах, в том числе при очистке поверхностей от загрязнений. Эти эффекты делятся на первичные, являющиеся непосредственным результатом поведения пузырьков, и вторичные, являющиеся следствием первичных [124, 128, 129].

К первичным эффектам кавитации относятся, прежде всего, гидродинамические возмущения, создаваемые захлопывающимися и пульсирующими пузырьками. Захлопывающиеся пузырьки порождают сферические микроударные волны и кумулятивные микроструи (последние возникают в тех случаях, когда пузырьки вследствие потери устойчивости формы захлопываются несимметричным образом; в частности, это имеет место при сближении пузырька с твердой поверхностью). При захлопывании происходит сильный локальный нагрев вещества, наблюдается выделение газов, содержащих атомарную и ионизованную компоненты, а также аномально глубокое проникновение жидкости в капилляры (узкие каналы, трещины и т. п.) (ультразвуковой капиллярный эффект). Пульсирующие пузырьки порождают микропотоки.

Вторичными эффектами кавитации являются разрушение материалов и модифицирование их структуры, интенсификация химических и массообменных процессов, изменение состояния биологических объектов.

Изменяя условия развития кавитации, можно управлять различными кавитационными эффектами, усиливать их или ослаблять. Так, в случае акустической кавитации с повышением частоты звука усиливается роль микропотоков и ослабляется кавитационная эрозия, а с увеличением гидростатического давления, напротив, растет амплитуда давления в импульсе сжатия [124]. При осуществлении кавитационной очистки первый из указанных режимов предпочтительно использовать для обработки мелких хрупких деталей, второй – для удаления окалины и даже заусенцев с металлических поверхностей.

### **3.2. Основные закономерности кавитационной очистки**

#### **Механизмы кавитационной очистки**

В соответствии с двумя видами кавитации – гидродинамической и акустической, различают два вида кавитационной очистки – гидрокavitационную и акустико-кавитационную.

Кавитация обеспечивает эффективное удаление загрязнений с поверхностей деталей сельскохозяйственной техники во время моечно-очистной обработки. Она позволяет не только ускорять

процесс очистки, но и повышать степень чистоты поверхностей. Кавитационная очистка может осуществляться по разным механизмам – в зависимости от свойств удаляемых загрязнений.

Решающую роль в удалении загрязнений играют микроударные волны, порождаемые захлопывающимися пузырьками [124, 130]. Они способны разрушать слои загрязнений, обладающие довольно высокой кавитационной стойкостью и прочно связанные с очищаемой поверхностью (нагар, окалина, смолистые отложения). Микроударные волны вызывают в нем развитие локальных напряжений, которые распределяются в слое весьма неравномерно. Это приводит к появлению в слое трещин, а также очагов эрозии, которые наблюдаются на поверхности слоя в виде точечных кратеров [130, 131]. По мере увеличения длительности микроударной обработки слой загрязнения во все большей мере подвергается диспергированию [124].

Микроударные волны, мощность которых достаточна для того, чтобы разрушать загрязнения, порождаются не всеми захлопывающимися пузырьками, а только лишь их небольшой частью [132]. Это объясняется тем, что величина ударного давления, развиваемого при захлопывании пузырька у загрязненной поверхности, зависит от условий развития кавитации и может оказаться недостаточной для того, чтобы вызвать разрушение загрязнения. Также загрязнение не будет разрушаться в том случае, если пузырек в момент захлопывания расположен слишком далеко от загрязненной поверхности.

Загрязнения разрушаются под действием не только микроударных волн, но и кумулятивных микроструй, порождаемых захлопывающимися пузырьками. Кумулятивные микроструи разрушают загрязнения благодаря их большой кинетической энергии [132, 133].

Захлопывающиеся пузырьки могут оказывать разрушающие воздействия на слой загрязнения, как с его наружной части, так и изнутри – в результате проникания вместе с микропотоками жидкости в поры и трещины слоя или под его отслоившиеся участки [132, 133].

В разрушении загрязнений, наряду с захлопывающимися пузырьками, участвуют пульсирующие пузырьки [124, 130, 131]. Они способны разрушать в основном слои загрязнений, обладающие низкой кавитационной стойкостью и слабо связанные с очищаемой поверхностью. Попадая под отслоившийся участок, они, совершая

интенсивные колебания, разрывают и отслаивают его (рис. 3.1) [124]. В тех случаях, когда загрязнение нанесено на поверхность в виде тонкого непрочного слоя, слабо связанного с поверхностью (например, это может быть тонкий грязевой слой), пульсирующие пузырьки могут вызывать селективное разрушение слоя по мере своего перемещения по поверхности, оставляя вслед за собой «расчищенные дорожки» [130, 131].



Рис. 3.1. Схема разрушения слоя загрязнения пульсирующими кавитационными пузырьками:  
а – начальный этап; б – момент разрушения

В случае акустической кавитации определенную роль в разрушении загрязнений играют радиационное давление и ультразвуковой капиллярный эффект, которые способствуют проникновению моющей жидкости в микропоры или микротрещины слоя загрязнения [124].

Процессы кавитационной очистки могут иметь те или иные особенности, обусловленные свойствами удаляемых загрязнений [124, 130, 131]. Так, масляные загрязнения под действием кавитации могут подвергаться эмульгированию, масляно-грязевые – как эмульгированию (масляная фаза), так и диспергированию (грязевая фаза). Если загрязнения растворимы в моющей жидкости, то кавитация способствует их удалению за счет повышения скорости растворения. Если же загрязнения химически взаимодействуют с моющей жидкостью, то кавитация способствует их удалению за счет повышения скорости химических реакций (это имеет место при удалении загрязнений травлением).

Как правило, загрязнения поверхности имеют многокомпонентный состав и могут содержать в комплексе различные компоненты: твердые и вязко-жидкие, растворимые и нерастворимые в моющей жидкости, химически активные и нейтральные в отношении нее. При этом важно отметить, что все эти компоненты могут подвергаться кавитационной очистке за счет одновременной реализации ее различных механизмов [134].

Для более эффективного удаления слоя загрязнения с поверхности важно обеспечить не только разрушение этого слоя и первоначальное удаление с поверхности образовавшихся продуктов его разрушения, но и последующий их отвод из участков объема моющей жидкости, прилегающих к поверхности.

Рассмотрим в качестве примера процесс очистки поверхности от загрязнений растворением в моющей жидкости (рис. 3.2) [134]. Моющая жидкость, играющая роль растворителя, входит в контакт со слоем загрязнения, который начинает растворяться (рис. 3.2, а). При этом у межфазной границы растворитель-загрязнение происходит концентрирование загрязнения в растворителе. В отсутствие кавитации содержание образующегося раствора повышается по мере того как растворитель растворяет загрязнение. Соответственно, доставка растворителя к слою загрязнения все более ухудшается, растворение замедляется и, в конце концов, останавливается (рис. 3.2, б). При наличии кавитации микроударные волны и кумулятивные микроструи, порождаемые захлопывающимися пузырьками, не только разрушают загрязнения, но также переводят продукты их разрушения в моющую жидкость – сначала в приповерхностную область, а затем на более значительное удаление от очищаемой поверхности. Как следствие, доставка растворителя к слою загрязнения улучшается (рис. 3.2, в). Такая интенсификация межфазного массообмена особенно эффективна в тех случаях, когда очистке подвергаются поверхности, имеющие сложный рельеф и содержащие труднодоступные для растворения углубления.

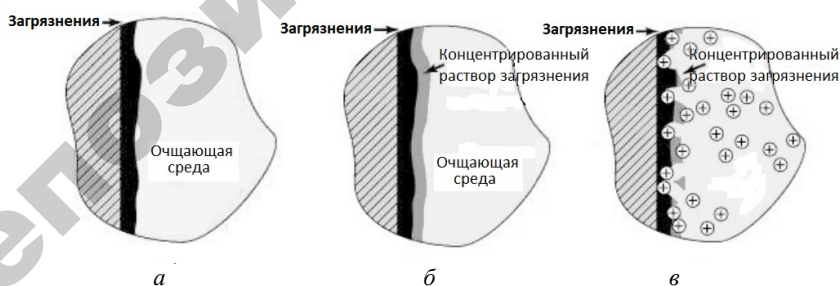


Рис. 3.2. Схема кавитационного удаления растворимого загрязнения с поверхности: а – исходное состояние; б – концентрирование растворенного загрязнения у очищаемой поверхности; в – распределение растворенного загрязнения по объему моющей жидкости



Подобным образом, благодаря кавитационной обработке, ускоряется процесс очистки поверхности от нерастворимых загрязнений, продукты разрушения которых переходят в объем моющей жидкости, образуя эмульсии или суспензии (рис. 3.3) [134].

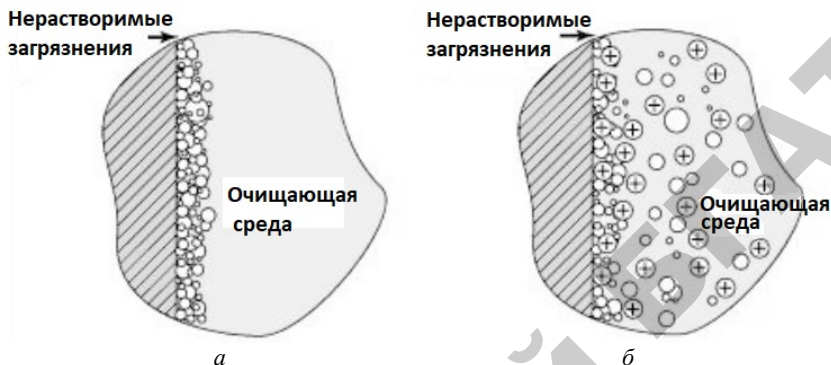


Рис. 3.3. Схема кавитационного удаления нерастворимого загрязнения с поверхности:

а – концентрирование диспергированных частиц загрязнения у очищаемой поверхности, б – распределение диспергированных частиц загрязнения по объему моющей жидкости

В случае гидродинамической кавитации отвод продуктов разрушения загрязнений от очищаемой поверхности в значительной мере обеспечивается потоком жидкости, выходящим из гидродинамического излучателя, а в случае акустической кавитации – акустическими течениями (эти течения также доставляют технологически активные кавитационные пузырьки к очищаемой поверхности) [135].

Эффективность кавитационной очистки поверхностей от загрязнений определяется качеством очистки, т. е. степенью достигаемой чистоты поверхностей (количеством оставшихся загрязнений) и производительностью очистки, т. е. длительностью кавитационной обработки, при которой обеспечивается требуемое качество очистки.

Обобщенным показателем, позволяющим судить об эффективности кавитационной очистки, является эрозионная активность кавитирующей моющей жидкости, т. е. способность моющей жидкости разрушать загрязнения и отделять их от очищаемой поверхности при наличии кавитации. Этот показатель включает

в себя как эрозионную активность кавитации, зависящую от характера развития кавитации, так и эрозионную активность моющей жидкости, зависящую от ее физико-химических свойств. При этом жидкость может не только оказывать непосредственное разрушающее воздействие на загрязнения, но и существенно влиять на характер развития кавитации.

Эрозионная активность кавитации определяется эрозионной активностью индивидуальных пузырьков и их концентрацией в моющей жидкости [130, 131].

Загрязнения разрушаются в результате многократных кратковременных воздействий, оказываемых захлопывающимися пузырьками. Другими словами, для разрушения загрязнения недостаточно захлопывания одиночного пузырька, необходимо захлопывание в одном и том же месте вблизи очищаемой поверхности множества пузырьков [132].

Отличительные особенности имеет механизм кавитационной очистки поверхностей металлических деталей от шаржированных абразивных частиц [10, 18].

Частицы внедряются в микронеровности поверхности под действием высоких удельных нагрузок. Максимальная сила, удерживающая частицу, застрявшую в материале обрабатываемой детали, определяется пределом текучести этого материала. Для удаления частицы необходимо преодолеть действие силы сухого трения

$$F_{\text{тр}} < \mu N_{\text{max}} = \mu \sigma_T S, \quad (3.3)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения между материалами детали и частицы;  $N_{\text{max}}$  – максимально возможная в пределах упругой деформации сила нормального давления;  $S$  – полная площадь соприкосновения частицы с поверхностью углубления полости;  $\sigma_T$  – предел текучести материала детали [10].

Соответственно силу  $F_{\text{удал}}$ , необходимую для удаления застрявшей частицы, можно оценить следующим образом:

$$F_{\text{удал}} > F_{\text{mp}}^{\text{max}} = \mu \sigma_T S. \quad (3.4)$$

Удаление шаржированных частиц из обрабатываемой поверхности может происходить за счет работы пульсирующих пузырьков, а также при ударном действии захлопывающихся пузырьков. Определяющую роль играет расклинивающее действие на частицы со стороны пульсирующих пузырьков [10]. Эти пузырьки локализируются в микротрещинах на обрабатываемой поверхности рядом с находящимися там частицами и, совершая действие благодаря пульсации, воздействуют на материал детали, раздвигая стенки углублений в полупериоды своего расширения. В результате ослабляются связи между материалом детали и шаржированными частицами, что приводит к уменьшению силы трения. Захлопывающиеся пузырьки непосредственно вызывают разрушение частиц, в результате чего наблюдается процесс постепенного обкалывания шаржированных частиц [18].

Особым видом кавитационной очистки является абразивно-кавитационная очистка. Она применяется для повышения эрозионной активности кавитирующей моющей жидкости и осуществляется путем введения в нее тонкодисперсного абразивного материала. При этом удаление загрязнений с поверхности происходит благодаря разрушающему действию не только кавитационных пузырьков, но и абразивных частиц. В соответствии с двумя видами кавитации (гидродинамической и акустической) различают два вида абразивно-кавитационной очистки: абразивную гидрокавитационную очистку и абразивную акустико-кавитационную очистку.

Механизм абразивно-кавитационной очистки заключается в следующем [10, 124, 131, 136]. Абразивные частицы, оказываясь в зоне действия микроударных волн и кумулятивных струй, порождаемых захлопывающимися пузырьками, приобретают повышенные скорости и вызывают значительное разрушение загрязнений при столкновениях с ними. Благодаря сильному микрорежущему действию абразивных частиц, развиваемому в условиях кавитации, абразивно-кавитационная обработка применяется не только для очистки поверхностей металлических деталей, но также для снятия заусенцев и уменьшения шероховатости поверхностей.

В случае абразивной гидрокавитационной очистки абразивные частицы движутся вместе с кавитирующим потоком жидкости, направляемым на очищаемую поверхность. При этом скорость абразивной частицы складывается из скорости потока жидкости и дополнительной скорости, приобретенной за счет кавитации.

В случае абразивной акустико-кавитационной очистки абразивные частицы, находясь в жидкости, заполняющей рабочую емкость, развивают свою скорость в основном за счет действия захлопывающихся пузырьков. Кроме того, они приобретают дополнительное ускорение благодаря пульсирующим пузырькам, а также акустическим течениям.

### **Факторы эффективности кавитационной очистки**

Для достижения требуемых результатов кавитационной очистки необходимо обеспечить соответствующие режимы развития кавитации, что делается путем оптимизации условий проведения очистных процессов.

В случае акустической кавитации практически важно выбрать оптимальные значения интенсивности и частоты ультразвука (интенсивность ультразвука – это средняя по времени энергия, переносимая УЗ волной через единицу площади поверхности, перпендикулярной к направлению распространения волны, в единицу времени, или другими словами, средняя мощность ультразвука, отнесенная к единице площади поверхности, – так называемая средняя удельная мощность ультразвука) [124].

С повышением частоты колебаний пузырек не доходит до конечной стадии захлопывания, вследствие чего микроударное действие кавитации снижается, т.е. уменьшается кавитационная эрозия [124]. Кроме того, усиливается поглощение звуковой энергии жидкостью. С другой стороны, чрезмерно понижать частоту колебаний нежелательно из-за резкого возрастания кавитационного шума, а также увеличения резонансных размеров излучателей. Большинство УЗ установок, служащих для очистки поверхностей от загрязнений под действием акустической кавитации, работает в диапазоне частот от 18 до 44 кГц.

Мощность ультразвука следует выбирать с учетом конкретных условий проведения очистки [134]. Она должна сопоставляться с рабочим объемом моющей жидкости, с общей площадью одновременно очищаемых поверхностей, кавитационной стойкостью загрязнений. Чрезмерно высокая мощность ультразвука может вызывать нежелательную кавитационную эрозию поверхностей после того, когда они будут очищены от загрязнений. Интервал значений интенсивности ультразвука, при которых достигается наибольшая эффективность кавитационной очистки, обычно составляет от 0,5 до 10 Вт/см<sup>2</sup> [124].

Удельная акустическая мощность характеризуется амплитудой колебательных смещений излучателя: с возрастанием амплитуды смещений акустическая мощность и, следовательно, эрозионная активность кавитации увеличивается [136]. При этом следует учитывать, что степень кавитационно-эрозионного воздействия зависит не только от мощности излучаемого ультразвука, но и расстояния от излучателя до обрабатываемого образца: с увеличением этого расстояния эрозионная активность уменьшается, причем падение активности при больших амплитудах смещений меньше, чем при малых.

Эрозионная активность кавитации зависит от гидростатического давления, создаваемого в моющей жидкости, а также от таких свойств моющей жидкости, как температура, газосодержание, плотность, вязкость, поверхностное натяжение, упругость пара [124, 131, 134, 135].

С повышением гидростатического давления в моющей жидкости возрастает амплитуда давления в импульсах сжатия. Для увеличения микроударного воздействия захлопывающихся пузырьков при удалении сильно связанных с поверхностью загрязнений рекомендуется повышать гидростатическое давление до 2–4 атм [124].

Изменение температуры жидкости ведет к изменению вязкости жидкости, растворимости газов и скорости диффузии растворенных газов в жидкости, поверхностного натяжения жидкости что, в свою очередь, влияет на интенсивность кавитации [133, 134]. Для водных моющих растворов наиболее подходящей является температура в пределах 40–50 °С, при меньшей температуре снижается химическая активность раствора, при большей – повышается упругость пара [124]. В случае использования органических растворителей, для того чтобы снизить упругость пара, предпочтительно их охлаждать до 15–20 °С [124].

С увеличением содержания газа в пузырьках снижается эрозионная активность жидкости, в то время как усиленная дегазация жидкости ведет к сокращению числа центров кавитации, что снижает активность кавитации. Оптимальное газосодержание может быть достигнуто, с одной стороны, регулированием процесса дегазации, с другой – специальным вводом газа в жидкость [124].

Повышение плотности жидкости затрудняет образование кавитационных пузырьков в связи с ростом присоединенной массы жидкости, при этом уменьшаются количество и размеры кавитационных пузырьков [135].

С увеличением вязкости жидкости при малой интенсивности ультразвука растут потери звуковой энергии, т. е. снижается эрозионная активность кавитации. В противоположность этому увеличение вязкости при большой интенсивности способствует созданию благоприятных условий для развития кавитации, так как силы вязкого трения (аналогично избыточному давлению) препятствуют расширению пузырька после того, как наступила стадия сжатия в звуковой волне. Благодаря этому начальная стадия сжатия пузырька наступает раньше (совпадает с началом стадии сжатия в волне), повышается скорость и сокращается время захлопывания пузырька, возрастает микроударное воздействие, возникающее при его захлопывании [124]. Также в вязких жидкостях в силу их инерционности затруднено развитие акустических течений [134].

Повышение поверхностного натяжения жидкости в конечной стадии сжатия приводит к увеличению скорости захлопывания пузырьков и микроударного действия кавитации. С другой стороны, с повышением поверхностного натяжения возрастает порог кавитации и сокращается число кавитационных пузырьков, кроме того, ухудшается смачивающая способность жидкости. В практике кавитационной очистки поверхностное натяжение моющей жидкости обычно уменьшают путем введения в нее добавок поверхностно-активных веществ, которые улучшают смачиваемость слоя загрязнения и способствуют проникновению моющей жидкости в трещины и поры слоя и более легкому отрыву частиц загрязнений от очищаемых поверхностей благодаря образованию тонких адсорбционных пленок на их поверхности [124].

Повышение упругости пара внутри пузырьков резко снижает интенсивность кавитации, поэтому для кавитационной очистки более эффективно применять водные моющие растворы, чем органические жидкости, упругость пара в которых выше [124].

При выборе моющих жидкостей для кавитационной очистки необходимо учитывать особенности их применения для разных видов загрязнений [124]. Так, для очистки деталей от смазок, полировочных паст, металлической пыли, абразивов применяются водные щелочные растворы, характеризующиеся дешевизной, нетоксичностью и пожаробезопасностью в отличие от органических растворителей – бензина, четыреххлористого углерода, ацетона, трихлорэтилена, фреона. Для снятия окалины и нагара служат травильные растворы серной, соляной, азотной и других кислот.

### **Кинетика кавитационной очистки**

Поскольку кавитационная эрозия носит накопительный характер, то длительность кавитационной обработки является параметром, определяющим эффективность кавитационной очистки [135].

Процесс кавитационной очистки развивается неравномерно во времени, о чем, в частности, свидетельствуют результаты ряда экспериментальных исследований акустико-кавитационной очистки [10, 13, 136–139], согласно которым сначала наблюдается быстрое удаление основной массы загрязнения (до 80 %), происходящее за время, составляющее 5–10 % от общей длительности очистки, затем происходит относительно медленное удаление оставшейся массы загрязнения. Для такого характера развития акустико-кавитационной очистки было предложено эмпирическое уравнение, связывающее массу удаляемого загрязнения экспоненциальной зависимостью со временем [10, 13, 137, 138]. При этом было выдвинуто предположение о том, что причины неравномерного развития очистки связаны с неоднородной по толщине структурой слоя загрязнения: нижняя часть слоя, прилегающая к поверхности детали, является более плотной и прочной, а потому в меньшей мере поддается удалению [10, 138]. Однако это предположение не имело достаточно убедительного экспериментального подтверждения.

Ниже описаны экспериментальные исследования кинетических закономерностей акустико-кавитационной очистки, особенность которых состояла в том, что очистке подвергали специально приготовленные слои модельных загрязнений, которые имели как неоднородную, так и однородную структуру по толщине слоя [140].

Очистку проводили с помощью УЗ диспергатора (рабочая частота 22 кГц, выходная мощность 38 Вт), волновод-концентратор которого погружали в сосуд с моющей жидкостью – водой. На пластмассовую платформу, размещенную на дне сосуда, наносили слои загрязнения, состоящие из смеси глины и моторного масла марки 10W-40, толщину которых во время очистки контролировали. Было выполнено две серии сравнительных экспериментов.

В первой серии экспериментов изучали особенности удаления слоя загрязнения с неоднородной по толщине структурой. Удаляемый слой состоял из трех прослоек разного состава. В нижней прослойке объемное отношение глины к маслу составляло 4:1, в средней – 3:1,

в верхней – 2:1. Таким образом, нижняя прослойка, непосредственно контактирующая с платформой, имела наибольшую плотность, а верхняя прослойка, обращенная к излучателю, – наименьшую. Толщина каждой прослойки составляла 1 мм и, соответственно, всего слоя – 3 мм. Результаты экспериментов показаны на рис. 3.4 в виде кривой 1, которая имеет ярко выраженный нелинейный характер: загрязнение удаляется сначала сравнительно быстро, а затем все более медленно. На кривой можно выделить три почти линейных участка, каждый из которых соответствует удалению разных прослоек. Быстрее других удаляется верхняя, наименее плотная прослойка – приблизительно за 40 с. Время удаления средней прослойки составляет приблизительно 60 с, нижней – 80 с.

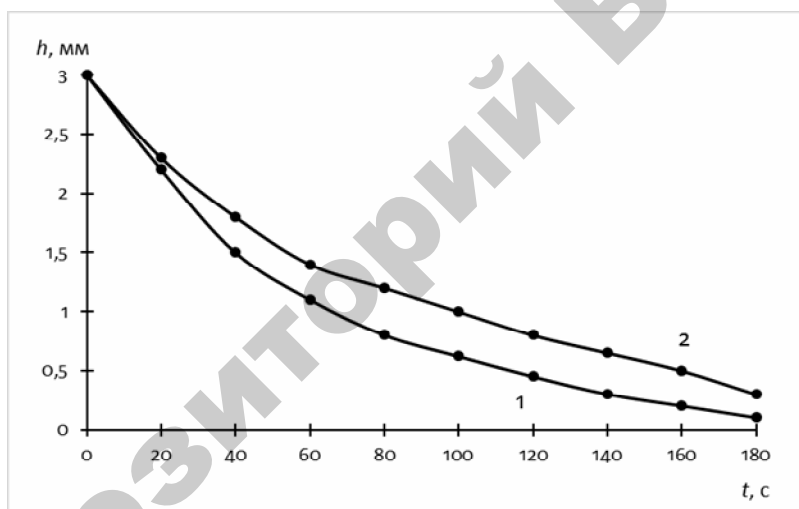


Рис. 3.4. Зависимость толщины  $h$  слоя загрязнения с неоднородной структурой от длительности  $t$  УЗ обработки в обычных условиях (1) и с прокачкой моющей жидкости (2)

Во второй серии экспериментов изучали особенности удаления слоя загрязнения с однородной по толщине структурой. Эксперименты проводили с тремя разными по составу слоями, в которых объемное отношение глины к маслу составляло 2:1, 3:1 и 4:1, т. е. было таким же, как в отдельных прослойках слоя с неоднородной



структурой в первой серии экспериментов. Толщина каждого слоя равнялась 3 мм, т. е. была такой же, как толщина слоя с неоднородной структурой в первой серии экспериментов. Результаты экспериментов показаны на рис. 3.5 в виде кривых 1, 2 и 3, которые, подобно кривой 1 на рис. 3.4, имеют нелинейный характер: загрязнение удаляется сначала сравнительно быстро, а затем все медленнее. Однако нелинейность этих кривых выражена в меньшей мере, чем кривой 1 на рис. 3.4. Следует также отметить разную крутизну этих кривых, т. е. разную длительность удаления слоев: чем меньше плотность слоя, тем быстрее он удаляется.

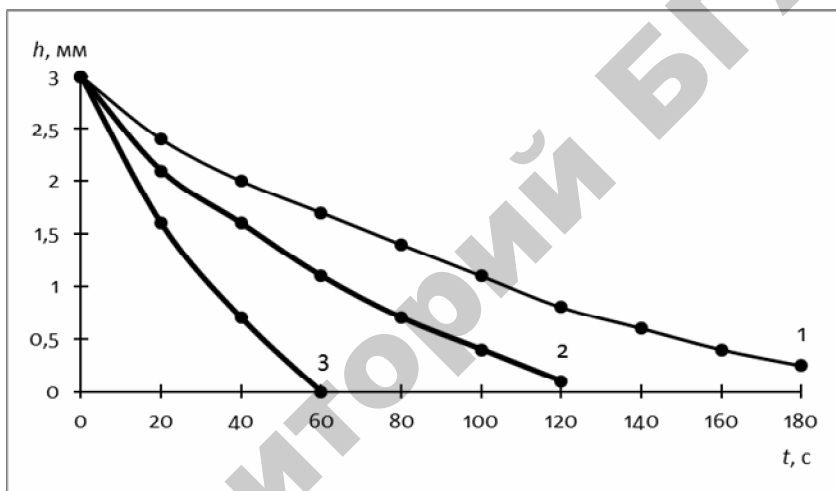


Рис. 3.5. Зависимость толщины  $h$  слоя загрязнения с однородной структурой от длительности  $t$  УЗ обработки в обычных условиях  
Объемное отношение глины к маслу в слое: 2:1 (3), 3:1 (2) и 4:1 (1)

Нелинейный характер зависимости  $h(t)$  на рис. 3.4 (кривая 1) может быть обусловлен неоднородной структурой слоя загрязнения, о чем упоминалось выше. При этом следовало бы ожидать, что для слоя загрязнения с однородной структурой зависимость  $h(t)$  должна быть линейной, однако, как показывают результаты экспериментов, она также имеет нелинейный характер. Это означает, что экспериментально наблюдаемое замедление удаления загрязнения

может быть обусловлено не только неоднородной структурой слоя загрязнения по толщине, но и иными причинами.

По-видимому, эти причины могут быть связаны с изменениями состояния моющей жидкости во время УЗ очистки, способными оказывать влияние на активность кавитации. В частности, такие изменения состояния моющей жидкости могут быть обусловлены появлением в ней мелкодисперсных фрагментов загрязнения – частиц глины и капель масла, которые отделяются от слоя загрязнения в результате его разрушения под действием кавитации. В итоге моющая жидкость, которой в данном случае является вода, превращается в комбинированную дисперсную систему – смесь суспензии и эмульсии. По мере разрушения слоя загрязнения концентрация глины и масла в воде увеличивается. Под действием кавитации фрагменты загрязнения, находясь в жидкости, дополнительно измельчаются, а под действием акустических потоков распространяются по объему жидкости.

Известно, что при распространении ультразвука в эмульсиях или суспензиях происходит ослабление интенсивности ультразвука вследствие его взаимодействия с частицами дисперсной фазы [141–143]. Это, соответственно, должно вести к снижению активности кавитации, т. е. ее способности оказывать разрушающее воздействие на загрязнения [130]. Отсюда можно сделать заключение о том, что наблюдаемое в экспериментах замедление УЗ очистки вызывается снижением активности кавитации в результате постепенного накопления мелкодисперсных фрагментов загрязнения в моющей жидкости.

Для демонстрации влияния содержания мелкодисперсных частиц в жидкости на активность кавитации были выполнены специальные эксперименты, в которых измеряли ее величину в воде с разной концентрацией содержащихся в ней частиц глины. Оценку значений активности кавитации  $a$  осуществляли по среднему давлению в зоне кавитации, измеряемому с помощью кавитометра ICA-4D-M (значения  $a$  выражали в относительных единицах). При проведении экспериментов воду в сосуде обрабатывали ультразвуком по описанной выше методике. Обработку проводили в несколько стадий, на каждой стадии в воду добавляли фиксированную дозу глины (2 г), после чего измеряли значения  $a$ . Результаты экспериментов, представленные на рис. 3.6, показывают, что активность кавитации уменьшается с увели-

чением концентрации частиц загрязнения в жидкости почти по линейному закону. Это согласуется с известными результатами исследований затухания ультразвука в эмульсиях и суспензиях, свидетельствующими о линейном увеличении коэффициента затухания с концентрацией дисперсной фазы [141–143].

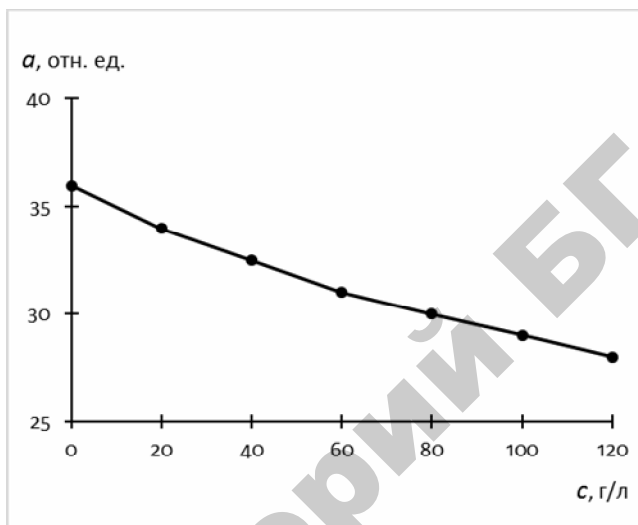


Рис. 3.6. Зависимость активности кавитации  $a$  от концентрации  $c$  глины в воде

Для выяснения характера влияния содержания дисперсной фазы в воде на процесс УЗ очистки были выполнены дополнительные эксперименты по удалению слоев загрязнения, которые имели как неоднородную, так и однородную структуру по толщине. Эти эксперименты были в целом аналогичны экспериментам, описанным выше. Отличительная их особенность состояла в том, что во время очистки в сосуд с помощью шланга непрерывно вводили под малым напором воду при температуре 20 °С. При этом излишки воды переливались через край сосуда, унося вместе с собой мелкодисперсные фрагменты загрязнения, так что содержание фрагментов загрязнения в находящейся в сосуде воде во время очистки заметно уменьшалось.

Результаты экспериментов по удалению неоднородного слоя загрязнения в условиях прокачки моющей жидкости показаны на рис. 3.4 (кривая 2). Как видно на этом рисунке, зависимость  $h(t)$ , полученная в условиях прокачки моющей жидкости, является ме-

нее крутой, чем зависимость  $h(t)$ , полученная в обычных условиях, т. е. без прокачки моющей жидкости (кривая 1).

Результаты экспериментов по удалению однородного слоя загрязнения (толщина 3 мм, объемное отношение глины к маслу 3:1) в условиях прокачки моющей жидкости показаны на рис. 3.7. Как видно на этом рисунке, зависимость  $h(t)$  является практически линейной (кривизна, которая может быть обусловлена наличием небольшого количества остающихся в жидкости фрагментов загрязнения, незначительна).

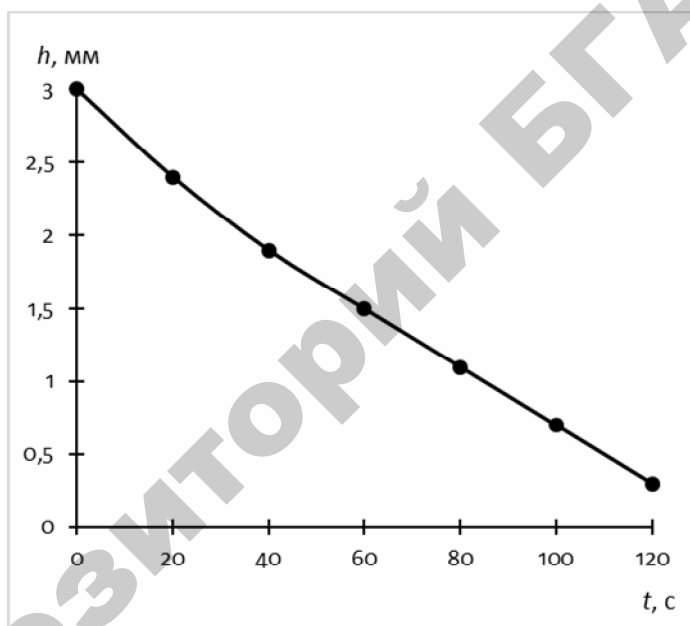


Рис. 3.7. Зависимость толщины  $h$  слоя загрязнения с однородной структурой от длительности  $t$  УЗ обработки с прокачкой моющей жидкости

Итак, результаты экспериментов свидетельствуют о том, что при проведении УЗ очистки в условиях прокачки моющей жидкости наличие фрагментов загрязнения в жидкости не оказывает заметного влияния на процесс очистки, поскольку их концентрация мала.

Полученным экспериментальным результатам можно дать следующую теоретическую интерпретацию.

Качество очистки поверхности оценивается толщиной  $h$  слоя загрязнения, остающегося не удаленным после очистки

$$h = h_0 - vt, \quad (3.5)$$

где  $h_0$  – начальная толщина слоя загрязнения;  $v$  – скорость продвижения фронта разрушения загрязнения от поверхности слоя к поверхности детали;  $t$  – длительность очистки.

Значение  $v$  тем больше, чем больше активность кавитации  $a$ , и чем меньше кавитационная стойкость загрязнения  $r$ :

$$v = k_v \frac{a}{r}, \quad (3.6)$$

где  $k_v$  – коэффициент.

Рассмотрим некоторые возможные варианты развития процесса очистки.

Вариант 1: во время очистки значения  $r$  и  $a$  не изменяются. Это может иметь место, когда структура удаляемого слоя загрязнения однородна по толщине, а очистка происходит в проточной системе с достаточно интенсивной прокачкой моющей жидкости, благодаря чему появляющиеся в жидкости фрагменты разрушаемого загрязнения полностью выносятся за пределы зоны обработки и не оказывают влияния на активность кавитации.

Тогда, подставляя (3.6) в (3.5), получаем выражение:

$$h = h_0 - k_v \frac{a}{r} t, \quad (3.7)$$

которое представляет собой кинетическое уравнение процесса очистки поверхности от слоя загрязнения с однородной по толщине структурой при постоянной активности кавитации. Зависимость  $h(t)$  согласно (3.7) имеет линейный вид: фронт разрушения слоя загрязнения продвигается равномерно во времени. Этому случаю соответствует экспериментальная зависимость  $h(t)$  на рис. 3.5.

Вариант 2: во время очистки значение  $r$  изменяется, а значение  $a$  остается неизменным. Это может иметь место, когда структура удаляемого слоя загрязнения неоднородна по толщине, а очистка происходит в проточной системе, как и в варианте 1.

Как отмечалось выше,  $r$  обычно увеличивается в направлении от поверхности слоя загрязнения к поверхности детали. Пусть по мере продвижения фронта разрушения загрязнения, т. е. по мере увеличения толщины удаленного слоя загрязнения  $(h_0 - h)$  значение  $r$  увеличивается линейно:

$$r = r_0 + k_r (h_0 - h), \quad (3.8)$$

где  $r_0$  – кавитационная стойкость загрязнения на поверхности слоя;  $k_r$  – коэффициент.

Тогда с учетом (3.8) выражение (3.7) приобретает следующий вид:

$$h = h_0 - \frac{k_v a}{r_0 + k_r (h_0 - h)} t. \quad (3.9)$$

После преобразования выражение (3.9) можно представить в виде квадратного уравнения, которое имеет следующее решение (с учетом того, что  $h$  уменьшается с увеличением  $t$ ):

$$h = h_0 + \frac{r_0}{2k_r} - \sqrt{\frac{r_0^2}{4k_r^2} t + \frac{k_v a}{k_r} t}. \quad (3.10)$$

Выражение (3.10) представляет собой кинетическое уравнение процесса очистки поверхности от слоя загрязнения с равномерно-неоднородной по толщине структурой при условии постоянства активности кавитации. Зависимость  $h(t)$  согласно (3.10) имеет нелинейный вид: фронт разрушения слоя загрязнения со временем продвигается все медленнее, что обусловлено увеличением кавитационной стойкости загрязнения по толщине слоя (от поверхности

слоя к поверхности детали). Этому случаю соответствует экспериментальная зависимость  $h(t)$  на рис. 3.4 (кривая 2) (слой загрязнения характеризуется линейно-ступенчатым изменением структуры по толщине).

Преобразуем выражение (3.10) следующим образом:

$$h = h_0 + A - \sqrt{A^2 + Bt}, \quad (3.11)$$

где

$$A = \frac{r_0}{2k_r}, \quad B = \frac{k_v a}{k_r}.$$

Уравнение (3.11) описывает кривую 2 на рис. 3.4 при  $A = 0,29$  и  $B = 0,049$  и имеет вид

$$h = h_0 + 0,29 - \sqrt{0,0841 + 0,049t} \quad (3.12)$$

(здесь согласно условиям экспериментов  $h_0 = 3$  мм).

Вариант 3: во время очистки значение  $r$  остается неизменным, а значение  $a$  изменяется. Это может иметь место, когда структура удаляемого слоя загрязнения однородна по толщине, а очистка происходит в замкнутой (непроточной) системе, благодаря чему появляющиеся в жидкости фрагменты разрушаемого загрязнения способны влиять на активность кавитации.

Пусть  $a$  уменьшается линейно по мере увеличения концентрации  $c$  фрагментов загрязнения в моющей жидкости (согласно экспериментальным данным, представленным на рис. 3.4):

$$a = a_0 - k_a c, \quad (3.13)$$

где  $a_0$  – активность кавитации в начальный момент развития процесса очистки, когда в моющей жидкости отсутствуют фрагменты загрязнения;  $k_a$  – коэффициент.

Значение  $c$  увеличивается по мере увеличения толщины удаленного слоя загрязнения ( $h_0 - h$ ). При этом с увеличением  $c$  значение

$a$  снижается, что, в свою очередь, вызывает замедление увеличения толщины удаленного слоя и, соответственно, замедление увеличения  $c$ . Такой характер изменения  $c$  может быть описан с помощью следующего выражения, которое по своему виду подобно уравнению равнозамедленного движения:

$$c = k_c (h_0 - h) - \frac{k_c^* (h_0 - h)^2}{2}, \quad (3.14)$$

где  $k_c$  и  $k_c^*$  – коэффициенты.

Проводя преобразования выражения (3.7) с учетом (3.13) и (3.14), можно получить кинетическое уравнение процесса очистки поверхности от слоя загрязнения с однородной по толщине структурой в условиях изменения активности кавитации, вызванного изменением состояния моющей жидкости. Кривая зависимости  $h(t)$ , построенная согласно этому уравнению, будет иметь нелинейный вид, подобный тому, который имеет место для кривой зависимости  $h(t)$  в варианте 2, однако причины этой нелинейности будут связаны с изменением не кавитационной стойкости слоя загрязнения, а активности кавитации.

Как показывают результаты экспериментов, снижение активности кавитации во время УЗ очистки, обусловленное накоплением фрагментов загрязнений в моющей жидкости, обычно незначительно и становится довольно заметным лишь в том случае, когда концентрация фрагментов оказывается чрезмерно большой. На практике, во избежание этого нежелательного явления, приводящего к замедлению очистки, следует принимать соответствующие меры. Наиболее эффективно проводить очистку в проточной системе. В последнее время для очистки широко используются разнообразные типы УЗ моечных ванн, рабочая емкость которых снабжена сливным отверстием, что позволяет проводить очистку в условиях прокачки моющей жидкости. Если же очистка ведется в замкнутой (непроточной) системе, то желательно для каждой очередной очистки использовать свежеприготовленную моющую жидкость, либо проводить очистку в сравнительно большом объеме моющей жидкости, либо осуществлять, по мере необходимости, периодическую смену моющей жидкости во время очистки.

Следует заметить, что изменение состояния моющей жидкости во время УЗ очистки, способное оказывать влияние на активность



кавитации, может проявляться не только в накоплении в ней мелко-дисперсных фрагментов загрязнений, но и в изменении ее химического состава – в случае удаления растворимых загрязнений. Кроме того, моющая жидкость в процессе УЗ обработки может подвергаться нагреву, который, в свою очередь, также может приводить к изменению активности кавитации [130].

Таким образом, эксперименты показывают, что причинами возможного проявления нелинейного характера удаления загрязнений с поверхности во время УЗ очистки являются неоднородности структуры и, как следствие, неоднородности кавитационной стойкости загрязнения по толщине слоя загрязнения, а также изменения состояния моющей жидкости, вызванные накоплением в ней продуктов разрушения загрязнения, что приводит к изменениям активности кавитации.

### **3.3. Особенности действия кавитации на микроорганизмы и насекомых-вредителей**

Для удаления загрязнений с поверхности плодовоовощных продуктов, так же как и с поверхности деталей сельскохозяйственной техники, используется акустическая кавитация. При этом механизмы кавитационной очистки продуктов от пылевых и почвенных, а также пестицидных загрязнений в значительной мере подобны рассмотренным выше механизмам кавитационной очистки деталей от эксплуатационных и технологических загрязнений. Что же касается механизмов кавитационной очистки продуктов от остатков микроорганизмов и насекомых-вредителей, то они имеют свои отличия, обусловленные особым характером воздействия кавитации на биологические объекты.

Предполагается, что кавитация способна развиваться непосредственно в биологических клетках, при этом роль зародышей кавитации играют газовые пузырьки, всегда имеющиеся в цитоплазме клеток [144].

Кавитационная очистка поверхностей далеко не всегда приводит к полному удалению с них патогенной и другой микрофлоры. Для решения этой задачи довольно часто поверхности обрабатывают ультразвуком в сочетании с растворами веществ, обладающих бактерицидным действием. Однако в некоторых случаях, например, в пищевой промышленности, использование бактерицидных

(или моющих) веществ является недопустимым, поскольку даже следовые количества этих веществ могут изменить органолептические показатели продукта [145].

Для оценки эффективности инактивирующего влияния кавитационной обработки на микроорганизмы используется время  $D$ , необходимое для десятикратного снижения численности микроорганизмов. Разрушение микроорганизмов в результате действия дезинфицирующих факторов обычно происходит в соответствии с реакцией первого порядка, свидетельствующей о логарифмической зависимости скорости их гибели от времени. Это означает, что логарифм количества микроорганизмов, выживших при данных условиях обработки, соотношенный со временем обработки (так называемая «кривая выживания»), дает на графике прямую линию. Соответственно, время  $D$  на графике представляет временной промежуток, в котором кривая выживания проходит один логарифмический цикл:

$$D = \frac{t_2 - t_1}{\log_{10}(N_2) - \log_{10}(N_1)}, \quad (3.15)$$

где  $N_2$  и  $N_1$  соответствуют количеству микроорганизмов, выживших после обработки в течение соответственно  $t_2$  и  $t_1$  мин [146].

Гибельное влияние акустической кавитации на микроорганизмы осуществляется в основном по двум механизмам: кавитационно-механическому и кавитационно-электрохимическому.

Согласно первому механизму причиной гибели клеток являются сильные сдвиговые напряжения в микропотоках жидкости, возникающих при захлопывании пузырьков. Эти напряжения приводят к разрыву химических связей в клеточных стенках и мембранах [144, 147]. Также в процессе кавитации внутри клеток создается высокое давление, что вызывает разрушение цитоплазматических структур [148]. При УЗ обработке наблюдалось обширное поражение клеток *E. coli* K12, в том числе уникальное явление перфорации клетки, которая могла быть вызвана микроструями жидкости, образующимися в результате кавитации [149].

Согласно второму механизму гибель клеток связана с образованием при захлопывании пузырьков в водной среде цитоплазмы гидроксильных радикалов и атомарного кислорода, вызывающих окислительные процессы [144, 148].

Также причиной гибели клеток может быть их чрезмерный нагрев в результате поглощения ультразвука [144].

Степень разрушительного действия ультразвука на клетки зависит от типов микроорганизмов, их биологических свойств. Некоторые грамотрицательные бактерии оказываются более чувствительными к ультразвуку, чем грамположительные, поскольку клеточные стенки последних имеют более плотный слой пептидогликана (важнейшего компонента клеточной стенки) [149]. Вегетативные клетки микроорганизмов более чувствительны, чем споры, кокковые формы погибают медленнее, чем палочковидные, более крупные клетки отмирают быстрее, чем мелкие [144].

Объектом летального воздействия ультразвука на бактерии не обязательно является клеточная мембрана, поскольку гибель клетки может произойти и без ее серьезного повреждения. Например, *L. rhamnosus* погибали под действием ультразвука без существенного нарушения целостности клеток. Спорообразующие микроорганизмы проявляют более высокую стойкость к воздействию ультразвука, чем вегетативные микроорганизмы.

Эффективность УЗ воздействия на микроорганизмы зависит от состояния озвучиваемой среды. Состав среды, поверхностное натяжение и вязкость определяют способность к поглощению и доступность акустической энергии для летального воздействия на микроорганизмы [149].

Важными факторами инактивации микроорганизмов являются мощность, частота и длительность воздействия ультразвука.

Необходимо отметить, что губительное влияние ультразвука на микроорганизмы становится возможным при превышении некоторого порога интенсивности ультразвука, соответствующего возникновению в среде кавитации. При этом разрушающий эффект ультразвука увеличивается пропорционально его интенсивности. Если же этот порог не превышает, то не только не происходит разрушение жизнеспособных микроорганизмов, но, напротив, может наблюдаться стимуляция их роста и, как следствие, увеличение их числа [144].

Время, требуемое для снижения численности популяции микроорганизмов в 10 раз ( $D$ ), тем меньше, чем больше мощность ультразвука [148]. Действие ультразвука малой мощности может оказаться недостаточным для поражения микроорганизмов. Так, эксперименты показывают, что обработка ультразвуком с удельной мощностью 200 Вт/л в течение 2 мин позволяла только лишь удалить клетки *E. coli* с поверхности продуктов, не убивая при этом клетки [149]. Также уста-

новлено, что инактивация *E. coli* в питьевой воде только одним ультразвуком с удельной мощностью 900 Вт/л в течение 2 мин составила  $1,2 \log_{10}$  [150]. Вместе с тем, при более низкой удельной мощности 180 Вт/л инактивация *E. coli* менее  $1 \log_{10}$  была достигнута в течение первых 20 мин обработки, в то время как значительная инактивация (более  $7,5 \log_{10}$ ) была достигнута при длительности обработки от 30 до 60 мин. Таким образом, для того чтобы эффективно инактивировать клетки *E. coli*, находящиеся в жидкости, требуется более высокая удельная мощность ультразвука или более длительное время обработки [151].

Дезинфицирующий эффект УЗ обработки увеличивается с длительностью обработки. Вместе с тем он в наибольшей мере проявляется в начальный период обработки. Так, при изучении УЗ обработки различных видов плодоовощных продуктов (петрушка, салат, капуста, морковь, огурец, земляника, лук, перец) дезинфицирующее влияние ультразвука наблюдалось, прежде всего, в течение первых 5 минут, а затем не давало значительного эффекта даже после 10 мин обработки [152, 153].

Влияние частоты ультразвука на состояние микроорганизмов является неоднозначным. Так, исследования показали, что частота ультразвука (25,4 и 70 кГц) слабо влияла на эффективность обеззараживания [152]. Аналогично не было выявлено различий в степени порчи клубники, обработанной ультразвуком частотой 25 и 28 кГц [154]. Однако при обработке клубники ультразвуком частотой 40 и 59 кГц показатель порчи ягод на восьмые сутки хранения оказался соответственно на 43,7 и 29 % ниже, чем для контрольных образцов [154].

Гибельное влияние кавитации на насекомых-вредителей обусловлено ее разрушающим воздействием непосредственно на их яйца и личинки [155–158]. Это воздействие связано с проявлением механических, термических и химических эффектов кавитации, а его величина зависит от мощности, частоты и длительности воздействия ультразвука [159] (по аналогии с рассмотренным выше воздействием кавитации на микроорганизмы). Экспериментальные исследования УЗ обработки яиц на разных стадиях их развития (на примере яиц гельминтов) показывают, что яйца на начальной стадии менее устойчивы к воздействию ультразвука, чем яйца на личиночной стадии [160].

## 4. ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОКАВИТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ

Эффективность процессов гидрокавитационной очистки определяется конструкцией и техническими параметрами гидродинамических излучателей, которые представляют собой устройства, преобразующие часть энергии турбулентной струи моющей жидкости в энергию акустических колебаний.

### 4.1. Гидродинамические излучатели

Работа гидродинамических излучателей основана на генерировании гидродинамических возмущений в виде поля скоростей и давлений при взаимодействии вытекающей из сопла струи с препятствием или при принудительном периодическом прерывании струи. Эти возмущения оказывают воздействие на основание струи у сопла, что приводит к установлению режима автоколебаний. Гидродинамические излучатели способны излучать акустические колебания в диапазоне частот от 0,3 до 35 кГц с интенсивностью, достигающей 1,5–2,5 Вт/см<sup>2</sup> [124].

Существуют различные по конструкции типы гидродинамических излучателей. Из них наиболее распространены излучатели с пластинчатыми, стержневыми и мембранными резонансными колебательными элементами, а также роторные излучатели [124, 161, 162].

Пластинчатые гидродинамические излучатели состоят из погруженных в жидкость прямоугольного щелевого сопла и заостренной в сторону струи пластины, закрепленной в двух узловых точках либо консольной (рис. 4.1) [124]. Излучение акустической энергии при их работе осуществляется за счет колеблющейся пластинки в направлении, перпендикулярном ее плоскости, с максимумом посередине опор (рис. 4.1, а) либо вблизи свободного конца (рис. 4.1, б).

При натекании на пластину потока жидкости в ней возбуждаются изгибные колебания, собственная частота  $f_{пл}$  которых зависит от длины и толщины пластины, плотности и упругих свойств материала, из которого она изготовлена, а также от способа ее крепления. В натекающей струе возникают автоколебания с частотой  $f_c$ , которая прямо пропорциональна скорости истечения струи и обратно пропорциональна расстоянию между соплом и пластиной. Наиболее интенсивные колебания возбуждаются при условии  $f_c = f_{пл}$ . Настройка пластины в резонанс с колебаниями струи осуществляется путем изменения скорости струи и расстояния между соплом и пластиной.

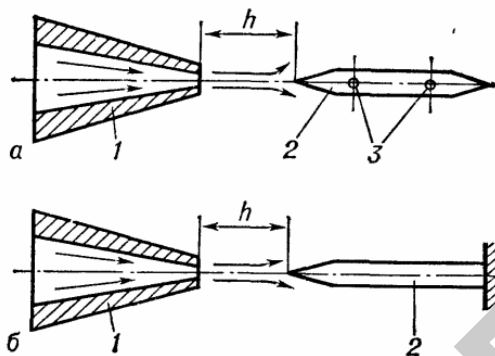


Рис. 4.1. Схемы пластинчатых гидродинамических излучателей с креплением пластины: *а* – в узловых точках; *б* консольно; 1 – сопло; 2 – пластина; 3 – точки крепления (узлы колебаний)

Также существуют пластинчатые гидродинамические излучатели, в конструкции которых используется кольцевое щелевое сопло 1, образованное двумя коническими поверхностями, а колеблющимся препятствием служит полый цилиндр 2, который разрезан вдоль образующих так, что создается система расположенных по окружности консольных пластин (рис. 4.2) [124]. Возникновение излучения за счет пульсации кавитационной области возможно и в том случае, если в дне цилиндрического препятствия имеется отверстие диаметром  $d$ . Кавитационная область тороидальной формы создается между торцами сопла и отражателя (цилиндра) при определенной скорости истечения жидкости.

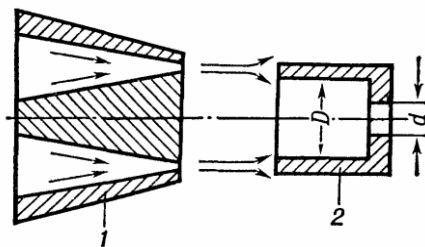


Рис. 4.2. Схема пластинчатого гидродинамического излучателя с кольцевым соплом 1 и консольными пластинами 2, расположенными по окружности

Стержневые гидродинамические излучатели состоят из конусоцилиндрического сопла 1, отражателя (препятствия) 2 и резонансной колебательной системы в виде стержней 3, расположенных вдоль образующих цилиндра с осью сопло-отражатель (рис. 4.3) [124]. Эта система может иметь вид набора скрепленных по краям стержней либо вид пустотелого цилиндра с выполненными вдоль образующих пазами. Поверхности отражателя могут быть выпуклыми, плоскими или вогнутыми (последние в энергетическом отношении наиболее эффективны).

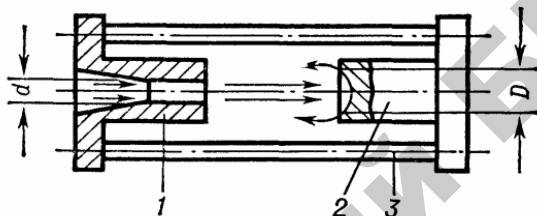


Рис. 4.3. Схема стержневого гидродинамического излучателя:  
1 – сопло; 2 – отражатель; 3 – резонирующие стержни

Для возбуждения интенсивных колебаний требуется определенное соотношение между диаметром лупки  $D$  на торце отражателя и диаметром сопла  $d$ . Излучение возникает в результате пульсации кавитационной области, образующейся между соплом и отражателем. Благодаря этому в стержнях возбуждаются изгибные колебания на их собственной частоте, что отражается на излучении, повышая его интенсивность. Собственная частота стержней  $f_{ст}$  зависит (подобно собственной частоте пластин  $f_{пл}$ ) от конструктивных параметров стержней и способа их крепления – двухстороннего или консольного.

Мембранные гидродинамические излучатели состоят из кругового сопла 1 и мембраны 2, защемленной по контуру (рис. 4.4) [124]. Их действие основано на эффекте Бернулли.

Вытекающая из сопла струя периодически меняет давление в области сопло-мембрана, вызывая колебания мембраны. В результате в жидкость излучаются колебания с частотой, соответствующей собственной частоте изгибных колебаний мембраны.

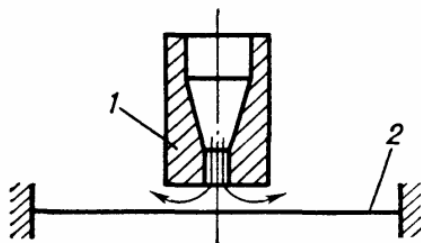


Рис. 4.4. Схема мембранного гидродинамического излучателя:  
1 – сопло; 2 – излучающая мембрана

Роторные гидродинамические излучатели состоят из двух соосно расположенных цилиндров – статора и ротора, снабженных системой прорезей или отверстий на боковых поверхностях [124]. Их работа заключается в периодическом прерывании струи жидкости, которое происходит при вращении ротора в результате чередования прорезей статора и ротора, что приводит к возникновению пульсаций давления в жидкости. Частота излучателей определяется количеством прорезей и скоростью вращения ротора.

Ниже кратко описаны конструктивные особенности некоторых видов гидродинамических излучателей.

На рис. 4.5 показана схема гидродинамического излучателя с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием [161]. Затопленная струя, вытекающая из кругового щелевого сопла в корпусе 1, формирует упругую жидкостную оболочку 2, которая закреплена на выходе из сопла. Благодаря ступенчатому препятствию 3 часть кинетической энергии струи расходуется на формирование первичного торoidalного вихря 4, внутри которого за счет эффекта Бернулли развивается кавитация. В результате этого происходит возбуждение колебаний струйной оболочки на собственной частоте. При растяжении оболочки содержимое вихря 4 выходит наружу, и за счет эффекта Кармана образуется вторичный торoidalный вихрь 5, который генерирует звуковое излучение в результате синфазного захлопывания кавитационных пузырьков.

Особенности конструкции и действия гидродинамических излучателей с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием рассмотрены в работах [163–165].



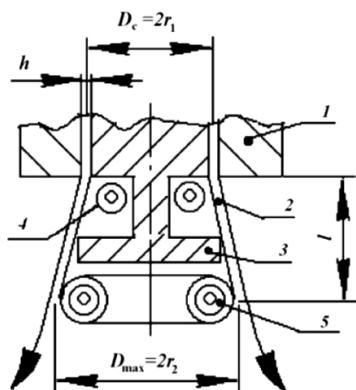


Рис. 4.5. Схема гидродинамического излучателя с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием:

- 1 – корпус; 2 – жидкостная оболочка; 3 – ступенчатое препятствие;  
4 – первичный вихрь; 5 – вторичный вихрь

На рис. 4.6 показана схема форсунки для гидрокавитационной очистки, в которой обеспечивается более полное использование кинетической энергии кавитирующей струи воды путем образования дополнительного контура водной истекающей струи [166].

Форсунка содержит цилиндрический корпус 1, в котором выполнен центральный проточный канал 2, образованный соосно с расположенными и последовательно сопряженными по направлению движения жидкости входным конфузуром 3, расширительной камерой 4 и выходным диффузором 5. На корпусе 1 в зоне расположения выходного диффузора 5 закреплен корпус 6 дополнительного диффузора 7. В корпусе диффузора 5 под углом к продольной оси проточного канала 2 выполнены каналы 8, сообщены с полостью расширительной камеры 4 и выходные отверстия которых ориентированы в сторону выхода диффузора 5 таким образом, что расширительная камера 4 сообщена с полостью диффузора 7. Числом и диаметром этих каналов 8 определяется количество воды, отводимой из расширительной камеры во второй контур, т. е. в диффузор 7. Дополнительно форсунка содержит источник 9 УЗ колебаний, примыкающий к расширительной камере 4 со стороны входного конфузуратора 3. Этот источник выполнен в виде цилиндрической вставки с центральным каналом 10, внутренняя поверхность 11 которого выполнена в виде гребенки, профиль которой является

равносторонним треугольным или квадратным. Во время работы форсунки поток воды высокого давления движется через форсунку, затем через полость конфузора 3, расширительную камеру 4 и полость диффузора 5, образуя на выходе из форсунки рабочий факел. Проходя через две последние полости, поток воды разгоняется до скорости, обеспечивающей развитие кавитации во всем объеме факела струи воды.

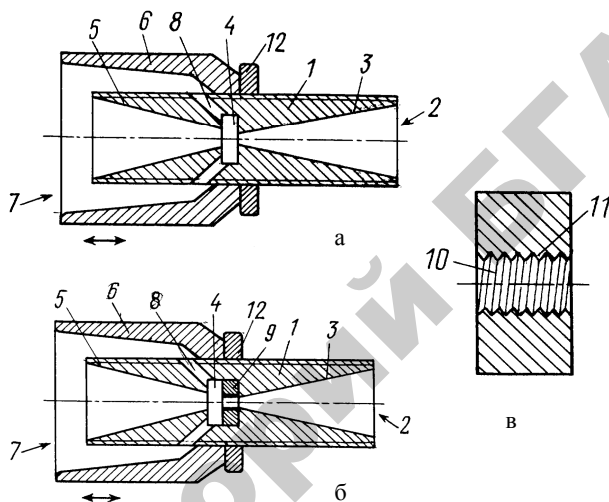


Рис. 4.6. Схема форсунки для гидродинамической очистки с дополнительным контуром истекающей струи:

- 1 – цилиндрический корпус; 2 – центральный проточный канал; 3 – конфузор;  
 4 – расширительная камера; 5 – выходной диффузор;  
 6 – корпус дополнительного диффузора; 7 – дополнительный диффузор;  
 8 – каналы; 9 – источник УЗ колебаний; 10 – вставка;  
 11 – внутренняя поверхность канала вставки; 12 – контргайка

В истекающей струе дольше всего сохраняются оптимальные условия для кавитации вблизи оси самой струи, в то время как по периферии кавитирующий поток тормозится, скорость воды падает, давление растет, и кавитационные пузырьки исчезают. Как следствие, рабочий факел имеет форму сильно вытянутого веретена. Для устранения этого явления в форсунке образован второй контур истекающей струи за счет использования дополнительного

диффузора 7. При этом при помощи каналов 8 осуществляется отбор из расширительной камеры 4 части воды, которую отводят на периферию факела, т. е. в пространство между наружной и внутренней поверхностями диффузоров 5 и 7. Таким образом, рабочий факел образуется за счет как непосредственного истечения воды из выхода конфузора, так и образования второго контура истекающей струи. Это дает возможность более полно использовать кинетическую энергию кавитирующей струи, что ведет к увеличению сечения рабочего факела.

Источник 9 УЗ колебаний обеспечивает более полную кавитацию в протекающей струе воды. При протекании воды через канал 10 в струе воды высокого давления возникают колебания, частота которых определяется скоростью истечения воды и параметрами гребенки. Длина вставки равна диаметру канала 10. Резьбовое крепление корпуса 6 диффузора 7 на корпусе 1 форсунки позволяет регулировать положение диффузора 7. Размеры, форма и место расположения диффузора 7 зависят от необходимой степени очистки, рабочего давления, расхода воды и др. Корпус 6 диффузора 7 фиксируется в заданном положении с помощью контргайки 12.

На рис. 4.7 показана схема устройства для гидрокavitационной очистки, в котором обеспечивается повышение производительности и качества очистки за счет дополнительного образования кавитационных пузырьков и фокусирования звуковых колебаний на очищаемую поверхность, сопровождаемых эффектом кавитации, возникающим в струе жидкости [167].

Устройство содержит корпус 1 с установленным в нем соплом 2. К корпусу 1 присоединен подводящий трубопровод 3, а с противоположной стороны – выходной диффузор 4, внутренняя полость которого состоит из камеры смешения 5 и расширительного диффузора 6 в форме эллипсоида. В корпусе 1 имеется камера всасывания 7, которая сообщена с окружающей средой через отверстия 8. Оси отверстий 8 ориентированы по касательной к наружной поверхности наконечника сопла 2. На наружной поверхности корпуса 1 в районе отверстий 8 расположено запорное резьбовое кольцо 9. Между подводящим трубопроводом 3 и камерой всасывания 7 в корпусе 1 установлен пакет дроссельных шайб 10, а также уплотнительное кольцо 11. Между пакетом дроссельных шайб 10 и камерой всасывания 7 сформированы каналы 12. Внутренняя поверхность сопла 2 состоит из входного конического конфузора 13, который переходит в цилиндрическую поверхность 14.

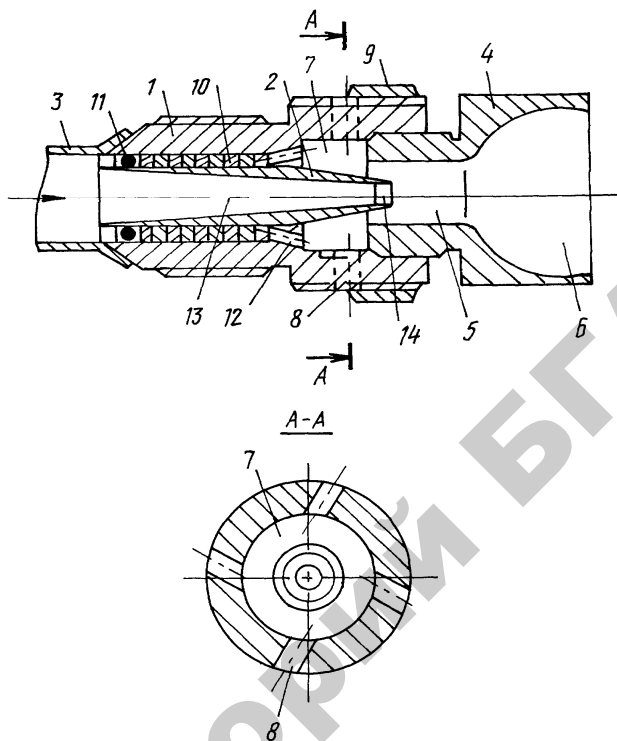


Рис. 4.7. Схема устройства для гидрокавитационной очистки:

- 1 – корпус; 2 – сопло; 3 – подводящий трубопровод; 4 – выходной диффузор;  
 5 – камера смешения; 6 – расширительный диффузор; 7 – камера всасывания;  
 8 – отверстия; 9 – запорное кольцо; 10 – дроссельные шайбы;  
 11 – уплотнительное кольцо; 12 – каналы

Устройство работает следующим образом. Забортная вода под давлением поступает во внутреннюю поверхность сопла 2, на выходе из которого ее скорость достигает до 200 м/с. При такой скорости давление на срезе сопла 2 падает до величины, соответствующей образованию кавитационных пузырьков. Поток пузырьков, попадая в камеру смешения 5, создает в камере всасывания 7 разрежение (эффект эжекции). Это разрежение всасывает забортную воду через отверстия 8. Зауженные сечения отверстий 8 и кольцевого прохода в камеру 5, а также созданные вихревые зоны за счет наклона осей отверстий 8 способствуют усиленному развитию кавитации в камере

смешения 5. Поток, выходящий из сопла 2, увлекает за собой дополнительно созданные кавитационные пузырьки из камеры 7. Далее пузырьки поступают в расширительный диффузор 6, из которого «факел» пузырьков длиной до 40 см направляется на очищаемую поверхность.

Во избежание попадания фрагментов разрушенного загрязнения через отверстия 8 в камеру 7, что приводит к ухудшению работы устройства, отверстия 8 закрываются запорным кольцом 9, а уплотнительное кольцо 11 снимается. При этом камера 7 будет заполняться водой через пакет дроссельных шайб 10 и каналы 12.

Для повышения эффективности очистки полых длинномерных изделий предложена конструкция кавитационной форсунки, показанная на рис. 4.8 [168].

Форсунка содержит корпус 1 и последовательно расположенные блок завихрителя 2 струи, первичный контур сжатия 3, контур Лавала 4, создающий кавитацию, и вторичный контур сжатия 5 с выходным соплом 6. Блок завихрителя струи имеет отверстия 7, а контур Лавала размещен между первичным и вторичным контурами сжатия. При этом оптимизируются соединительные проходные сечения отверстий между элементами форсунки, возбуждающие кавитацию струи моющей жидкости (диаметр контура вторичного сжатия 5, диаметр входа в контур Лавала 4 и диаметр контура первичного сжатия блока завихрителя 2 струи).

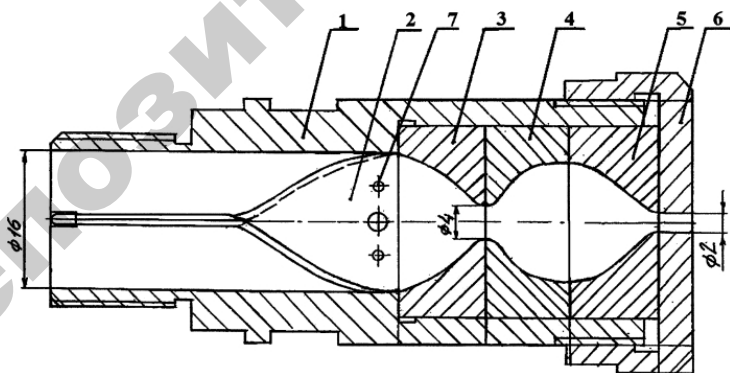


Рис. 4.8. Схема кавитационной форсунки:

1 – корпус; 2 – завихритель струи; 3 – первичный контур сжатия; 4 – контур Лавала; 5 – вторичный контур сжатия; 6 – выходное сопло; 7 – отверстия

Во время работы форсунки моющая жидкость, например техническая вода, подается на вход форсунки и поступает в блок завихрителя 2, имеющий входной диаметр 16 мм, при давлении на входе 8 кг/см<sup>2</sup>. В блоке завихрителя 2 благодаря отверстиям 7 на его краях струя приходит во вращение и приобретает первичную пульсацию. В первичном контуре сжатия 3 происходит первичное повышение давления. На контуре Лавалья 4, где возбуждается кавитация, диаметр проходного сечения уменьшается с 16 мм до 4 мм, что дополнительно повышает давление. Завершающее повышение давления происходит во вторичном контуре сжатия 5 с выходным его диаметром в сопле 6, равным 2 мм. Таким образом, наблюдаемое повышение эффективности очистки обусловлено повышением давления на основных элементах форсунки за счет выполнения определенного (квадратичного) соотношения размеров диаметров соединительных отверстий между контурами форсунки, формирующими выходное давление.

Иной вариант конструкции кавитационной форсунки, обеспечивающей повышение эффективности очистки полых длиномерных изделий, показан на рис. 4.9 [169]. Очистка осуществляется с использованием ряда форсунок, установленных на специальной штанге.

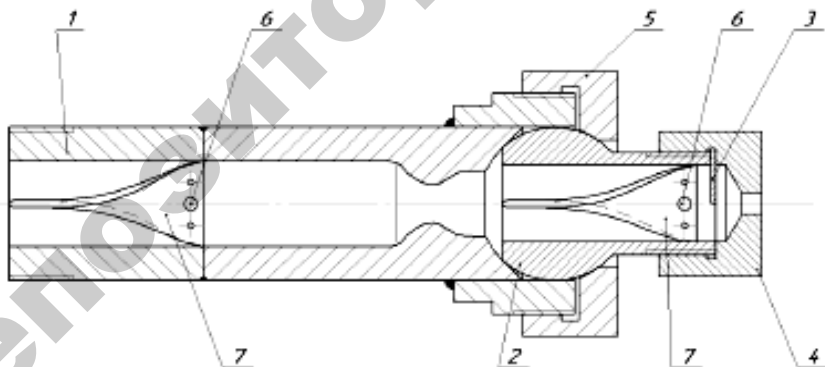


Рис. 4.9. Схема кавитационной форсунки:

- 1 – входной блок; 2 – сопло с шаровым закреплением; 3 – пластина-кавитатор;  
4 – гайка крепления пластины-кавитатора; 5 – гайка фиксации шарового шарнира;  
6 – отверстия завихрителя; 7 – завихритель

В процессе очистки жидкость под давлением подается в штангу со встроенными в нее форсунками, закручивается в завихрителях и ускоряется, достигая максимума скорости и пульсации давления. Интенсивная кавитация обеспечивается за счет турбулизации струи жидкости, закручиваемой на входе, и прерывистости струи, создаваемой упругим элементом в режиме его колебаний. Для повышения интенсивности промывки на завихрителях на входе потока выполнен радиусный участок, а на сходе потока торцы завихрителей выполнены плоскими с острыми кромками и содержат отверстия, выполняющие роль дополнительных резонаторов, которые преобразуют энергию струи в энергию акустических колебаний.

На рис. 4.10 показана схема роторного гидродинамического излучателя [170]. Он содержит корпус 1 с кольцевой рабочей камерой 2, статор 3 и ротор 4 с отверстиями 5 на рабочих поверхностях, торцовое уплотнение 6, канал 7 в статоре, полость 8 между торцовым уплотнением 6 и торцевой поверхностью ротора 4 и гидродинамическое уплотнение 9.

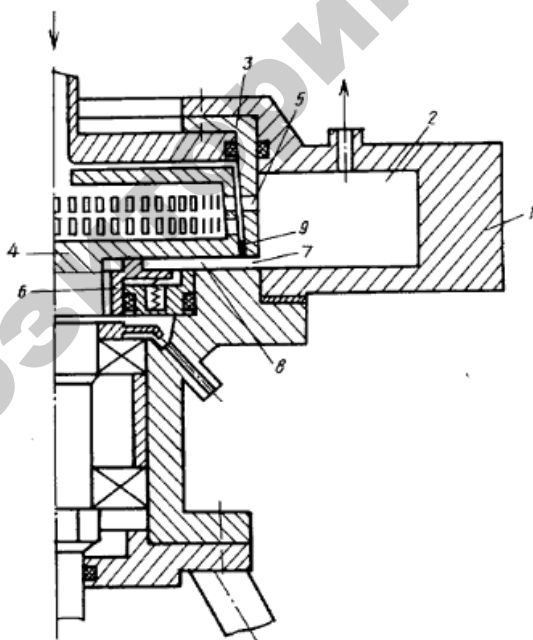


Рис. 4.10. Схема роторного гидродинамического излучателя

Излучатель работает следующим образом. В полость ротора 4 подается под давлением жидкость, которая перетекает в рабочую камеру 2 при совпадении отверстий 5 статора 3 и ротора 4. При перекрытии отверстий 5 в зазоре между цилиндрическими поверхностями статора 3 и ротора 4 создается повышенное давление, которое ограничивается гидродинамическим уплотнением 9 от полости 8, соединенной с рабочей камерой 2 низкого давления каналом 7 в статоре 3. Во время работы устройства уплотнение 9 находится в области пониженного давления, что позволяет увеличить ресурс работы устройства.

На рис. 4.11 показана схема кавитационной моющей установки, работающей в низкочастотном диапазоне (100–200 Гц) [171]. В ней при подборе амплитуды возмущающего воздействия, наряду с кавитацией, создаются мощные направленные струи.

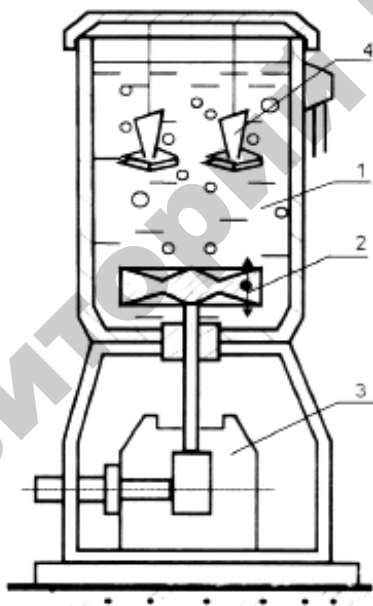


Рис. 4.11. Схема кавитационной моющей установки

Очищаемые детали 4 размещают в рабочей зоне ванны 1, включают привод 3, который сообщает активатору линейные перемещения на частоте эффективного резонанса. Настройку на резонанс проводят путем плавного изменения частоты вращения привода,



связанного с частотным мультипликатором, обеспечивающим получение мощного кавитационного факела в рабочей зоне ванны. В установке освоена промывка ответственных деталей газотурбинных авиадвигателей: подшипников роторов, топливной, гидравлической аппаратуры и др.

На рис. 4.12 и 4.13 показана схема установки с возбуждением кавитации в струях моющей жидкости, которая использовалась для очистки подшипников [171]. Устройство на рис. 4.12 содержит две струйно-кавитационные головки 1 и 2, расположенные встречно на лотке в рабочей позиции промываемых подшипников 3. Каждая головка содержит по четыре сопла 4, в них установлены завихрители-кавитаторы 5 потока жидкости, в которых зарождается гидродинамическая кавитация. На входе форсунки имеется сопло Ловаля, а на выходе – конусные участки.

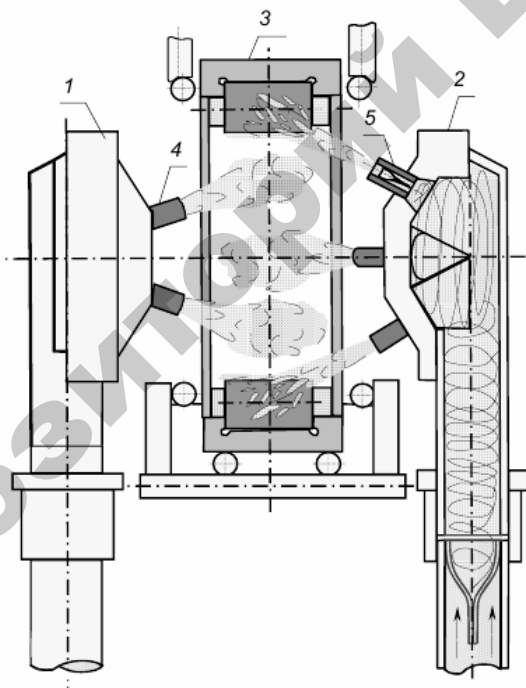


Рис. 4.12. Струйно-кавитационное устройство:  
1, 2 – струйно-кавитационные головки; 3 – промываемый подшипник;  
4 – сопла; 5 – кавитатор

При работе двух струйных блоков в подшипнике качения под действием струй жидкости ролики подшипника получают дополнительное вращение, что способствует промывке (рис. 4.13). Струйно-кавитационное устройство встраивается в моечную машину МСП-01 без внесения конструктивных изменений и без перенастройки ее основной (нештатной) схемы.

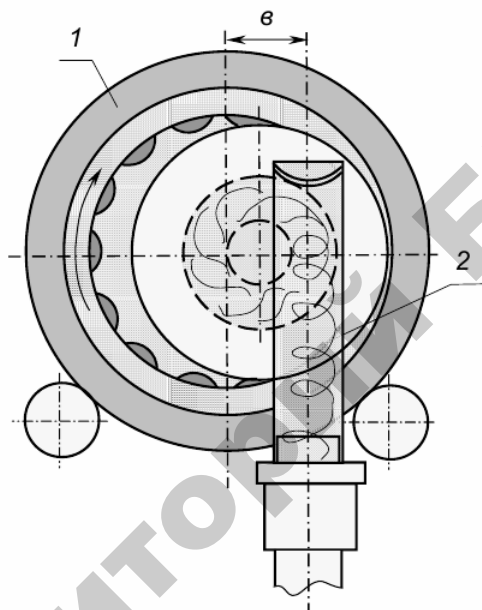


Рис. 4.13. Способ вращения промывочного подшипника:  
1 – подшипник; 2 – кавитатор;  $e$  – эксцентриситет подачи струй

Для повышения эффективности гидрокавитационной очистки поверхностей деталей от трудноудаляемых загрязнений предложено устройство, показанное на рис. 4.14 [172]. Устройство работает следующим образом. Очищаемые детали помещают в ванну с моющей жидкостью (водой) и приводят их во вращение вокруг оси со скоростью 1–10 об/с. Формируют высоконапорные кавитирующие струи и воздействуют ими на загрязнения, которые после разрушения удаляют потоком жидкости. Перепад давления в струях обеспечивают не менее 1 МПа, а скорость струй не менее 45 м/с. Направленность струй под разными углами способствует более

эффективной очистке поверхностей деталей со сложной конфигурацией. Загрязненная вода вместе с разрушенным загрязнением удаляется из ванны в отстойник, где отстаивается, фильтруется и снова поступает в накопитель.

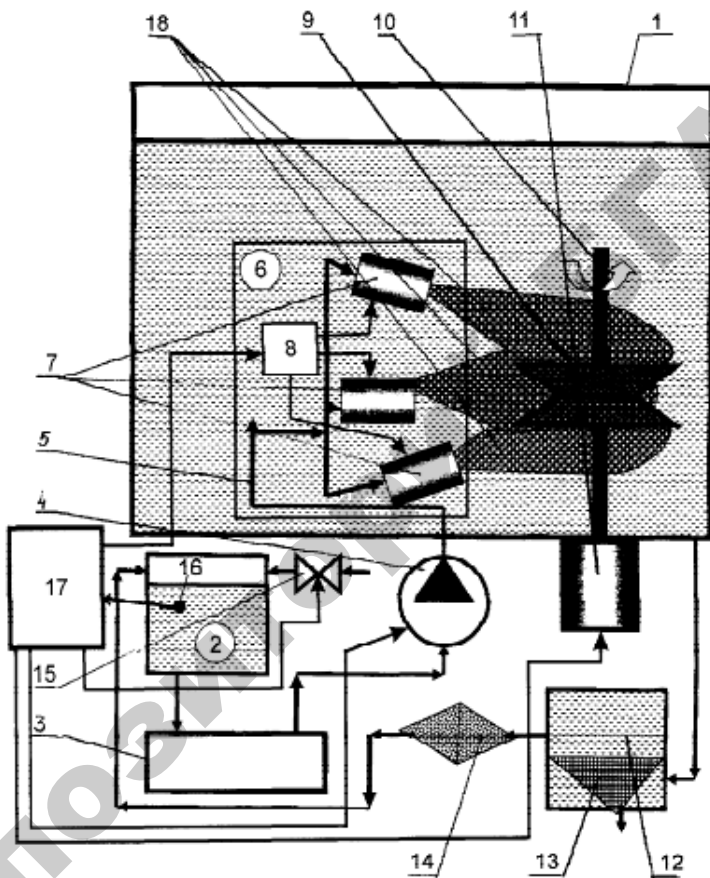


Рис. 4.14. Схема устройства для гидрокавитационной очистки:

- 1 – ванна; 2 – накопительная емкость; 3 – термостат; 4 – высоконапорный насос;
- 5 – трубопроводная магистраль; 6 – блок возбуждения кавитации; 7 – кавитаторы;
- 8 – механизм настройки кавитаторов; 9 – очищаемая деталь; 10 – ось двигателя;
- 11 – двигатель; 12 – отстойник грязной воды; 13 – фильтр грубой очистки;
- 14 – фильтр тонкой очистки; 15 – вентиль подачи очищаемой среды;
- 16 – датчик температуры; 17 – блок управления; 18 – кавитационные области

## 4.2. Моющие жидкости для гидрокавитационной очистки

Для гидрокавитационной очистки в качестве моющей жидкости можно применять обычную техническую воду, без добавления каких-либо химреактивов, а также без подогрева, что обусловлено высокими очищающими эффектами струйной кавитации [169, 171, 173, 174]. Вместе с тем находят применение и водные растворы различных моющих средств. Так, для очистки различных деталей от масляных загрязнений используется раствор NaOH [175]. Для очистки деталей двигателей внутреннего сгорания от углеродистых загрязнений было предложено использовать синтетическое моющее средство Лабомид 101 (30 г/л), которое по своим моющим свойствам значительно превосходит растворы едкого натра и различных щелочных смесей [176]. При этом технологический процесс очистки включал следующие операции: замочку в растворяюще-эмульгирующем средстве АМ-15, очистку в предложенном моющем растворе с помощью гидродинамического излучателя, ополаскивание в чистой горячей воде, пассивацию в 0,3 %-ном растворе триэтаноламина и сушку деталей при 60...80 °С. Температура моющего раствора составляла 50–55 °С.

Для усиления моющего действия жидкостей используются различные способы их модифицирования, такие как: подача в жидкость пара, ввод в жидкость специальных модифицирующих веществ, нагрев жидкости.

### Подача в жидкость пара

Обычно в кольцевой высокоскоростной струе, вытекающей из сопла, кавитация возбуждается естественным образом при взаимодействии струи с окружающей неподвижной жидкостью. Для ее дополнительного возбуждения на пути струи устанавливается центральное тело (стержень), за которым образуется область разряжения, так что при достаточно высокой скорости струя дополнительно насыщается кавитационными пузырьками. Для того чтобы повысить эффективность развития кавитации предложен способ [177], согласно которому форму центрального тела и сопла профилируют таким образом, что за торцом центрального тела возникает область повышенного давления (каверна), в которую подается пар от внешнего источника, инициирующий кавитацию в струе (без подачи пара кавитация отсутствует). Преимущество данного способа состоит в том, что для возбуждения кавитации используется не механическая энергия струи, а тепловая энергия горячего пара, в результате чего струя насыщается кавитацион-

ными пузырьками при меньшей скорости истечения, чем при естественном возникновении кавитации. Тем самым становится возможным независимо от напора вытекающей струи управлять количеством кавитационных пузырьков в ней, что позволяет снизить напор, необходимый для создания кавитирующей струи. В традиционных способах гидродинамического излучения имеют место неконтролируемость процесса возбуждения естественной кавитации и зависимость ее от таких факторов, как качество жидкости, уровень турбулентности течения, шероховатость стенок сопла и т. п., что сдерживает широкое использование этих способов.

Схема реализации предложенного способа показана на рис. 4.15. Из-за разницы давления между паровой камерой  $P_k$  и внешним пространством  $P_a$  возникают условия роста паровых пузырьков, уносимых из камеры высокоскоростной струей. За счет инерционного роста пузырьков, а также за счет теплоотвода в холодную жидкость пар в пузырьках конденсируется и в момент достижения ими максимального размера давление в них оказывается значительно меньше давления  $P_a$ . В итоге пузырьки превращаются в обычные, кавитационные, заполненные холодным паром с низким давлением.

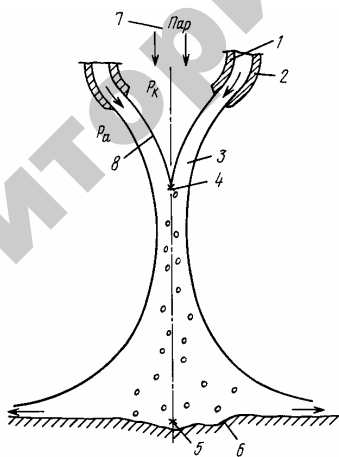


Рис. 4.15. Схема инициации кавитации в струе жидкости подачей пара:  
 1 – центральное тело; 2 – корпус или внешний контур сопла; 3 – истекающая из сопла кольцевая струя жидкости; 4 – хвостовая точка каверны; 5 – точка торможения на обрабатываемой твердой поверхности; 6 – обрабатываемая поверхность;  
 7 – магистраль подачи пара к торцу центрального тела;  
 8 – область повышенного давления

### Ввод в жидкость модифицирующих веществ

В качестве модификаторов могут использоваться различные вещества, способные изменять свойства моющей жидкости и тем самым создавать благоприятные условия для развития кавитации в струе, вытекающей из сопла.

В качестве модификаторов используются хорошо растворимые в жидкости вещества (в частности, некоторые высокомолекулярные полимеры), твердые частицы, а также химически активные газы, реагирующие с жидкостью [178–180].

Для обеспечения подачи модификаторов в моющую жидкость предложен ряд конструктивных вариантов гидродинамических излучателей [178–180].

На рис. 4.16 показано в качестве примера устройство для гидрокавитационной очистки, конструкция которого позволяет добавлять в моющую жидкость модификаторы через специально выполненные каналы в сопле-кавитаторе [178].

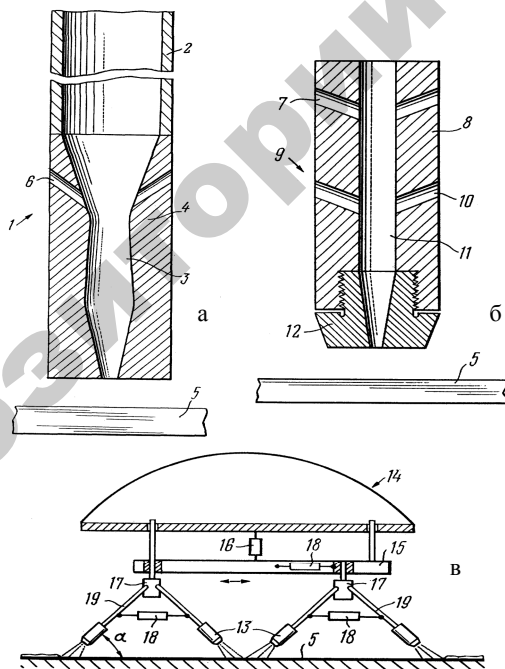


Рис. 4.16. Схема устройства для гидрокавитационной очистки

Устройство содержит сопло-кавитатор 1 с подводющим патрубком 2, сообщенным с центральным проточным каналом 3 насадки 4, с помощью которого образуется кавитирующая струя нагнетаемой под давлением через подводящий патрубок 2 жидкости, направленная на обрабатываемую поверхность 5. В сопле-кавитаторе 1, как показано на рис. 4.16, а, в теле насадки 4 сформирована группа каналов 6 для подачи в жидкость модификатора. Каналы 6 сообщены с центральным проточным каналом 3 и равномерно расположены по поперечному сечению насадки 4.

Аналогичные каналы 7 (рис. 4.16, б) могут быть выполнены в корпусе 8 сопла-кавитатора 9, в котором, кроме того, могут быть выполнены дополнительные каналы 10, расположенные на расстоянии от каналов 7 по направлению к выходу сопла-кавитатора 9. Эти дополнительные каналы сообщены с центральным проточным каналом 11 и выполнены ближе к входу насадки 12 для обеспечения одинаковых свойств пристеночного слоя жидкости.

На рис. 4.16, в представлен вариант устройства с несколькими соплами-кавитаторами 13, угол  $\alpha$  наклона которых к обрабатываемой поверхности 5 может меняться. Для этого в устройстве предусмотрена несущая рама 14, на которой размещена подвижная рама 15, установленная с возможностью возвратно-поступательного перемещения в продольном направлении и позволяющая изменять во время работы устройства расстояние от среза сопел-кавитаторов 13 до обрабатываемой поверхности 5 посредством узла 16. С подвижной рамой 15 соединены узлы 17, установленные с возможностью вращения вокруг своей и поворота относительно оси подвижной рамы 15 и связанные с узлами 18 поворота и наклона патрубков 19 к обрабатываемой поверхности 5 и взаимного расстояния между ними, при этом патрубки 19 сообщены с соплами-кавитаторами 13.

Во время работы устройства жидкость под давлением подается в сопла-кавитаторы, на входе которых проводится модифицирование жидкости для улучшения условий возникновения кавитации. Благодаря наличию дополнительной группы каналов обеспечивается возможность поддерживать необходимую концентрацию добавляемых веществ по всей длине сопел-кавитаторов при высоких скоростях потока.

Путем заданного изменения расстояния сопел-кавитаторов от обрабатываемой поверхности и угла их наклона к поверхности осуществляется управление режимами работы кавитирующей струи и, следовательно, эффективностью очистки поверхности с учетом свойств удаляемых с нее загрязнений.

Модификаторы могут оказывать различное влияние на свойства моющей жидкости [179, 180]. Так, взвешенные частицы глины влияют на уровень турбулентных пульсаций, при условии, что они создают в потоке значительный градиент плотности, в частности, в пристеночной области потока. Поэтому для получения заметного эффекта в снижении потерь и повышении производительности требуется подача большого количества взвеси при условии обеспечения роста ее концентрации вдоль сопла. Вместе с тем хорошо растворимые в воде высокомолекулярные линейные полимеры (полиоксиэтилен, полиакриламид и т. п.) влияют на структуру потока при гораздо меньших концентрациях. Например, полиоксиэтилен уже при концентрации полимера  $10^{-5}$  кг/кг способен препятствовать развитию микроскопических зародышей турбулентных вихрей и тем самым поддерживать ламинарное движение частиц воды при высоких числах Рейнольдса. В результате гасятся турбулентные пульсации скорости в потоке воды, и гидродинамическое сопротивление снижается на 15–30 %.

Выходящая из сопла модифицированная струя является более устойчивой от размывания жидкостью, находящейся в основном объеме. Благодаря этому появляется свобода в выборе расстояния и угла наклона сопла к обрабатываемой поверхности с целью увеличения производительности. Моющая жидкость (вода) с добавкой высокомолекулярного линейного полимера приобретает способность более быстро проникать в новые, возникающие в процессе очистки микропоры, тем самым облегчая и ускоряя отделение загрязнений от очищаемой поверхности.

Особое модифицирующее влияние на моющую жидкость оказывают химически активные газы. Конструкция сопла-кавитатора, обеспечивающая подачу газов в жидкость, показана на рис. 4.17 [180]. Жидкость (воду) нагнетают под давлением в направлении к обрабатываемой поверхности 1 через сопло-кавитатор 2. Газы подают в место 5 активного образования кавитационных пузырьков через каналы 3 и 4, выполненные в корпусе сопла.



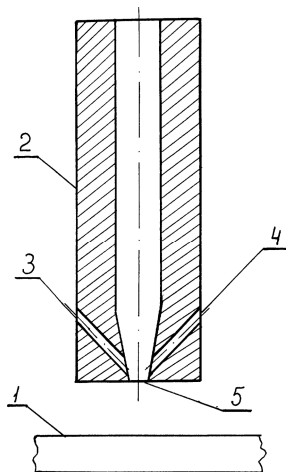


Рис. 4.17. Схема сопла-кавитатора:  
 1 – обрабатываемая поверхность; 2 – корпус сопла;  
 3, 4 – каналы для подачи газа

В качестве газов-модификаторов используются аммиак  $\text{NH}_3$  и хлористый водород  $\text{HCl}$ , а также углекислый газ  $\text{CO}_2$  [181]. Аммиак и хлористый водород реагируют между собой:  $\text{NH}_3$  (газ) +  $\text{HCl}$  (газ) =  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (твердая фаза). Скорость реакции зависит от присутствия других веществ, в частности, от содержания  $\text{CO}_2$ , замедляющего реакцию. Тем самым становится возможным подбирать такие условия, при которых реакция практически не идет, пока на пузырек действуют растягивающие усилия, и начинается при сжатии пузырька, когда он находится вблизи очищаемой поверхности. Твердофазный продукт реакции  $\text{NH}_4\text{Cl}$  не оказывает сдерживания схлопыванию, а переход газ–твердое тело вызывает ускоренный рост давления, т. е. усиление гидравлического удара, производящего очищающий эффект. Регулировка содержания  $\text{CO}_2$  позволяет управлять скоростью реакции. Кроме того,  $\text{CO}_2$  может реагировать с  $\text{NH}_3$ , что позволяет уменьшить содержание  $\text{HCl}$ . Таким образом, благодаря модифицированию жидкости газами создаются условия, при которых кавитационные пузырьки могут образовываться при менее жестких условиях по давлению или скорости потока.

### **Нагрев жидкости**

Для улучшения условий развития кавитации в струе жидкости, вытекающей из сопла-кавитатора, жидкость перед входом в канал сопла нагревают с помощью контактного теплообменника [182]. Нагрев жидкости способствует снижению ее кинематической вязкости. Также с ростом температуры жидкости уменьшается доля энергии, необходимой для образования кавитационных пузырьков, и облегчаются условия для их дальнейшего роста. Кроме того, рост температуры уменьшает растворимость газов в жидкости, что приводит к увеличению интенсивности кавитационной струи. Это объясняется тем, что выделяющиеся из-за пониженной растворимости пузырьки газа являются дополнительными ядрами кавитации, при этом больший эффект от схлопывания парогазовых пузырьков получается в жидкости, свободной от растворенных газов. Соответственно, наилучший результат в повышении степени кавитации может быть достигнут при доведении жидкости до состояния кипения.

## 5. ТЕХНОЛОГИИ АКУСТИКО-КАВИТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ

Акустико-кавитационная очистка осуществляется с помощью УЗ моечно-очистного оборудования, основными узлами которого являются УЗ генератор, предназначенный для преобразования тока промышленной частоты в ток УЗ частоты, и УЗ колебательная система, обеспечивающая преобразование энергии электрических колебаний, поступающих от генератора, в энергию механических колебаний, усиление сформированных механических колебаний и их ввод в моющую жидкость [10, 124, 183, 184]. Непосредственно очистка проводится в рабочей емкости, заполняемой моющей жидкостью. Различают два типа УЗ моечно-очистного оборудования: УЗ ванны и погружные УЗ излучатели. Погружной УЗ излучатель, в отличие от УЗ ванны, не содержит в штатном комплекте специальной рабочей емкости, в процессе работы его погружают в любую подходящую емкость с моющей жидкостью. Различают модульные погружные излучатели и излучатели с погружными волноводами-концентраторами.

### 5.1. Ультразвуковые колебательные системы

Основной частью УЗ колебательной системы (УЗ излучателя) является электроакустический преобразователь. Он преобразует заданные колебания электрического напряжения или тока в механические колебания твердого тела, излучающего акустические волны в окружающую среду. На практике наибольшее распространение получили преобразователи магнитострикционного и пьезоэлектрического типов [124, 183]. Как правило, УЗ преобразователи являются линейными: они воспроизводят по форме возбуждающий электрический сигнал. Большинство из них работает на какой-либо одной частоте, поэтому в их конструкции обычно используются резонансные колебания механической системы, что позволяет значительно повысить их эффективность.

В магнитострикционных преобразователях происходит преобразование энергии магнитного поля в механические колебания УЗ частоты

(рис. 5.1) [183]. Основу их конструкции составляет сердечник из магнитострикционного материала (никеля, специальных сплавов или ферритов). Они способны обеспечивать большие мощности излучения УЗ колебаний, однако требуют для своей работы принудительного водяного охлаждения из-за низкой рабочей температуры магнитострикционных материалов, что ограничивает их использование в многофункциональных малогабаритных УЗ аппаратах.

В пьезоэлектрических преобразователях происходит преобразование энергии электрического поля в механические колебания УЗ частоты (рис. 5.2) [183]. Обычно они состоят из пакета пьезокерамических пластин, совершающих резонансные колебания по толщине. Пьезокерамические материалы (цирконат – титанат свинца и др.) имеют высокую рабочую температуру (более 200 °С), поэтому преобразователи на их основе используются без принудительного охлаждения. Современная пьезокерамика, создаваемая специально для использования в технологических УЗ установках, по своим мощностным характеристикам не уступает магнитострикционным материалам, а по КПД значительно превосходит их.

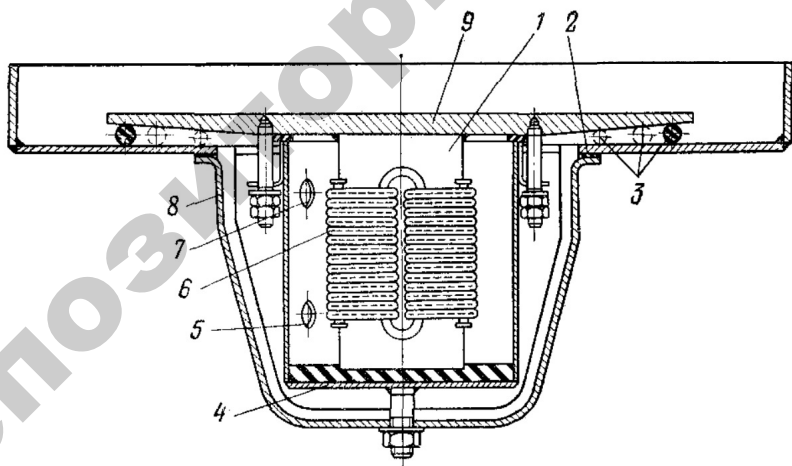


Рис. 5.1. Плоский магнитострикционный излучатель:

- 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

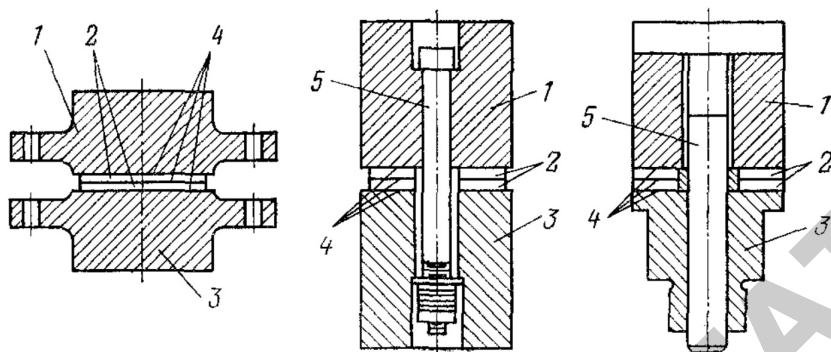


Рис. 5.2. Составные пакетные пьезокерамические преобразователи:  
 1 – излучающая накладка; 2 – пьезокерамические пластины;  
 3 – отражающая накладка; 4 – электроды; 5 – крепежный болт

Интенсивность излучения ограничивается прочностью и нелинейными свойствами материала излучателей и может достигать нескольких Вт/см<sup>2</sup> у пьезоэлектрических излучателей и нескольких десятков Вт/см<sup>2</sup> у магнитострикционных излучателей.

Для увеличения интенсивности колебаний магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей применяют волноводы-концентраторы. Они обеспечивают передачу сформированных колебаний от преобразователей в мощную жидкость. Концентраторы, используемые в низкочастотном УЗ диапазоне, представляют собой стержни переменного сечения, позволяющие получать амплитуды смещения до 50–80 мкм [124].

Концентраторы в зависимости от их формы (рис. 5.3) [183], а также отношения размеров их входного и выходного сечений могут обеспечивать различные значения коэффициента усиления, под которым понимают отношение амплитудного значения колебаний на выходе к ее значению на входе.

Во время работы УЗ моечно-очистного оборудования важно выбрать оптимальные значения частоты и интенсивности ультразвука [185]. С повышением частоты кавитационные пузырьки не успевают захлопываться, что приводит к снижению микроударного действия кавитации. Кроме того, с повышением частоты усиливается поглощение акустической энергии.

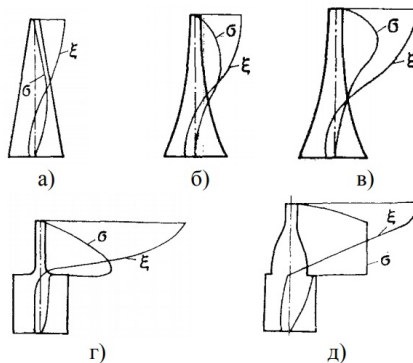


Рис. 5.3. Форма распределения колебаний  $\zeta$  и механических напряжений  $\sigma$  УЗ концентраторов:

типы концентраторов: *a* – конусный; *б* – экспоненциальный;  
*в* – катеноидальный; *г* – ступенчатый; *д* – ампульно-ступенчатый

Чрезмерное понижение частоты ведет к возрастанию шума, а также к увеличению резонансных размеров излучателя. Поэтому большинство УЗ моечно-очистных установок работает в диапазоне частот 18–44 кГц. Повышение интенсивности УЗ сверх определенного предела вызывает увеличение амплитудного давления, в результате чего кавитационные пузырьки вырождаются в пульсирующие. При слишком малых интенсивностях оказывается слабо выраженной кавитация. Поэтому интервал интенсивностей при УЗ моечно-очистной обработке обычно составляет 0,5–10 Вт/см<sup>2</sup>.

## 5.2. Ультразвуковое моечно-очистное оборудование

### Ультразвуковые ванны

УЗ ванна – это моечно-очистная установка, содержащая встроенную в ее корпус рабочую емкость (обычно из нержавеющей стали), на дне или стенках которой размещены УЗ излучатели (магнестрикционные или пьезоэлектрические преобразователи) [185, 186]. На преобразователи подается электрическое напряжение с УЗ генератора. В зависимости от назначения объем емкости ванн может составлять от 0,2 л до сотен л, а мощность ультразвука – от 50 Вт до десятков кВт.

На рис. 5.4 представлена конструкция УЗ ванны с магнито-стрикционным преобразователем [186]. Принцип ее действия состоит в следующем. Обрабатываемая деталь (1) погружается (подвешивается) в рабочую емкость (4), заполненную моющей жидкостью (2). Излучателем УЗ колебаний является диафрагма (5), соединенная с преобразователем (6) с помощью клеявого состава (8). Ванна размещена на подставке (7). УЗ волны (3) распространяются в жидкости в зоне обработки.

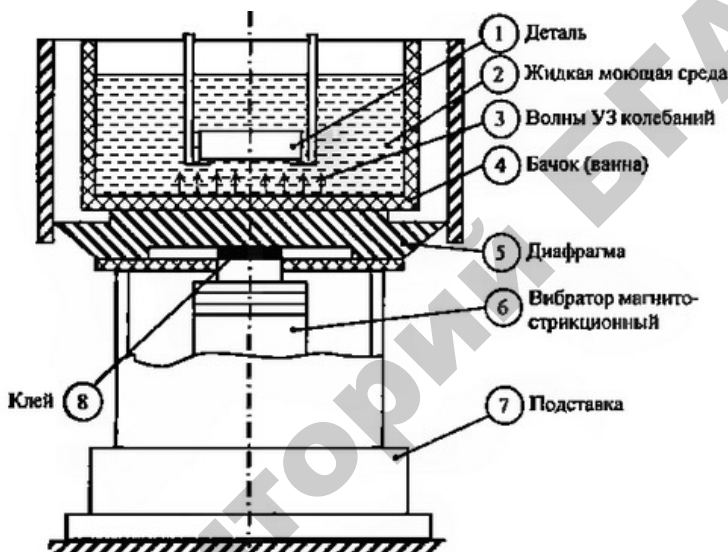


Рис. 5.4. УЗ ванна МКС22

Моющая способность УЗ ванн определяется удельной акустической мощностью, приходящейся на единицу объема моющего раствора. Эффективная очистка обеспечивается при акустической мощности не менее 25–30 Вт на 1 л моющего раствора [187].

Современные УЗ ванны выпускаются в различных конструктивных вариантах и рассчитаны на разные объемы моющей жидкости. Как правило, они оснащаются микропроцессорным управлением, позволяющим устанавливать требуемую длительность очистки и температуру нагрева моющей жидкости, а также светодиодными индикаторами, показывающими состояние источника питания, нагревателя и режим ультразвуковой очистки.

В промышленной практике очищаемые изделия обрабатываются, как правило, не в одной, а в нескольких технологических зонах: в ванне предварительной очистки, ванне тонкой очистки, ванне промывки, камере сушки и т. д. [167]. В автоматизированных поточных линиях очистки мелкие изделия обычно помещают в сетчатые корзины, которые переносятся из ванны в ванну специальными транспортными устройствами.

На рис. 5.4 в качестве примера показан внешний вид УЗ ванны МКС22 (рабочая частота 38 кГц, мощность излучения 330 Вт, объем рабочей емкости 22 л, диапазон рабочих температур 20–80 °С) [168], а на рис. 5.5 – технологическая УЗ моечная линия FinnSonic Optima, состоящая из нескольких УЗ ванн [188].



Рис. 5.5. Линия УЗ ванн FinnSonic Optima-II 960/1000 МВТ HD для отмычки алюминиевых труб для автомобильных кондиционеров



### Модульные погружные излучатели

Погружной УЗ излучатель модульного типа обычно представляет собой автономный блок (модуль), в герметичном корпусе которого, выполненном из нержавеющей стали, монтируется группа (4, 6, 8 и более) пьезоэлектрических преобразователей [187, 191]. Преобразователи крепятся к диафрагме, которая является поверхностью корпуса. Механические колебания преобразователей передаются диафрагме, а от нее – в моющую жидкость. Электроды преобразователей электрически соединяются с помощью кабеля с УЗ генератором. Такие модули могут размещаться в различных рабочих емкостях (ваннах) – на ее дне или стенках, причем в одной емкости может быть размещено несколько однотипных блоков (в зависимости от требуемой интенсивности УЗ поля и формы обрабатываемых деталей). Обычно эти емкости имеют объем более 50 л.

На рис. 5.6 показан набор типичных УЗ преобразователей [192], на рис. 5.7 – модульный погружной УЗ излучатель (задняя крышка удалена), а на рис. 5.8 – модульный погружной УЗ излучатель в корпусе, соединенный с УЗ генератором [193]. На рис. 5.9 показаны возможные схемы размещения модульных погружных УЗ излучателей в ванне (на дне и на стенках) [191].



Рис. 5.6. УЗ преобразователи



Рис. 5.7. Модульный погружной УЗ излучатель

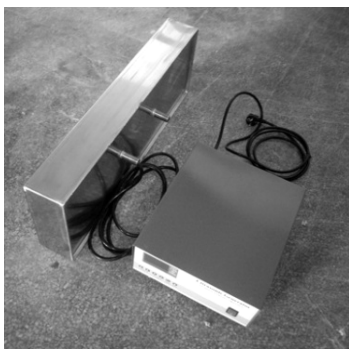


Рис. 5.8. Модульный погружной УЗ излучатель в корпусе и УЗ генератор

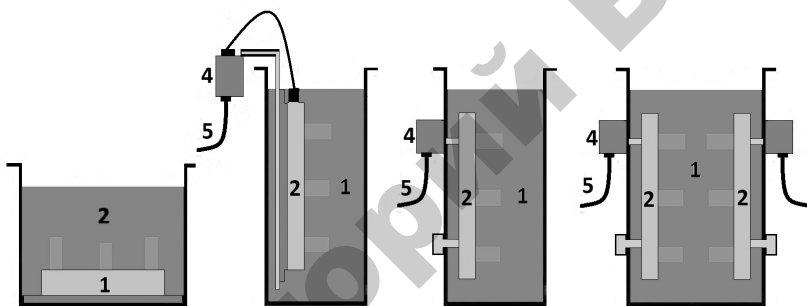


Рис. 5.9. Схемы размещения модульных погружных УЗ излучателей в ванне:

1 – излучатель; 2 – моющая жидкость;  
3–5 – кабели; 4 – клеммная коробка

При размещении излучателя на дне ванны следует учитывать высоту слоя моющей жидкости над диафрагмой излучателя [191]. Если высота этого слоя кратна половине длины УЗ волн, передаваемых в жидкость диафрагмой, то за счет отражения волн от границы вода–воздух в жидкости создается зона стоячих волн (рис. 5.10) [191]. Размещение излучателей на стенках ванны целесообразно при условии, когда ее глубина более чем в два раза меньше ее ширины или длины, поскольку в этом случае излучатели могут размещаться как на одной стенке ванны, так и на ее противоположных стенках.

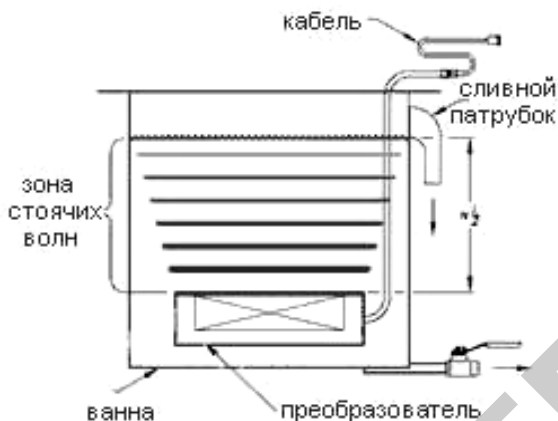


Рис. 5.10. Стоячие волны в УЗ ванне

Также следует учитывать частоту УЗ колебаний, вводимых в жидкость [191]. С увеличением частоты количество кавитационных пузырьков в жидкости увеличивается, а энергия кавитации уменьшается. При этом для каждой частоты УЗ колебаний произведение энергии, выделяемой кавитационным пузырьком при его захлопывании, на количество этих пузырьков в жидкости является постоянной величиной, приблизительно равной энергии, передаваемой в жидкость излучателем. Практически важно, чтобы количество кавитационных пузырьков было бы как можно больше, но при этом энергия кавитации должна быть достаточной для удаления загрязнений. Таким образом, для очистки деталей от загрязнений, не прочно связанных с поверхностью (жиры, масла), следует применять излучатели с более высокой частотой (35–40 кГц), а для очистки деталей от загрязнений, прочно связанных с поверхностью (полировальные пасты, лаковые и полимерные пленки), следует применять излучатели с более низкой частотой (20–25 кГц).

Предпочтительно иметь такие условия моечно-очистной обработки, когда и количество кавитационных пузырьков, и энергия кавитации довольно велики. Эти условия создаются при расположении излучателей на стенках ванны, как показано на рис. 5.11 [191]. В этом случае используются два излучателя с разными частотами колебаний: 25 и 35 кГц. Излучатель с частотой 35 кГц обес-

печивает создание в объеме моющей жидкости большего количества кавитационных пузырьков, а излучатель с частотой 25 кГц увеличивает энергию кавитации этих пузырьков.

При выборе необходимого количества излучателей, погружаемых в ванну, рекомендуется исходить из того, что наибольшая эффективность очистки достигается при УЗ мощности 10–30 Вт на литр объема воды в ванне [191].

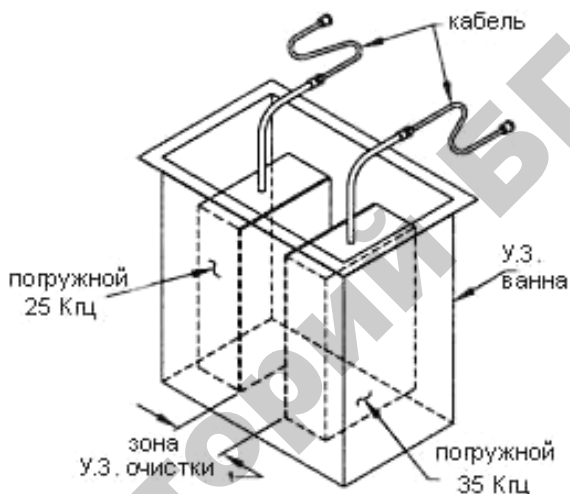


Рис. 5.11. УЗ ванна с преобразователями разной частоты

### Излучатели с погружным волноводом-концентратором

Основными частями конструкции излучателя с погружным волноводом-концентратором являются преобразователь и волновод-концентратор, на конце которого установлен инструмент-излучатель (обычно в форме диска), служащий для повышения технологического эффекта [161–163].

На рис. 5.12 показана конструкция такого излучателя [191], а на рис. 5.13–5.15 – внешний вид излучателей разных типов, изготовленных на основе кольцевых пьезоэлементов (там же указаны технические параметры аппаратов: мощность  $P$ , частота УЗ колебаний  $f$ , диаметр рабочего инструмента  $D$ ) [194].

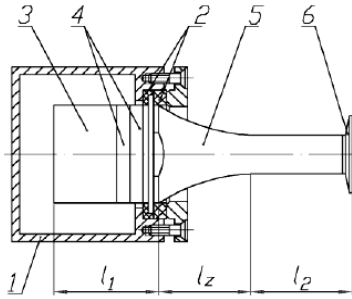


Рис. 5.12. Конструктивная схема излучателя с погружным волноводом-концентратором:

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;  $l_z$  – длина участка переменного сечения (радиальный переход);  $l_2$  – длина излучающего цилиндрического участка концентратора



Рис. 5.13. УЗ аппарат модели УЗТА-0,15/22-О  
 $P \leq 150$  ВА,  $f = 22$  кГц,  $D = 20$  мм



Рис. 5.14. УЗ аппарат модели УЗТА-0,2/22-0М  
 $P \leq 200$  ВА,  $f = 22$  кГц,  $D = 20$  мм



Рис. 5.15. УЗ аппарат модели УЗТА-1/22-ОМ:  
 $P \leq 1000$  ВА,  $f = 22$  кГц,  $D$  (max/min) = 30/18 мм

На рис. 5.16 показан способ ввода УЗ колебаний в моющую жидкость при использовании излучателя с погружным волноводом-концентратором [184]. Технологический аппарат представляет собой УЗ колебательную систему 3, состоящую из электроакустического преобразователя 4, создающего УЗ колебания, волноводной системы 5, концентрирующей эти колебания, и рабочего инструмента 6, обеспечивающего ввод этих колебаний в моющую жидкость, находящуюся в рабочей емкости.

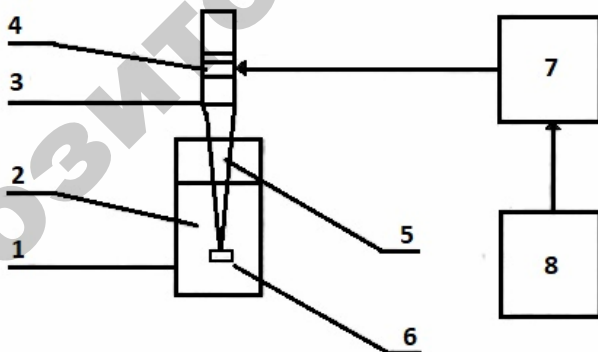


Рис. 5.16. Структурная схема излучателя с погружным волноводом-концентратором:

- 1 – рабочая емкость; 2 – моющая жидкость; 3 – УЗ колебательная система;  
 4 – преобразователь; 5 – волновод-концентратор; 6 – рабочий инструмент;  
 7 – УЗ генератор; 8 – система контроля и автоматизации

### 5.3. Особенности очистки труднодоступных поверхностей

Эффективность акустико-кавитационной очистки поверхностей деталей зависит, с одной стороны, от свойств удаляемых загрязнений, таких как когезионная и адгезионная прочность материала загрязнения, толщина и сплошность слоя загрязнения, а с другой – от свойств очищаемых поверхностей: их морфологии, конфигурации, целостности, месторасположения.

Так, сравнительно плохо поддаются удалению загрязнения, скапливающиеся на сильно шероховатой поверхности, в выполненных на поверхности выточках, пазах, резьбовых нарезках либо в возникших во время эксплуатации вмятинах, проколах, трещинах и других дефектах поверхности.

Особенно плохо удаляются загрязнения, накапливающиеся в труднодоступных местах: на внутренних поверхностях трубопроводов, в узких и глубоких отверстиях (каналах). Ниже кратко рассмотрены некоторые технологические подходы к удалению таких загрязнений в процессе акустико-кавитационной очистки.

Для очистки внутренних поверхностей труб используются УЗ ванны, оснащенные комплектом пьезокерамических излучателей, которые располагаются на стенках рабочей емкости, заполняемой растворами моющих средств [195]. С целью улучшения качества очистки в них предусмотрена прокачка жидкости через очищаемые трубы для выноса загрязнений. Однако очистка в УЗ ваннах малоэффективна, так как УЗ колебания не могут проникать через стенку трубы в находящуюся внутри нее жидкость и вызывать в ней кавитацию [196].

Гораздо более эффективно очищать внутреннюю поверхность труб с помощью УЗ устройств, в которых излучатель в процессе очистки перемещается по трубам. Один из вариантов такого УЗ устройства схематично показан на рис. 5.17 [197].

Цилиндрический излучатель 1 выполнен с возможностью излучения УЗ колебаний в продольном направлении. Он размещен в очищаемой трубе 4 с зазором относительно стенок трубы, так что может свободно перемещаться вдоль трубы. Сопло 2 образовано наружной поверхностью излучателя 1 и внутренней поверхностью 3 трубы. Герметизирующие заглушки 5 и 6 установлены с обоих концов трубы. Для регулирования давления моющего

раствора в зоне чистки служит вентиль 7, а для контроля этого давления – манометр 8. Штуцер 9, установленный на заглушке 6, выполненной в виде стакана, служит для соединения внутренней полости трубы 4 с гидросистемой, состоящей из гидролинии 10, фильтров 11, гидронасоса 12 с вентилем 13 для регулировки давления на входе в трубу, емкости 14 и сальника 15 для прохода электрокабеля 16. Посредством электрокабеля осуществляется подача питания излучателю от генератора 17. Кроме того, электрокабель играет роль троса для перемещения излучателя под действием давления, для чего он наматывается на барабан 18, скорость вращения которого регулируется реверсивным приводом.

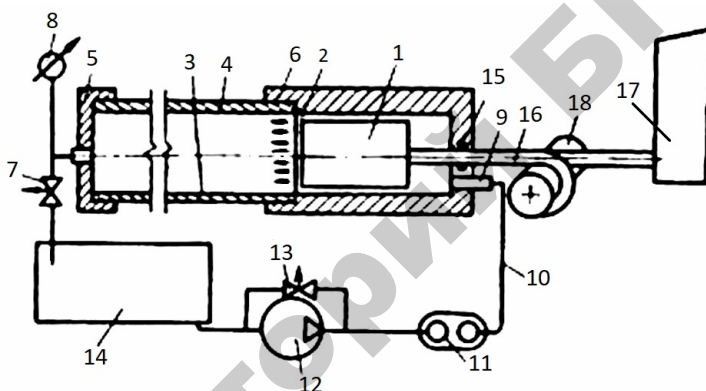


Рис. 5.17. Схема устройства для акустико-кавитационной очистки внутренней поверхности труб:

- 1 – излучатель; 2 – сопло; 3 – внутренняя поверхность очищаемой трубы;
- 4 – очищаемая труба; 5, 6 – герметизирующие заглушки; 7 – вентиль;
- 8 – манометр; 9 – штуцер; 10 – гидролиния; 11 – фильтры; 12 – гидронасос;
- 13 – вентиль; 14 – емкость; 15 – сальник; 16 – электрокабель;
- 17 – генератор; 18 – барабан

Порядок работы устройства состоит в следующем. Моющий раствор подается насосом 12 из емкости 14 через фильтр 11 по гидролинии 10 и штуцеру 9 в стакан заглушки 6, откуда, обтекая излучатель 1 через сопло 2, поступает в зону чистки и затем через вентиль 7 сливается в емкость 14. В зоне очистки с помощью вентиляей 7 и 13 и манометра 8 устанавливается разность давлений, достаточная для того, чтобы обеспечивать скорость истечения раствора через сопло в зону чистки, при которой возникает его турбулизация, а также перемещение



излучателя вдоль очищаемой поверхности трубы. При включенном генераторе 17 и приводе барабана 18 под действием давления жидкости излучатель, находящийся на исходном положении в стакане заглушки 6, перемещается вдоль трубы. Во время перемещения он создает перед собой область кавитации, вызывающую разрушение загрязнения, которое выносится потоком жидкости в емкость 14.

В аналогичном УЗ устройстве для очистки внутренней поверхности труб предлагается использовать специальный механизм подачи, обеспечивающий движение трубы через узлы очистки со скоростью, необходимой для достижения заданного качества очистки, а также индукционный нагреватель, служащий для размягчения нефтяных и парафиновых отложений [198].

На рис. 5.18 показан УЗ аппарат, предназначенный для высокоамплитудной очистки протяженных каналов деталей топливных систем автомобильных двигателей (форсунок, карбюраторов, клапанов) от нагара и других загрязнений [194]. Особенность аппарата заключается в том, что он снабжен волноводом (рабочим инструментом) штырькового типа (диаметр штырька 4 мм), который в процессе очистки вводится в очищаемые отверстия.



Рис. 5.18. УЗ аппарат модели УЗ0-0,4/22-0

Аналогичное УЗ устройство со штырьковым волноводом, предназначенное для очистки глубоких отверстий, показано на рис. 5.19 [199].

На рис. 5.20 представлены различные схемы акустико-кавитационной очистки отверстий (внутренних полостей) на корпусных деталях автотракторных двигателей [16]. Экспериментальное исследование этих схем показало, что наиболее эффективным является применение УЗ излучателя, в котором струя моющей жидкости подается в очищаемое отверстие через рабочую часть излучателя (рис. 5.20, б). Такой технологический подход дает возможность увеличить скорость очистки в 1,5 раза по сравнению с очисткой штырьковым излучателем (рис. 5.20, а) и в 2,5 раза при очистке обычным ступенчатым излучателем (рис. 5.20, в).

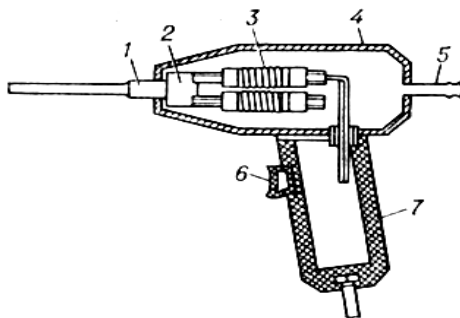


Рис. 5.19. УЗ устройство для очистки глубоких отверстий:  
 1 – волновод; 2 – диафрагма; 3 – магнитострикционный преобразователь;  
 4 – корпус; 5 – штуцер для подачи моющей жидкости;  
 6 – курок-выключатель; 7 – рукоятка

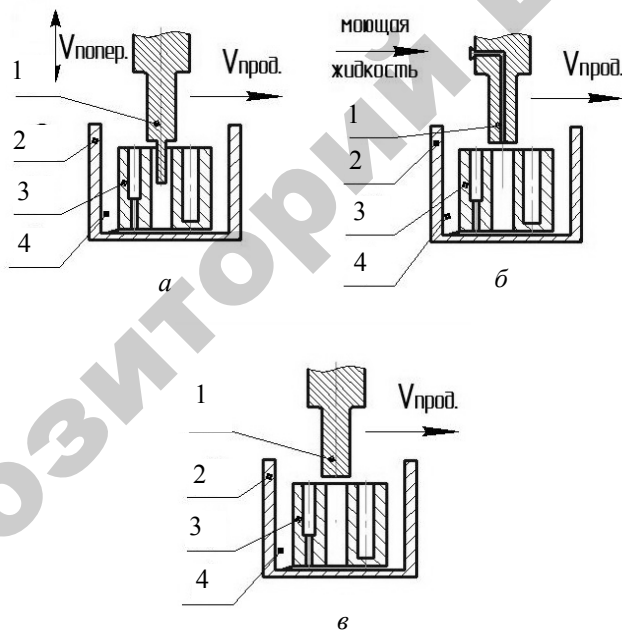


Рис. 5.20. Схемы акустико-кавитационной очистки отверстий:  
 а – штырьковым излучателем; б – излучателем с подачей моющей жидкости;  
 в – ступенчатым излучателем:  
 1 – излучатель; 2 – технологическая ванна; 3 – очищаемый объект; 4 – моющая  
 жидкость; 5 – канал подачи моющей жидкости; б – зона развитой кавитации

Перспективным способом введения УЗ колебаний в отверстия и каналы, имеющие сложную криволинейную форму и **большое** отношение длины к диаметру, является использование гибких волноводов, которые за счет упругой деформации могут проникать в глубокие отверстия и каналы сложной геометрической формы и осуществлять их очистку от загрязнений [196]. В качестве материалов для изготовления таких волноводов служат никель-кобальт-хром-молибденовые сплавы.

В тех случаях, когда ввод УЗ излучателя непосредственно в трубопровод затруднен, внутреннюю поверхность трубопровода можно очистить УЗ контактным способом [16, 200–102]. В этом способе обычно используется магнитострикционный преобразователь большой мощности, с помощью которого в металлической стенке трубопровода возбуждают УЗ колебания, вызывающие разрушение загрязнений на его внутренней поверхности. При этом трубопровод сам становится вторичным излучателем ультразвука в моющую жидкость. Данный способ применяется для очистки внутренней поверхности труб от накипи и ржавчины.

#### **5.4. Моющие жидкости для акустико-кавитационной очистки**

Одним из достоинств технологии акустико-кавитационной очистки является возможность использовать экологически безопасные моющие жидкости, которые хорошо растворяют соответствующие загрязнения, а также обладают физико-химическими параметрами, обуславливающими достижение повышенного разрушающего действия кавитации на загрязнения [203].

Выбор растворов для акустико-кавитационной очистки определяется характером подлежащих удалению загрязнений [203]. Так, для удаления загрязнений, кавитационно не стойких и химически взаимодействующих с водными растворами (типа полировочной пасты) успешно применяются водные щелочные растворы с добавкой поверхностно активных веществ. Для удаления жировых загрязнений и шлифовальных суспензий, содержащих масла, используют органические растворители. Особенно перспективно использовать соединения на основе фреона, обладающие высокой растворяющей способностью. Следует, однако, заметить, что в водных растворах

можно формировать кавитационную область с более высокой эрозионной активностью, чем в органических растворителях.

К мощным жидкостям, применяемым для акустико-кавитационной очистки, предъявляются следующие требования:

- наличие хорошей смачиваемости загрязнений и очищаемой поверхности;
- способность разрушать связи загрязнений с поверхностью и переводить загрязнения в жидкость;
- способность стабилизировать загрязнения с целью предотвращения их ресорбции;
- минимальное воздействие на человека;
- отсутствие химического взаимодействия с материалом очищаемых деталей;
- мощная жидкость должна быть биоразлагаемой [7].

В табл. 5.1 указаны составы водных моющих растворов, используемых для акустико-кавитационной очистки, и режимы очистки в зависимости от видов загрязнений и материала очищаемых деталей, а в табл. 5.2 приведены свойства органических растворителей, используемых для акустико-кавитационной очистки [184].

Таблица 5.1

Составы водных моющих растворов и режимы акустико-кавитационной очистки в зависимости от материала очищаемых изделий

Компоненты	Концентрация, г/см <sup>3</sup>	Температура, град. С	Материал деталей	Загрязнения
1	2	3	4	5
Едкий натр	20–30	60–80	Сталь	Жир, консервирующие смазки
Сода кальциниро- ванная	10–20			
Жидкое стекло	20			
Нитрит натрия	5–10			
Неионогенное ПАВ	0,5–1,5			

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5
Тринатрийфосфат Неионогенное ПАВ Сульфанол	20–35 3 0,5–1,5	55–80	Сталь, медные сплавы, никель	Полировочные пасты, консервирующие и волоочильные смазки, минеральные масла
Кальцинированная сода Жидкое стекло Неионогенное ПАВ	15–20 8–10 3	55–80	То же	То же
Жидкое стекло Тринатрийфосфат Неионогенное ПАВ Сульфанол	5–10 10–30 3 0,5–1,5	55–80	Сталь, медные сплавы, алюми- ний	Масла, жиры, густые смазки и полировочные пасты
Дистиллированная вода		45–55	Поли- мерные пленки	Механические загрязнения, пыль
Тринатрийфосфат Неионогенное ПАВ Сульфанол	30 3 1	60–70	Сталь	Прокатные смазки, закаты, плены, конгломе- рированные загрязнения
Жидкое стекло Неионогенное ПАВ	5	55–80	Алю- миний, латунь	Полировочные пасты, сульфат- резол, эмульсол, стружка, масла, эмульсии олеино- вой кислоты, флюсы

Окончание таблицы 5.1

1	2	3	4	5
Тринатрийфосфат или кальционированная сода	3–5 5–10	85–95	Кремний, германий	Пищевой клей
Деионизированная вода		60–80	Кремний	Удаление абразивной суспензии
Тринатрийфосфат Неионогенное ПАВ Сульфанола 25 % -ный раствор аммиака в воде	10 3 1 5	60–70	Пластмассы Золото, драгоценные камни	Пемза с веретенным маслом, полировочные пасты

Таблица 5.2

Органические растворители, применяемые для акустико-кавитационной очистки

Растворитель	Трихлорэтилен	Четыреххлористый углерод	Фреон-113
Взрываемость	Не взрывается	Не взрывается	Не взрывается
Предельная концентрация, г/м <sup>3</sup>	0,01	0,02	0,8
Температура, град. С	5–70	То же	То же
Материал очищаемых деталей	Все металлы, кроме алюминия	Сталь	Все металлы
Удаляемые загрязнения	Минеральные масла, парафин, каучук, пасты	То же	То же
Недостатки растворителя	Разлагается в воде и при перегреве, токсичен	Разлагается, токсичен	Высокая стоимость

## 6. ТЕХНОЛОГИИ АБРАЗИВНО-КАВИТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ

Абразивно-кавитационная обработка деталей машин является разновидностью технологий обработки свободным абразивом. Особенность ее состоит в том, что в ней проявляются совместно эффекты абразивного и кавитационного воздействий на обрабатываемый материал. В зависимости от механизмов развития кавитации различают абразивную гидрокавитационную и абразивную акустико-кавитационную очистки.

### 6.1. Абразивная гидрокавитационная очистка

Для осуществления абразивной гидрокавитационной очистки применяются моечные устройства с особой конструкцией сопла, позволяющего за счет гидродинамических эффектов захлопывания кавитационных пузырьков разгонять абразивные частицы в водном потоке до такой скорости, при которой обеспечивается разрушение загрязнений. При этом моющая жидкость должна подаваться под достаточно большим давлением, что может быть обеспечено с помощью водяных насосов высокого давления.

На рис. 6.1 показана конструкция моечного устройства, которое благодаря своей универсальности позволяет удалять загрязнения с поверхностей путем реализации различных видов очистки: водоструйной, гидрокавитационной, гидроабразивной и абразивной гидрокавитационной [204].

Устройство состоит из корпуса со сквозным отверстием и конусной насадки, внутри которых расположен золотник с продольными каналами. Между штоком золотника и нажимным рычагом имеется кинематическая связь, осуществляемая посредством шарнира. На переднем торце золотника размещен полый конус и конусный стержень с втулкой-резонатором. Устройство также снабжено кольцом с радиальным отверстием, которое установлено с возможностью поворота и фиксации в различных положениях для подачи абразивного материала. Для реализации абразивно-кавитационной очистки золотник 2 рычагом 7 перемещается

вперед. Моющая жидкость, пройдя через режимный канал *A* и золотник, поступает на втулку-резонатор 16, лепестки которой выполняют роль источника УЗ колебаний, насыщая поток жидкости кавитационными пузырьками. Абразивный материал подается в поток кавитирующей жидкости через штуцер 13.

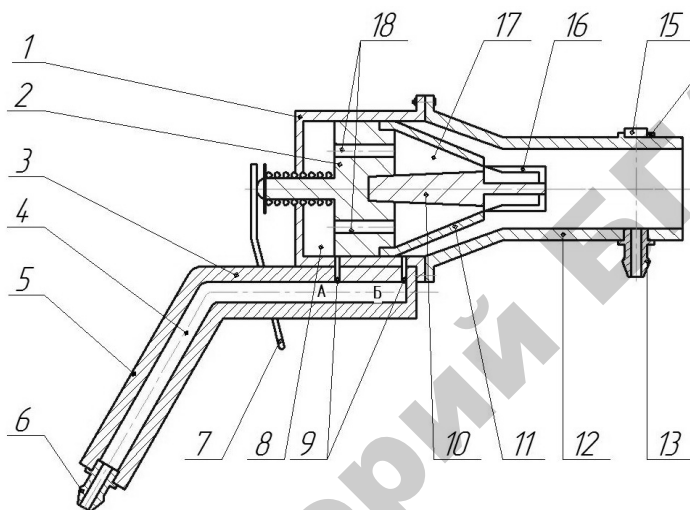


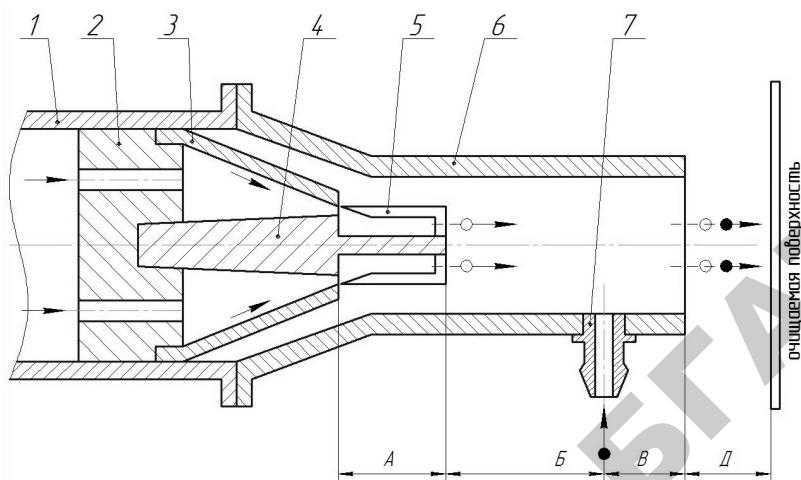
Рис. 6.1. Универсальное моечное устройство для очистки сельскохозяйственной техники:

- 1 – корпус; 2 – золотник; 3 – ось; 4 – подводящий канал; 5 – рукоятка; 6 – штуцер; 7 – рычаг нажимной; 8 – задняя полость; 9 – распределительные каналы; 10 – стержень конусной; 11 – конус полый; 12 – сопло конусной насадки; 13 – штуцер; 14 – гайка фиксирующая; 15 – кольцо; 16 – втулка-резонатор, 17 – полость конусной насадки; 18 – продольные каналы золотника

На рис. 6.2 показано сопло устройства, которое с целью анализа особенностей образования абразивно-кавнтационной струи условно разделено на элементарные участки [205].

На участке *A* поток моющей жидкости под давлением  $P_H$ , пройдя через канал золотника и сформировавшись в виде кольца, подается на втулку-вибратор, в результате чего происходит возбуждение колебаний упругих элементов втулки, т. е. втулка-вибратор становится источником ультразвука.





- .....► моющая жидкость
- ◄-○-► моющая жидкость
- ◄-●-► абразивные частицы
- ◄-●-○-► абразивно-кавитационная струя

Рис. 6.2. Элементарные участки образования абразивно-кавитационной струи в сопле:

1 – корпус; 2 – золотник; 3 – конус полый; 4 – стержень конусной;

5 – втулка-резонатор; 6 – сопло конусной насадки; 7 – штуцер.

A, B, Г, Д – элементарные участки абразивно-кавитационной струи

Общее давление в жидкости на выходе из участка А определяется по формуле

$$P_0 = P_H + P_{ЗВ} \sin \omega_d t, \quad (6.1)$$

где  $P_0$  – общее давление акустико-кавитационного потока, Па;  $P_H$  – давление подачи моечной жидкости, Па;  $P_{ЗВ}$  – звуковое давление, создаваемое за счет упругих колебаний лепестков втулки-вибратора, Па.

В фазе уменьшения давления звуковой волны сплошность потока нарушается, вследствие чего возникают кавитационные пузырьки, на характер развития которых влияет частота собственных колебаний лепестков втулки-вибратора:

$$\omega = \frac{\lambda_n}{h^2} \sqrt{\frac{E_n \times 0,1R^3 \delta}{\pi \rho_n}}, \quad (6.2)$$

где  $\omega$  – частота собственных колебаний лепестков втулки-вибратора, Гц;  $\lambda_n$  – коэффициент пропорциональности, зависит от формы колебаний и условий закрепления колебательного элемента, Н/м<sup>2</sup>;  $h$  – высота лепестка (колебательного элемента) втулки-вибратора, м;  $E_n$  – модуль упругости материала втулки-вибратора, Н/м<sup>2</sup>;  $R$  – радиус лепестка втулки-вибратора, м;  $\delta$  – толщина лепестка втулки-вибратора, м;  $\rho_n$  – плотность материала втулки-вибратора, кг/м<sup>3</sup>.

Согласно формуле (6.2), частоту колебаний лепестков втулки-вибратора можно изменять путем изменения радиуса, толщины, длины лепестка, а также подбором материала втулки.

Максимальное значение силы  $F$ , возмущающей лепесток втулки-вибратора, определяется как сумма отклоняющих сил от напора моечной жидкости и звукового давления. Для определения звукового давления использовано уравнение Эйлера, описывающее процесс образования звуковых колебаний в потоке жидкости.

Возмущающая лепесток втулки-вибратора сила может быть рассчитана по формуле

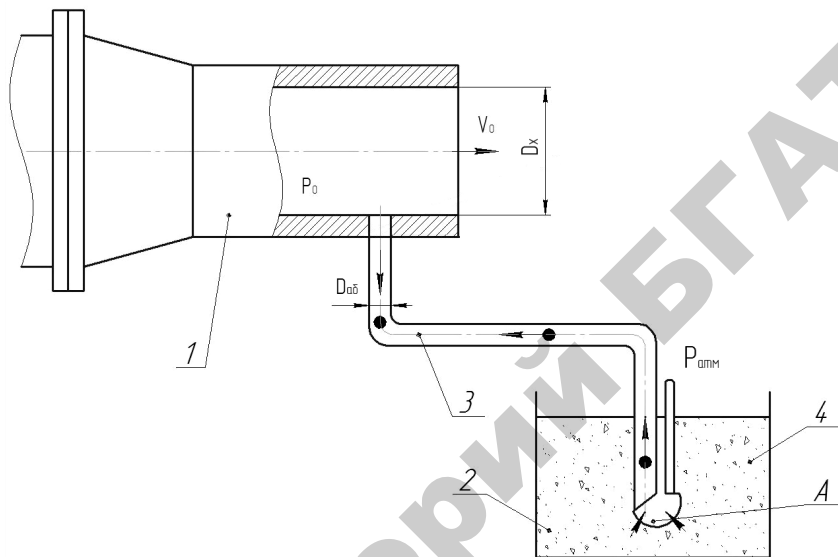
$$F = \frac{2}{3} \pi R \delta \rho_{ж} V_n^2 \cos \theta + \frac{\pi R \delta 2V_n}{3 \sin \theta \omega t} [E_n + 2\rho V_n^2] \sin \omega t, \quad (6.3)$$

где  $V_n$  – скорость потока моеющей жидкости, м/с;  $\rho_{ж}$  – плотность моеющей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\theta$  – угол атаки лепестков втулки-вибратора, рад.

Из формулы (6.3) следует, что величина возмущающей силы, в основном, зависит от скорости потока моечной жидкости, геометрических параметров и свойств материала втулки-вибратора.

На границах участка  $B$  давление моечной жидкости остается постоянным, так как образовавшиеся на участке  $A$  пузырьки в силу своей инертности начинают захлопываться за пределами этого участка.

На участке  $B$  в поток моечной жидкости, насыщенной пузырьками, поступает абразивный материал (рис. 6.3). Он вводится через всасывающую трубку в сопло конусной насадки из резервуара с абразивным материалом за счет разницы давлений.



$A$  – зона всасывания ( $P_{атм}$ )

•• → – движение частиц абразивного материала

Рис. 6.3. Схема забора абразивного материала:

1 – универсальное моечное устройство; 2 – резервуар с абразивным материалом;  
3 – высасывающая трубка; 4 – воздушная трубка

Допуская, что частицы абразивного материала имеют форму, близкую к шару, и одинаковый размер, можно утверждать, что движение моечной жидкости в конусной насадке имеет ламинарный характер, т. е. у стенки конусной насадки разность между атмосферным давлением и давлением в сопле конусной насадки минимальна. Поэтому для улучшения условий подачи абразивного материала в конусной насадке конструкция универсального моечного устройства была изменена путем расположения всасывающей абразивный материал трубки по оси конусной насадки.

Тогда процесс всасывания абразивного материала будет проходить при разности давлений  $\Delta P$ , определяемой выражением

$$\Delta P = \frac{4\rho_{AB}gk}{3V_{II}^2} \left[ 1 + \left( \frac{\rho_{AB}D_{AB}^2}{\rho_{жс}D_{жс}^2} \right)^2 \right], \quad (6.4)$$

где  $\rho_{AB}$  – плотность абразивного материала, кг/м<sup>3</sup>,  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $D_{AB}$  – внутренний диаметр всасывающей абразив трубки, м;  $D_{жс}$  – внутренний диаметр сопла конусного насадка, м;  $k$  – коэффициент пропорциональности, м<sup>3</sup>/с<sup>4</sup>.

Участок  $D$  характеризуется тем, что моечная жидкость, насыщенная пузырьками и частицами абразива, выбрасывается из сопла универсального моечного устройства в направлении очищаемой поверхности. Через некоторый промежуток времени происходит возмущение поверхности пузырька из-за наличия градиента давления, направленного в сторону движения. При этом образуется кумулятивная микроструйка жидкости, вызванная деформацией пузырька при захлопывании. Образующиеся микроструйки прошивают пузырек со скоростью  $V_K$ , которая на несколько порядков больше скорости движения потока моечной жидкости, и дополнительно разгоняют частицу абразивного материала.

Время схлопывания пузырька определяется по формуле

$$\tau = 0,915R_K \left( \frac{\rho_{AK}}{P_0} \right), \quad (6.5)$$

где  $R_K$  – радиус кавитационного пузырька, м;  $\rho_{AK}$  – плотность абразивно-кавитационной струи, кг/м<sup>3</sup>;  $P_0$  – давление абразивно-кавитационной струи в процессе интенсивного захлопывания пузырьков, Па.

Из выражения (6.6) можно определить усилие, с которым разрушаются адгезионные связи частиц загрязнения с очищаемой поверхностью под действием абразивно-кавитационной струи

$$F_{AK} = \frac{\pi \rho_{AK} (0.4575 V_0 P_K D)}{S_{\min}}, \quad (6.6)$$

где  $D$  – диаметр сопла конусной насадки, м;  $S_{\min}$  – минимальное расстояние от сопла до начала зоны интенсивного схлопывания пузырьков, м;  $V_0$  – суммарная скорость абразивно-кавитационной струи, м/с.

Согласованный выбор давления подачи моющей жидкости, конструкционных параметров моечного устройства (величины зазора между конусным стержнем и полым конусом, радиуса, толщины и длины лепестков втулки-вибратора, диаметров отверстий сопла конусной насадки и всасывающей трубки), а также свойств абразивного материала (плотности и размеров частиц) позволяет добиться оптимальных режимов удаления любых возможных видов загрязнений с очищаемой поверхности.

Испытания разработанного устройства показали, что наилучшее качество очистки достигалось в режиме абразивно-кавитационной очистки при условии, когда давление подачи моющей жидкости было 5,75 МПа, в качестве абразивного материала использовался кварцевый песок размером 0,62 мм, который подавался через всасывающую трубку диаметром 5,2 мм, абразивно-кавитационная струя выходила из устройства через сопло диаметром 18,8 мм.

В ходе испытаний также было установлено, что при работе устройства в режиме гидропескоструйной очистки запыленность воздуха в рабочей зоне оператора превышала допустимый предел в 75–115 раз. Для сравнения – применение абразивно-кавитационной струи за счет использования меньшего количества кварцевого песка для очистки поверхности образца от загрязнений позволило снизить уровень запыленности воздуха в рабочей зоне оператора до 7,8–19,2 мг/м<sup>3</sup>, что превышало санитарные нормы в 1,3–3,2 раза. Для устранения этого недостатка в конструкцию устройства было введено пылеподавляющее сопло. Оно создавало вокруг абразивно-кавитационной струи «водяную рубашку», попадая в которую, частицы абразивного материала, отраженные от очищаемой поверхности, изменяли свою скорость и траекторию полета.

Существуют различные конструктивные варианты устройств, аналогичных устройству, рассмотренному выше, которые позволяют проводить очистку, комбинируя разные режимы: струей воды, за счет кавитации, с помощью абразивных частиц [206–208].

Особый интерес представляет способ абразивной гидрокавитационной очистки, в котором используются в сочетании льдоструйная и кавитационная очистки [209, 210].

Льдоструйная очистка основана на использовании сухого льда. Она проста в эксплуатации, экологически чиста и безотходна – сухой лед не оставляет никаких отходов в отличие от других абразивных материалов. Гранулы, выходящие из сопла под большим давлением сжатого воздуха, при соприкосновении с поверхностью порождают минивзрывы, которые разрушают загрязнения. При этом гранула сухого льда переходит в парообразное состояние, минуя жидкое. Разрушающее воздействие гранул, движущихся в потоке моющей жидкости, зависит от скорости их движения, которая, в свою очередь, связана с величиной давления жидкости. Интенсивность движения гранул и, следовательно, степень их воздействия на загрязнения, могут быть существенно повышены, если для их разгона использовать энергию схлопывания кавитационных пузырьков. Таким образом, создавая комбинированные ледно-кавитационные струи, можно значительно повысить эффективность очистки.

На рис. 6.4 показана схема экспериментальной установки для удаления загрязнений с помощью ледно-кавитационных струй [210].

Установка работает следующим образом. При подаче воды насосом, создающим давление в моечном пистолете, в нем возникает кавитация. В образовавшуюся водно-кавитационную струю подается углекислота, при этом в струе образуются ледяные гранулы. Двигаясь в кавитационном потоке, они разгоняются за счет использования энергии схлопывания пузырьков и подаются на очищаемую поверхность. При ударе о поверхность гранулы углекислоты сублимируют, при этом выделяется энергия, идущая на разрушение загрязнений. В процессе очистки загрязнение резко охлаждается, переходя в хрупкое состояние. При этом возникают термические напряжения, снижающие прочность адгезии, что способствует разрушению загрязнений и их отрыву от поверхности. Установка может работать в двух режимах: кавитационном и ледно-кавитационном.

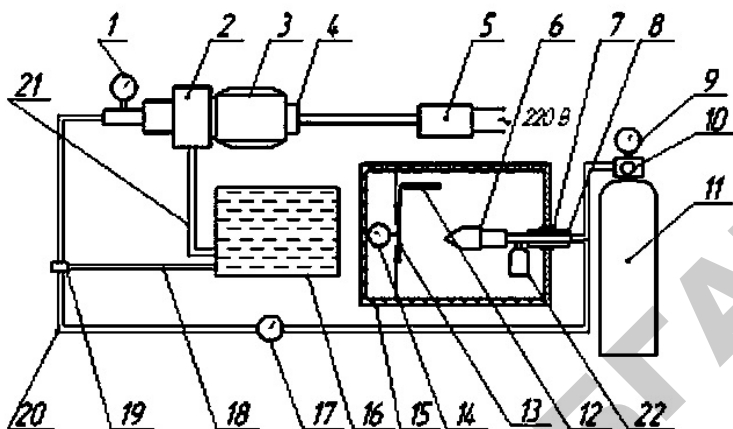


Рис. 6.4. Экспериментальная установка для очистки деталей ледно-кавитационными струями:

- 1 – манометр водяной; 2 – насос; 3 – электродвигатель;  
 4 – устройство защитного отключения; 5 – электроштит;  
 6 – экспериментальное сопло; 7 – зажимы;  
 8 – переходная трубка; 9 – манометр газовый; 10 – электромагнитный клапан;  
 11 – углекислотный баллон; 12 – линейка; 13 – образец;  
 14 – динамометр; 15 – камера очистки; 16 – емкость для воды,  
 17 – расходомер; 18 – перепускная магистраль; 19 – предохранительный клапан;  
 20 – напорная магистраль; 21 – патрубок подачи воды к насосу;  
 22 – емкость с активатором льдообразования

## 6.2. Абразивная акустико-кавитационная очистка

По своему механизму абразивная акустико-кавитационная очистка подобна абразивной гидрокавитационной очистке. Она имеет место в том случае, когда в моющую жидкость, в которой развивается акустическая кавитация, вводятся тонкодисперсные абразивные частицы [130].

При этом загрязнения подвергаются разрушению под действием не только кавитации, но и абразивных частиц. Эти частицы, перемещающиеся под действием акустических течений, играют роль микрорежущих инструментов. Попадая в зону действия

микроударных волн, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков, они приобретают высокие скорости и могут вызывать разрушение загрязнений за счет прямых ударов о поверхность. Следует, однако, заметить, что заметное усиление эрозии при добавлении в кавитирующую жидкость абразивных частиц наблюдается лишь при достаточно высоком статическом давлении, когда происходит значительное увеличение кавитационных эффектов.

В качестве абразивных материалов используются обладающие хорошими режущими свойствами синтетические алмазы, карбид бора, карбид кремния с размером частиц 3–20 мкм, концентрация которых в моющей жидкости составляет 30–60 об. % [130, 184].

Абразивная акустико-кавитационная обработка, как и абразивная гидрокавитационная обработка, применяется не только для очистки поверхности деталей от загрязнений, но также для удаления с поверхности заусенцев.



## **7. КАВИТАЦИОННАЯ ОЧИСТКА ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

Кавитационная очистка обеспечивает высокую степень удаления загрязнений с поверхностей деталей сельскохозяйственной техники. Вместе с тем разные виды этой очистки (гидрокавитационная, акустико-кавитационная и абразивно-кавитационная) проявляют неодинаковую эффективность в отношении тех или иных загрязнений в силу присущих им особенностей разрушающего действия на загрязнения. Кроме того, эффективность каждого вида очистки может зависеть от конкретных условий реализации очистных процессов. Гидрокавитационную и акустико-кавитационную очистку применяют для удаления самых разнообразных загрязнений, абразивно-кавитационную – в основном для удаления трудноудаляемых загрязнений, в частности, старых лакокрасочных покрытий, а также продуктов коррозии.

### **7.1. Очистка от масляно-грязевых загрязнений**

Особенности удаления масляно-грязевых загрязнений в процессе гидрокавитационной очистки можно рассмотреть на примере экспериментов по очистке цилиндрических образцов из ряда материалов: стали, бронзы, алюминия, фторопласта, эбонита [211]. Образцы предварительно обрабатывали на токарно-винторезном станке с использованием в качестве смазочно-охлаждающей жидкости минерального масла SAE 20w-20 API SD/CB. Очистку проводили на стенде, содержащем рабочую емкость объемом 40 л, электронагревательный элемент мощностью 2,3 кВт, насосный агрегат ЦНС 4/100 К5 мощностью 2,2 кВт и производительностью 3,6 м<sup>3</sup>/ч и вихревое гидродинамическое кавитационное устройство с возможностью аэрирования жидкости ВК-10. Роль моющей жидкости играл водный раствор NaOH. Эксперименты показали, что продолжительность очистки нелинейно уменьшается при увеличении температуры и концентрации моющего раствора, а также степени аэрирования. Наилучшие результаты очистки получены при продолжительности обработки 2,5–1 мин, температуре раствора 40–60 °С, концентрации NaOH 0,2–0,4 % и степени аэрирования 0,286.

Об особенностях удаления масляно-грязевых загрязнений в процессе акустико-кавитационной очистки можно судить по представленным ниже отдельным примерам практической реализации очистных процессов.

УЗ очистку деталей автотракторных двигателей от пленок смазочно-охлаждающих жидкостей, остатков доводочных и притирочных паст, продуктов износа при обработке лезвийным инструментом и других загрязнений проводили в две стадии: сначала осуществляли предварительную УЗ очистку в водном растворе тринатрийфосфата ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) при температуре 20 °С для интенсификации размягчения трудноудаляемых загрязнений, а затем – основную УЗ очистку, режимы которой подбирали специальным образом [16].

УЗ очистку стальной ленты, служащей для производства порошковой сварочной (наплавочной) проволоки, от механических загрязнений и остатков консервационной смазки проводили в щелочном моющем растворе с  $\text{pH} > 10$  при температуре 60–70 °С [212].

УЗ очистку холоднокатаной полосы от механических и жировых загрязнений проводили параллельно с обезжириванием на линии горячего цинкования [213, 214]. Полоса обрабатывалась ультразвуком в нагретом растворе моющего средства марки «БФК». В результате обработки остаточное содержание механических и жировых загрязнений уменьшилось до 98 % от исходного уровня (с 500–1000 мг/м<sup>2</sup> до 10–15 мг/м<sup>2</sup>). При этом снижение остаточных жировых загрязнений было в 1,5–2,2 раза, а механических загрязнений – в 1,1–1,4 раза выше с использованием ультразвука, чем без него.

Типичный технологический процесс УЗ очистки имеет следующую структуру (на примере очистки деталей из стального листа и проката разного профиля от заводской смазки для нанесения лакокрасочных или других покрытий) [215]: 1) очистка детали ультразвуком в водном растворе тринатрийфосфата с концентрацией 2,5–3 г/л при температуре раствора 40–55 °С в течение 10 мин; 2) проверка качества отмывки методом разрыва водной пленки на поверхности детали после ополаскивания в воде с температурой 30–50 °С в течение 3 мин; 3) обработка детали в водном растворе ингибитора коррозии – моноэганоламина с концентрацией 1,5–2 мл/л при температуре раствора 15–35 °С в течение 10 мин; 4) просушивание детали теплым воздухом от остатков раствора моноэганоламина в течение 25–30 мин. Обработанная таким образом деталь готова для нанесения покрытий.

## 7.2. Очистка от углеродистых загрязнений

В работе [216] экспериментально исследовались процессы гидрокавитационной очистки прецизионных деталей от нагара во время текущего ремонта автомобильных двигателей. В используемом в экспериментах гидродинамическом излучателе акустические колебания генерировались в области частот от 0,3 до 35 кГц с частотой основного тона 0,3–1,2 кГц. Скорость истечения струи при оптимальном режиме генерирования колебаний составляла 25–40 м/с.

На рис. 7.1 показаны последовательные стадии разрушения пленки нагара с торцевой поверхности клапана газораспределительного механизма. Как видно на рисунке, разрушение пленки в процессе гидрокавитационной обработки происходило хаотично, что могло быть связано с локальностью и неравномерностью распределения напряжений, возникавших в пленке при захлопывании кавитационных пузырьков. В табл. 7.1 приведены типичные параметры гидрокавитационной очистки различных типов деталей двигателей внутреннего сгорания от нагара с учетом соответствующих типоразмеров гидродинамического излучателя, определяемых отношением ширины щели  $a$  к среднему диаметру  $D_c$  кольцевого щелевого сопла.

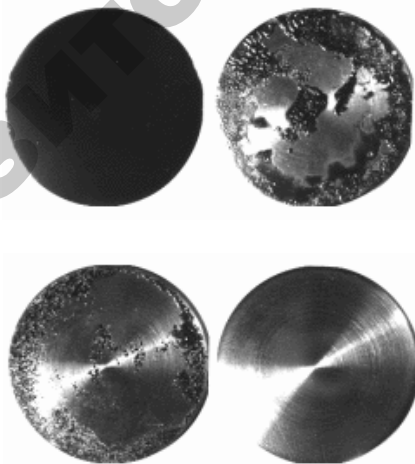


Рис. 7.1. Отдельные стадии разрушения пленки нагара

Таблица 7.1

Параметры гидрокавитационной очистки деталей двигателей внутреннего сгорания от эксплуатационных загрязнений

Основные показатели	Типоразмер излучателя $a/D_0$ мм/мм				
	1/13	0,5/5,5	1/13	0,5/5,5	1/13
Очищаемая деталь	Клапан ГРМ	Втулка плунжера УТН-5	Плунжер УТН-5	Втулка плунжера НД-22	Плунжер НД-22
Расход моющей жидкости, м <sup>3</sup> /ч	3,8	1,4	3,8	1,4	3,8
Интенсивность звука, Вт/см <sup>2</sup>	1,5...2,5	1,5...2,5	1,5...2,5	1,5...2,5	1,5...2,5
Частотный диапазон, кГц	0,3...35	0,3...35	0,3...35	0,3...35	0,3...35
Производительность операций, мин					
– замочка в моющем средстве АМ-15	20...30	20...30	20...30	20...30	20...30
– очистка с помощью гидродинамического излучателя	5...7	3...4	4...5	4...5	3...4
– ополаскивание	1	0,5	1	1	0,5
– пассивация	1	0,5	1	1	0,5
– сушка при 60... 80 °С	1,5	1	1,5	1,5	1

В работе [12] выполнены экспериментальные исследования процессов акустико-кавитационной очистки деталей газовой топливной аппаратуры автотранспорта от эксплуатационных загрязнений, состоящих в основном из углеводородов серий  $C_nH_{2n+i}$  и  $C_nH_{2n-i}$  (алканы, алкены и циклоалканы), элементарной серы, меркаптанов (пентадекантиол), пластификаторов (дибутилфталат и диоктилфталат), а также механических примесей.

Проведен сравнительный анализ эффективности применения различных моющих жидкостей для УЗ очистки деталей, включая Деталан А-10М и ПРОБ (многокомпонентные системы, содержащие синтетические неионогенные ПАВ, активные щелочные добавки, ингибиторы коррозии и органические растворители),

а также ТЕМП-100А, Синтанол ДС-10 и тринатрийфосфат + Синтаמיד-5 (водные растворы неионогенных ПАВ с высокой смачивающей, моющей и эмульгирующей способностью и высокой эрозионной активностью при введении в раствор ультразвука). При анализе учитывались продолжительность УЗ очистки в исследуемых жидкостях, их пенообразование, возможность их регенерации и другие показатели.

Результаты анализа показали следующее. Деталан А-10М обеспечивает наименьшую продолжительность очистки. Вместе с тем он обладает повышенной пенообразующей способностью, что снижает эффективность очистки вследствие поглощения пеной части энергии, вводимой УЗ колебаниями в объем жидкости, а также слабой способностью к регенерации, что не позволяет использовать жидкость многократно. Кроме того, данное средство отличается высокой стоимостью. Тринатрийфосфат + Синтаמיד-5 обеспечивает более продолжительную очистку, чем Деталан А-10М, но значительно превосходит его по другим показателям. ПРОБ и Синтанол ДС-10 являются наименее эффективными: ПРОБ обладает повышенным пенообразованием и наименьшей способностью к регенерации, а Синтанол ДС-10 – высокой продолжительностью очистки. ТЕМП-100А вполне приемлем по продолжительности очистки, пенообразованию и регенерации, однако он более чем в 2 раза дороже тринатрийфосфата + Синтаמיד-5. Таким образом, по результатам анализа наиболее эффективным для применения при УЗ очистке деталей является моющее средство тринатрийфосфат + Синтаמיד-5.

Экспериментально установлено, что в результате обычного погружения загрязненных деталей в нагретую моющую жидкость удаляется основная часть загрязнений (до 85 %), на поверхности остается лишь тонкая пленка загрязнений со сравнительно высокими адгезионными и когезионными свойствами, для удаления которой требуется УЗ обработка. Нагрев жидкости приводит к уменьшению вязкости загрязнений, что способствует их удалению, которое становится наиболее значительным, когда температура жидкости лежит в интервале 60–80 °С. В данном температурном интервале проявляли наибольшую эффективность все из числа исследовавшихся моющих жидкостей. При более сильном нагреве (выше 80 °С) наблюдались потери функциональных свойств компонентами моющих жидкостей,

ослаблялось действие кавитации на загрязнения и, кроме того, чрезмерно росли энергетические затраты.

В работе [13] проводились эксперименты по акустико-кавитационной очистке распылителей форсунок дизельных двигателей, большинство которых (свыше 90 %) имеют дефекты, вызванные закоксовыванием.

До сих пор на многих ремонтных предприятиях АПК распылители очищают ручным способом – с помощью щеток, а также путем промывки в органических растворителях. Однако этот способ является трудоемким и не обеспечивает требуемого качества очистки. Как показали проведенные исследования, гораздо более эффективно применять акустико-кавитационную очистку, в результате которой количество остающихся на поверхности загрязнений не превышает 0,5 % (для сравнения – при механической очистке оно доходит до 10 %).

Эксперименты проводили с помощью УЗ ванны УЗВ-3/100-ТН (производство ЗАО «РЭЛТЕК», рабочая частота 20–24 кГц, амплитуда колебаний излучателя 5 мкм, интенсивность УЗ колебаний 2,5 Вт/см<sup>2</sup>). Для удаления загрязнений (нагаров, полимеризованных смолистых и лаковых отложений) были выбраны моющие средства «ФМС-Щ (авиа)» и «Деталан А10», которые показали значительное преимущество перед другими аналогичными средствами. В частности, они позволили сократить продолжительность очистки в 3–5 раз и обеспечить требуемое качество очистки.

Экспериментально установлены зависимости качества очистки от продолжительности процесса, концентрации и температуры моющего раствора (для случаев использования «ФМС-Щ (авиа)» и «Деталан А10»). Так, стабилизация процесса очистки (прекращение роста качества очистки) наступает через 10–15 мин после начала процесса. Качество очистки растет с повышением концентрации моющего раствора до 10–15 %, дальнейшее повышение концентрации практически не улучшает качество очистки. Оптимальная температура моющих растворов находится в диапазоне 50–60 °С. Снижение температуры ниже 50 °С приводит к спаду химической активности моющего раствора, а повышение выше 60 °С – к уменьшению кавитационного воздействия на загрязнения (из-за роста упругости пара при нагреве, что препятствует захлопыванию кавитационных пузырьков). По степени воздействия на загрязнения

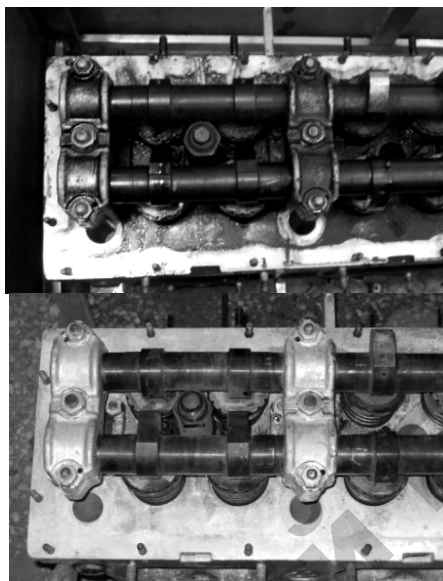
моющие средства «ФМС-Щ (авиа)» и «Деталан А10» почти равноценны, однако «ФМС-Щ (авиа)» в 3 раза дешевле.

Испытания показали, что количество качественно очищенных распылителей (восстановление эффективного проходного сечения и качественное распыливание топлива) составляет 85–95 %. Качественная очистка остальной части распылителей (5–15 %) не достигается в основном из-за наличия в полости распылителей посторонних частиц (песчинок, металлических фрагментов и т. д.), которые могут быть удалены только вручную.

Рис. 7.2 демонстрирует качество акустико-кавитационной очистки некоторых деталей дизельных двигателей [217]. На рис. 7.3 показан типичный образец установки для акустико-кавитационной очистки форсунок, карбюраторов и клапанов автомобильных двигателей от нагара и других загрязнений – УЗ аппарат УЗОИ-0,63/22-О (рабочая частота 22 кГц, мощность 630 ВА, количество одновременно отмываемых форсунок – 6 шт.) [218].

### **7.3. Очистка от накипи, окалины и продуктов коррозии**

Для удаления накипи с внутренней поверхности труб относительно небольшого диаметра (16–25 мм) применяется способ гидрокавитационной очистки, согласно которому вода высокого давления (до 600 кгс/см<sup>2</sup>) входит в трубу в виде кавитирующей струи, формируемой с помощью специальных насадок [219]. Данный способ по сравнению с высоконапорным гидравлическим способом обеспечивает более высокую скорость очистки, а также качество очистки (до основного металла). Кроме того, он позволяет очищать полностью забитые трубы. Для этого сначала проводится очистка сквозного канала с двух сторон трубы, а затем ее окончательная очистка. К недостаткам способа относятся: большая потребляемая мощность; сложность транспортировки из-за большого веса установки; необходимость демонтировать перед очисткой вертикальные теплообменные аппараты, поскольку очистка может проводиться только при горизонтальном расположении очищаемого оборудования; недостаточная надежность работы шлангов высокого давления и уплотнения насоса.



*a*



*б*



*в*

*Рис. 7.2.* Детали дизельных двигателей до очистки (вверху – *a*, слева – *б*, *в*) и после очистки:

*a* – головка блока цилиндров; *б* – крышка шатуна; *в* – поршень





Рис. 7.3. УЗ аппарат УЗОИ-0,63/22-О

Для очистки щелевых форсунок, служащих для водяного охлаждения, от зашлаковывающих их карбонатов, обычно присутствующих в воде, применяется способ УЗ травления, в котором в качестве травильного раствора используются водные растворы кислот [214]. Сравнительные испытания показали, что скорость травления с использованием ультразвука в 5–6 раз выше, чем без его использования: полная очистка форсунки завершается за 5–15 мин, тогда как без наложения ультразвука она длится в течение нескольких часов.

Для удаления окалины с нагретых металлических заготовок применяется способ гидрокавитационной очистки, состоящий в том, что на поверхность металла подают струи воды в режиме срывной кавитации, который создают в трубопроводе подвода охладителя к устройству для гидросбива окалины [220]. При этом струи, истекающие через сопла, долбят окалину на поверхности слитка, обеспечивая ее эффективное удаление. Наибольший эффект очистки при наименьшем давлении на входе в напорный бак достигается при частоте пульсаций, равной или близкой к собственной частоте колебаний окалины, зависящей от химического состава окалины, температуры и т. д. Экспериментальная проверка способа показывает, что в зависимости от вида слитка и окалины оптимальная частота импульсов находится в интервале 300–2000 Гц.

Для удаления окалины с поршневых и уплотнительных колец для автотракторной техники, а также других деталей (штулок, дисков, клапанов), подвергающихся высокотемпературной обработке в процессе изготовления, перспективно применять УЗ травление [221], поскольку применение других традиционных способов очистки нецелесообразно. Так, дробеструйная обработка не обеспечивает полного удаления тонких окисных пленок с поверхности деталей ввиду их малых размеров и сложной конфигурации, а химическое удаление окалины происходит длительно и неравномерно.

Обычно в производственных условиях процесс травления окалины осуществляют в 25 %-ном водном растворе соляной кислоты при температуре 25–40 °С. При использовании ультразвука этот процесс ускоряется и длится в пределах 3–6 мин. Удалению окалины способствует реакция соляной кислоты с железом, сопровождающаяся выделением пузырьков водорода, которые под действием ультразвука проникают под слой окалины, отслаивая ее.

Для удаления продуктов коррозии (а также остатков старых красок, вязких смазок, масел, грязи и других загрязнений) с различных деталей служат специально разработанные комплексы гидрокавитационной очистки, которые осуществляют обработку с помощью перегретой воды высокого давления в режиме кавитации [222].

Продукты коррозии также можно удалять путем акустико-кавитационной очистки. Примером тому является УЗ очистка внутренней поверхности трубопроводов систем водоснабжения от ржавчины и солевых отложений [223]. Однако данный способ очистки имеет ряд недостатков: большая длительность процесса очистки (например, в 5 раз больше по сравнению с гидрохимической очисткой); невозможность удаления ржавчины и солевых отложений толщиной более 2–2,5 мм, а также из полностью или локально забитых трубопроводов.

Весьма эффективным способом удаления продуктов коррозии, а также окисных пленок, солевых отложений и других трудноудаляемых загрязнений является абразивно-кавитационная очистка [207, 208]. Для осуществления данного способа очистки в моющую среду добавляют абразив – частицы корунда, карбида кремния, алмаза. Часто абразивно-кавитационная очистка сочетается с абразивно-кавитационной финишной обработкой деталей [208].

#### **7.4. Очистка от старых лакокрасочных покрытий**

Для удаления лакокрасочных покрытий с поверхностей деталей применяется гидрокавитационная очистка. В частности, с помощью гидрокавитационной установки, основным элементом которой являлось вихревое кавитационное устройство, проводилась очистка стальных пластин от покрытий ЭП-437, ХС-436 и УР-11 и алюминиевых пластин от покрытий ОС-1203 [224]. Также для удаления лакокрасочных покрытий применяют акустико-кавитационную очистку [225].

Более эффективно можно удалять лакокрасочные покрытия с помощью абразивно-кавитационной очистки. Так, в работе [10] предложена технология наружной очистки деталей зерноуборочных комбайнов от остатков старых лакокрасочных покрытий с помощью абразивно-кавитационной струи перед постановкой комбайнов на ремонт или длительное хранение. Эта технология по сравнению с традиционными технологиями, такими как водоструйная или гидроабразивная обработка, обеспечивает сокращение трудоемкости работ, а также уменьшение затрат на электроэнергию, воду и расходные материалы. С помощью этой технологии также можно очищать поверхности деталей от продуктов коррозии и других, сильно связанных с поверхностью загрязнений.

#### **7.5. Очистка от шаржированных частиц**

Очистка поверхности металлических деталей от шаржированных абразивных частиц представляет значительные трудности и нередко сопровождается снятием определенного слоя металла. Наиболее эффективным способом удаления таких частиц является акустико-кавитационная очистка, которая позволяет практически полностью избавиться от них при условии, когда ультразвуковая обработка проводится в высокоамплитудных режимах, а обрабатываемые поверхности располагаются в непосредственной близости от излучателя [10, 18].

Сравнительная оценка эффективности различных способов очистки от шаржированных абразивных частиц показывает, что после

УЗ высокоамплитудной очистки остается до 40 % частиц, после УЗ низкоамплитудной очистки – до 60 %, после очистки по заводской технологии в горячем керосине с ручной протиркой – до 70 %, после струйной очистки в водном моющем растворе – до 85 % частиц [10].

При проведении кавитационной очистки от шаржированных частиц следует учитывать кавитационную стойкость обрабатываемого материала, которая может оказаться существенно ниже кавитационной стойкости внедрившихся в этот материал абразивных частиц и тогда станет возможным кавитационное разрушение очищаемой поверхности [18]. Во избежание этого нежелательного явления следует проводить очистку в мягком акустическом режиме, когда удаление частиц в основном обеспечивается пульсирующими кавитационными пузырьками и акустическими потоками [10].

## 8. КАВИТАЦИОННАЯ ОЧИСТКА ПЛОДООВОЩНЫХ ПРОДУКТОВ

### 8.1. Очистка от загрязнений микроорганизмами

Для очистки поверхностей плодов и овощей от микробиальных загрязнений применяется УЗ дезинфицирующая обработка. Сам по себе ультразвук далеко не всегда является эффективным средством уничтожения микроорганизмов, поскольку для этого требуется сравнительно длительное время обработки, в течение которого питательные и органолептические свойства пищевых продуктов могут ухудшиться. Поэтому для повышения эффективности инактивации микроорганизмов часто применяют УЗ обработку совместно с другими видами обработки, основанными на использовании различных физических воздействий или дезинфицирующих веществ.

Усиление дезинфицирующего эффекта УЗ обработки в тех случаях, когда она проводится при наличии дезинфицирующих веществ, объясняется тем, что ультразвук способствует проникновению через клеточную мембрану химических окислителей, оказывающих разрушительное действие на микроорганизмы [226, 227].

Ниже представлен краткий обзор влияния УЗ обработки на инактивацию микроорганизмов.

Летальный эффект УЗ обработки на микроорганизмы усиливается, если она проводится в горячей (55 °С) воде [228], однако при температурах выше 60 °С скорость гибели микроорганизмов при таких условиях обработки мало отличается от достигаемой при обычной тепловой обработке.

При изучении совместного влияния ультразвука (20 кГц) и нагрева (45–55 °С) на выживаемость находящихся в воде *Saccharomyces cerevisiae* было показано, что ультразвук при низких (нелетальных) температурах не оказывал инактивирующего действия, однако при высоких температурах был обнаружен синергетический эффект воздействия УЗ и тепловой обработки [229].

Ультразвук оказался не в состоянии разрушить дрожжевые клетки – он лишь повредил их, сделав более чувствительными к нагреванию. Оптимальная мощность ультразвука, обеспечивающая максимальный эффект инактивации, составила 100 Вт.

Для инактивирования *E. coli* и *Staphylococcus epidermidis* наиболее эффективной оказалась термоинсонификация [230].

Ввиду сложного строения и проявления защитной реакции *Lactobacillus sporogenes* инактивация этих бактерий УЗ обработкой оказалась менее эффективной по сравнению с обработкой ионизирующим  $\gamma$ -облучением, вместе с тем сочетание ультразвука с  $\gamma$ -облучением позволило снизить дозу облучения, достигая при этом тех же значений смертности бактерий, что и при использовании одного  $\gamma$ -облучения [231].

Среди разнообразных веществ, применяемых для дезинфекции плодов и овощей, пожалуй, самое большое распространение получил хлор, который используется в пищевой промышленности в течение нескольких десятилетий [232–235].

При мойке плодов и овощей наиболее широко применяются газообразный хлор и гипохлорит [149]. Однако чрезмерное злоупотребление хлором вредно из-за формирования канцерогенных побочных продуктов дезинфекции, таких как тригалогенометаны, хлорамины, галокетоны, хлорпикрины и галогензамещенные уксусные кислоты, вызванные реакцией хлора с органическими веществами [149, 156, 236–240]. Остаточные количества этих вредных соединений могут осаждаться на поверхности плодов и овощей в процессе их мойки и представлять опасность для потребителей. Из-за угроз, представляемых хлором, его использование в пищевой промышленности запрещено в ряде европейских стран (Бельгия, Германия, Нидерланды, Швеция) [85].

УЗ обработка плодов и овощей, осуществляемая совместно с хлорированием, позволяет повысить дезинфицирующий эффект. Так, сочетание обработки ультразвуком (10 мин, 170 кГц) и диоксидом хлора увеличивало сокращение численности *Salmonella* и *E. coli* O157:H7 в яблоках и салате приблизительно в 2 раза по сравнению с обработкой только лишь диоксидом хлора [240]. Подобным образом использование ультразвука (40 кГц) в сочетании с диоксидом хлора обеспечивало довольно высокое послеуборочное качество японской сливы (*Prunus salicina* L.) [242].

Повышенный дезинфицирующий эффект дает УЗ обработка, проводимая в сочетании с озонированием. Так, численность популяции микроорганизмов при одновременной обработке измельченного салата в воде ультразвуком и газообразным озоном

уменьшалась на  $1,4 \log_{10}$  КОЕ/г, что больше, чем при обработке только лишь озоном [243].

Ультразвук обеспечивал инактивацию *E. coli* O157:H7 в различных солевых растворах. Например, УЗ обработка при 40 °С приводила к полной инактивации клеток в растворах 0,5 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 1 %  $\text{CaCl}_2$ , 2 %  $\text{NaCl}$  и 5 %  $\text{Na}_2\text{P}_0_4$ , а также в растворе  $\text{AlCl}$  независимо от его концентрации при длительности обработки 10 мин [149].

Исследования эффективности обработки салата ультразвуком (30 Вт/л, 40 кГц) и органическими кислотами при температуре 20 °С показали, что максимальные сокращения количества *E. coli* O157: H7, *S. typhimurium* и *L. Monocytogene* составили 2,7, 3,2 и 2,9  $\log_{10}$  КОЕ/г, для молочной, лимонной и яблочной кислот после совместной обработки ультразвуком и 2 %-ными кислотами в течение 5 мин [244].

При изучении влияния ультразвука (40 кГц, 10 мин) и салициловой кислоты (0,05 мМ) на синюю плесень, которую вызывает *Penicillium expansum* в персиках, было установлено, что комбинация ультразвука с кислотой оказалась более эффективной, чем обработка либо одним, либо другим способом в отдельности [245].

Использование ванилина или цитраля в процессе УЗ обработки (600 Вт, 20 кГц, 45 °С) позволило сократить время обработки, необходимое для гибели *L. monocytogenes* в апельсиновом соке, которое составило от 1,6 до 2,6 мин [246].

Существенный эффект дает УЗ обработка в присутствии хитозана, который нарушает структуру поверхности и разрыхляет клеточную стенку благодаря образованию на поверхности клетки полиэлектролитных комплексных соединений и, кроме того, увеличивает проницаемость клеточных мембран благодаря своей поликатионной природе [149]. После 30-минутной обработки хитозаном (1000 мг/кг) численность *S. cerevisiae* (КОЕ/г) снижалась в 10 раз, в то время как совместная обработка ультразвуком и хитозаном приводила к снижению численности жизнеспособных клеток в 1000 раз [247].

Ультразвук можно эффективно использовать для инактивации спор [226]. Известно, что некоторые виды бактерий способны существовать в форме спор, представляющих собой особый тип клеток с плотной оболочкой. Споры могут сопротивляться ряду внешних факторов, таких как высокие температуры, осмотические давления, экстремальные значения рН и механические ударные воздействия. Некоторые разновидности споровых бактерий, в частности, *Bacillus cereus* обычно находятся на фруктах и овощах. Споровые бактерии

более стойки к ультразвуку, чем вегетативные бактерии. УЗ обработка, однако, может вызвать некоторые изменения в состоянии спор, такие как разбухание, эрозию поверхности [248]. Установлено, что для сокращения спор *B. cereus* эффективно использовать ультразвук (40 кГц) в сочетании с препаратом Tween 20 (концентрация 0,1 %) [249]. При такой обработке достигались сокращения микроорганизмов, составляющие 2,49 и 2,22  $\log_{10}$  КОЕ/г на салате и моркови, соответственно, не вызывая ухудшение качества продуктов.

Различные данные о дезинфицирующем действии ультразвука на плоды и овощи суммированы в табл. 8.1 [85].

Таблица 8.1

Применение ультразвука и сокращение численности микроорганизмов при дезинфекции некоторых видов плодов и овощей

Продукт	Параметры обработки	Вид обработки	R, $\log_{10}$ КОЕ/г	Ссылки
1	2	3	4	5
Земляника	350 Вт/л, 40 кГц, 20 °С, 10 мин	УЗ обработка	TVC: 0.6 YMC: 0.5	[156]
Салат-латук	280 Вт/л, 20 кГц, 53 мин	УЗ обработка	<i>E. coli</i> O157:H7: 4.4 (в моечной воде)	[250]
Земляника	120 Вт, 35 кГц, 15 °С Образец / вода: 1/25	УЗ обработка	TVC: 0.6 YMC: 1.4	[251]
Красный стручковый перец	120 Вт, 35 кГц, 15 °С Образец / вода: 1/25	УЗ обработка	<i>L. innocua</i> : 1.98	[251]
Кочан-ный салат	10 Вт/л, 32–40 кГц, 10 мин Образец/вода: 1/20	УЗ обработка УЗ обработка + хлорированная вода (свободный хлор: 25 ppm)	<i>S. typhimurium</i> : 1.5 <i>S. typhimurium</i> : 2.7	[252]



Продолжение таблицы 8.1

1	2	3	4	5
Измель- ченная морковь	45 кГц, 1 мин	УЗ обработка УЗ обработка + + хлориро- ванная вода (свободный хлор: 200 ppm)	TVC: 1.3 YMC: 0.9 TVC: 1.0 YMC: 0.9	[252]
Томаты черри	45 кГц, 25 °С, 10 мин	УЗ обработка УЗ обработка + + перуксу- сная кислота (40 мг/л)	S. enterica typhimurium: 0.8 S. enterica typhimurium: 3.9	[253]
Салат- латук	170 кГц, 6–10 мин	УЗ обработ- ка + ClO <sub>2</sub> (5 и 10 ppm)	Salmonella spp.: 2.2–2.9 E. coli O157:H7: 1.3-2.2	[231]
Яблоко	170 кГц, 6–10 мин	УЗ обработка + + ClO <sub>2</sub> (5 и 10 ppm)	Salmonella spp.: 3.1–4.2 E. coli O157:H7: 2.2–3.8	[241]
Листья шпината	200 Вт/л, 21,2 кГц, 2 мин	УЗ обработ- ка + под- кисленный хлорид на- трия (200 мг/л)	E. coli O157:H7: 4	[254]
Салат- латук	30 Вт/л, 40 кГц, 5 мин	УЗ обработка + + молочная / лимонная / яблочная кислота (2 %)	E. coli O157:H7: 2.7 S. typhi- murium: 3.2	[244]

1	2	3	4	5
Трюфель	35 кГц, 4 °С, 10 мин	УЗ обработка + этанол (70 %)	TVC: 4 Дрожжи: >0.5 Плесень: <1,7 Pseudomonas spp.: >4 Энтеробактерии: 3.6	[255]
Слива	100 Вт, 40 кГц, 20 °С, 10 мин Образец / вода: 1/5	УЗ обработка + ClO <sub>2</sub> (40 мг/л) УЗ обработка + перуксусная кислота (40 мг/л)	TVC (мезофилы): 3 TVC (психротрофы): 2.9 YMC: 2	[242]

Примечание. R (microbial reduction) – сокращение численности микроорганизмов; TVC (total viable count) – общее количество жизнеспособных организмов; YMC (yeast and mold count) – количество дрожжей и плесени

### Особенности очистки томатов черри

В работе [253] исследовалось влияние УЗ обработки в сочетании с различными дезинфицирующими средствами на уменьшение численности микроорганизмов на поверхности томатов черри. Для обработки отбирали томаты с плотной текстурой и отсутствием трещин на поверхности. Перед обработкой их хранили в охлажденном состоянии (при температуре 7 °С). Образцы помидоров подвергали следующим видам обработки: обработка отдельно ультразвуком, обработка отдельно дезинфицирующими средствами, совместная обработка ультразвуком и дезинфицирующими средствами. Обработку ультразвуком осуществляли на частоте 45 кГц с помощью УЗ очистителя модели 08849-00 (Cole Parmer, США) в течение 10, 20 и 30 мин. В качестве дезинфицирующих средств использовались дихлоризоцианурат натрия (50 или 200 мг/л), 5 %-ная перекись водорода, перуксусная кислота (40 мг/л) и диоксид хлора (10 мг/л). Обработку дезинфицирующими средствами (как совместно с ультразвуком, так и без него) вели

в течение 10 мин. Все виды обработки выполняли при температуре 20 °С. В обработанных образцах оценивали уменьшение количества естественных микробиальных загрязнений, а также инокулированных бактерий *Salmonella*, прилипших к поверхности.

Как показали исследования, количество аэробных мезофильных бактерий уменьшилось после различных видов обработки на 0,7–4,4  $\log_{10}$  КОЕ/г, в то время как количество плесени и дрожжей – на 1,1–3,4  $\log_{10}$  КОЕ/г. Ограничения в удалении микроорганизмов с поверхности помидоров могли быть связаны с наличием многослойной гидрофобной кутикулы, состоящей из воскоподобного вещества кутина, которое обычно покрывает поверхность плодов и овощей.

Совместная обработка ультразвуком и перуксусной кислотой дала наибольший дезинфицирующий эффект: количество аэробных мезофильных бактерий уменьшалось на 4,4  $\log_{10}$  КОЕ/г, плесени и дрожжей – на 3,4  $\log_{10}$  КОЕ/г. Важное преимущество использования перуксусной кислоты состоит в том, что она не представляет опасности для окружающей среды и не образует токсичные соединения в результате реакции с органическими материалами.

В табл. 8.2 [253] приведены данные о сокращении населенности бактерий *Salmonella Typhimurium* ATCC 14028 на поверхности целых (неповрежденных) помидоров после обработки ультразвуком и перуксусной кислотой, как в отдельности, так и совместно, а на рис. 8.1 [253] представлены микроизображения поверхности помидоров, демонстрирующие дезинфицирующие эффекты обработки (начальная населенность бактерий составляла 7.7  $\log_{10}$  КОЕ/г).

### **Особенности очистки листьев шпината**

В работе [151] исследовалось влияние УЗ обработки в сочетании с различными дезинфицирующими средствами на уменьшение населенности *Escherichia coli* O157:H7 на листьях шпината. Образцы инокулированных листьев шпината в количестве 25 г помещали в стеклянный стакан, содержащий 500 мл одной из следующих моющих жидкостей: стерилизованной деионизированной воде, кислотной электролизованной воде (рН 2,7, окислительно-восстановительный потенциал 1150 mV, 45 мг/л свободного хлора), хлорированной воде (200 мг/л), перуксусной кислоте (80 мг/л) и подкисленном хлорите натрия (200 мг/л). Обработка во всех видах моющих жидкостей проводилась как совместно с ультразвуком (21,2 кГц), так и без него.

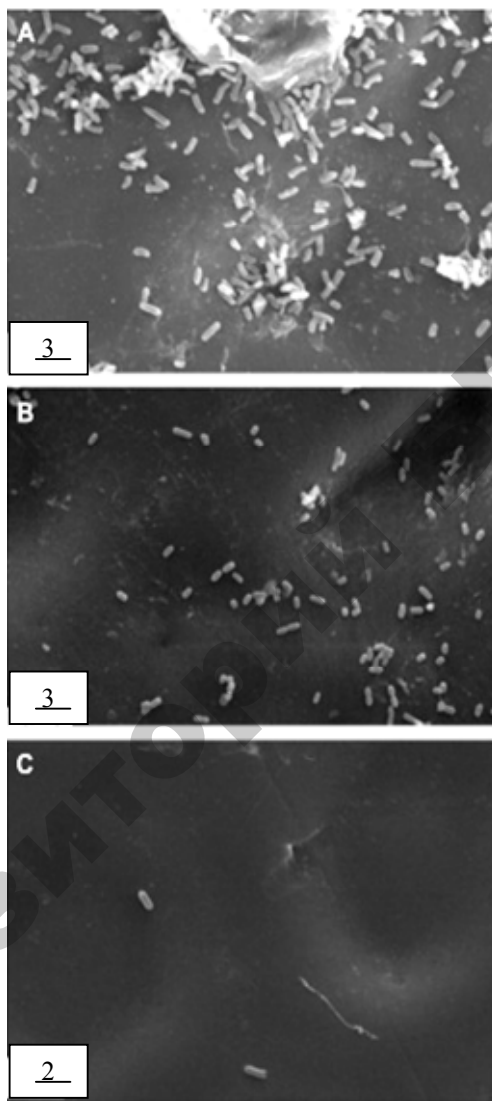


Рис. 8.1. Микрофотоснимки клеток *Salmonella Typhimurium* ATCC 14028, находящихся на поверхности томатов черри, полученные с использованием сканирующей электронной микроскопии: необработанные (А), после обработки ультразвуком в сочетании с перуксусной кислотой в течение 10 мин (В), после обработки ультразвуком в течение 30 мин (С)

Таблица 8.2

Влияние дезинфицирующей обработки ультразвуком (45 кГц) и перуксусной кислотой (40 мг/л) (в отдельности и совместно) на сокращение населенности клеток *Salmonella Typhimurium* ATCC 14028 на поверхности томатов черри

Вид обработки	Длительность обработки, мин	Сокращение населенности клеток, $\log_{10}$ КОЕ/г
Ультразвук	10	0,83
Ультразвук	20	1,22
Ультразвук	30	1,73
Перуксусная кислота	10	2,73
Ультразвук + перуксусная кислота	10	3,88

Во время обработки жидкость перемешивали магнитной мешалкой. Обработку ультразвуком проводили с помощью УЗ установки с погружным излучателем Ultrasonic IL 1000-6/2 (ООО «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ», Россия). Излучатель с диаметром стержня 31 мм помещали на расстоянии 50 мм от дна стакана. Листья поддерживали в жидкости с помощью металлической сетки так, чтобы во время обработки они располагались под излучателем. Плотность акустической мощности (ПАМ), вводимой в жидкость, составляла 200 Вт/л (величина ПАМ определялась калориметрическим методом). Обработанные листья высушивали и подвергали микробиологическому анализу. Также поводился микробиологический анализ моющих жидкостей.

В дополнительных экспериментах изучали дезинфицирующее влияние УЗ обработки в сочетании с хлоритом натрия при его различных концентрациях (100, 200, 300, 400 и 500 мг/л) и фиксированном значении ПАМ (200 Вт/л), а также при различных значениях ПАМ (0, 100, 200, 300, 400, и 500 Вт/л) и фиксированной концентрации хлорита натрия (200 мг/л). Кроме того, изучали влияние ПАМ на уменьшение населенности *E. coli* O157:H7 в дистиллированной воде. Свежеприготовленный инокулят (109 клеток *E. coli* O157:H7 cells в 1 мл) объемом 50 мл добавляли в стеклянный стакан, содержащий 500 мл стерильной дистиллированной воды. Инокулированная жидкость обрабатывалась ультразвуком в течение 2 мин при значениях ПАМ, равных 0, 100, 300, and 500 Вт/л.

Результаты влияния обработки ультразвуком в сочетании с дезинфицирующими средствами на сокращение численности *E. coli* O157:H7, инокулированной на верхней (гладкой) поверхности листьев шпината, представлены в табл. 8.3 [52].

Таблица 8.3

Сокращение численности *E. coli* O157:H7 на поверхности шпината после обработки ультразвуком в сочетании с дезинфицирующими средствами в течение 2 мин

Дезинфицирующее средство	Сокращение численности <i>E. coli</i> O157:H7, log <sub>10</sub> КОЕ/г		
	Обработка дезинфицирующим средством	УЗ обработка совместно с дезинфицирующим средством	Дополнительное сокращение численности за счет УЗ обработки
Вода	1,0	2,1	1,1
Хлорированная вода	2,0	3,1	1,1
Электролизованная вода	2,2	3,1	0,9
Перуксусная кислота	2,2	2,9	0,7
Хлорит натрия	3,1	4,0	0,9

Среди используемых дезинфицирующих средств только обработка с помощью хлорита натрия приводила к значительному уменьшению численности бактерий – на 2,1 log<sub>10</sub> КОЕ/г по сравнению с мойкой в воде, в то время как при обработке другими дезинфицирующими средствами она уменьшалась приблизительно на 1 log<sub>10</sub> КОЕ/г. Применение ультразвука при мойке дезинфицирующими средствами значительно увеличивало сокращение численности *E. coli* O157:H7 по сравнению с одной лишь мойкой дезинфицирующими средствами. Дополнительное сокращение численности микроорганизмов за счет ультразвука составляло 0,7–1,1 log<sub>10</sub> КОЕ/г, причем самым большим оно было при обработке ультразвуком в воде, а самым малым – при обработке ультразвуком в перуксусной кислоте.

Эффективность обработки ультразвуком совместно с хлоритом натрия становилась более высокой с увеличением концентрации хлорита натрия, пока ее значения не превышали 200 мг/л

(при концентрации выше 200 мг/л существенной разницы в сокращении численности микроорганизмов не наблюдалось). Повышение эффективности совместной обработки ультразвуком и хлорита натрия также имело место с увеличением плотности акустической мощности от 0 до 500 Вт/л и длительности УЗ воздействия от 0 до 4 мин. Клетки *E. coli* O157:H7, инокулированные на нижней (шероховатой) стороне листьев шпината, было труднее удалить, чем клетки, которые были инокулированы на верхней (гладкой) стороне.

## 8.2. Очистка от загрязнений пестицидами

Исследования процессов УЗ мойки пищевых продуктов, прежде всего, овощей и фруктов свидетельствуют о значительных преимуществах использования ультразвука для удаления остатков пестицидов. В табл. 8.4 в качестве примера приведены экспериментальные данные об эффективности использования ультразвука для удаления остатков пестицидов из некоторых видов плодоовощной продукции [149]. Ультразвук ускоряет удаление пестицидов по сравнению с традиционной обработкой методом твердо-жидкостной экстракции, применяемой для удаления  $\alpha$ -циперметрина и диметоата.

Таблица 8.4

Удаление пестицидов из плодоовощной продукции

Химическое соединение	Вид продукции	Продолжительность операции, мин	Эффективность, %
Циметоат	Оливки	20	90
$\alpha$ -Циперметрин	Оливки	20	99
Тиабендазол	Апельсины		50

Как правило, остатки пестицидов удаляют путем погружения очищаемых продуктов в УЗ ванну с моющим раствором на 20–30 мин. Эффективность очистки возрастает при непрерывном обновлении моющего раствора в ванне и использовании электролизованного щелочного раствора [149].

УЗ мойка апельсинов с использованием моющих средств позволяет вдвое снизить содержание тиабендазола в кожуре плодов.

Также УЗ мойка способствует удалению из апельсинов имазалила. При этом предполагается, что ультразвук усиливает вытеснение имазалила через поры кожуры и способствует его дальнейшему разложению [52].

В результате УЗ обработки кочанной капусты и зеленого перца в электролизованной щелочной воде в течение 10 мин наблюдалось снижение содержания метамидофоса и диметоата в капусте на 33,8 и 31,6 %, соответственно, а в зеленом перце – на 17,0 и 28,7 %. Непрерывное обновление электролизованной воды позволяло еще более сократить содержание метамидофоса и диметоата – в капусте на 79,3 и 89,3 %, соответственно [256].

Благодаря применению УЗ мойки овощей и фруктов обеспечивается эффективное удаление остатков пестицидов с поверхности, а также с приповерхностного слоя обрабатываемых продуктов. Что же касается возможности их удаления из внутренних растительных тканей, то соответствующих сообщений об этом в литературных источниках не имеется.

### **Кинетика очистки от загрязнений пестицидами**

В работе [257] исследовалась кинетика УЗ очистки остатков пестицидов с поверхности различных видов овощей: кориандра, капусты, спаржевой фасоли и красного перца (перец чили). Предварительно исследуемые образцы овощей подвергали загрязнению пестицидами, для чего их замачивали в течение 20 минут в водном растворе карбосульфана (пестицид класса карбаматов) с концентрацией 8 мл пестицида на 6 л воды, после чего высушивали. Очистку осуществляли с помощью УЗ моечной установки (частота 60 кГц, мощность 140 Вт), содержащей 2 л воды, в которую погружали кориандр, капусту, фасоль и перец в количестве 160, 220, 250 и 600 г, соответственно, в каждом опыте. Обработку ультразвуком вели в течение 0, 3, 7 и 10 мин при температуре 20, 25 и 30 °С. Опыты повторяли трижды. Для сравнения проводили аналогичные опыты без ультразвука.

Об уменьшении остатков пестицидов судили по степени ингибирования ферментов (степени токсичности пестицидов). У сырых неочищенных овощей имеется большое количество остатков пестицидов и, соответственно, наблюдается высокое ингибирование



ферментов, после очистки овощей остатки пестицидов становятся меньше и ингибирование ферментов снижается. Уменьшение остатков пестицидов в зависимости от времени обработки при разных температурах представлено графически на рис. 8.2 [257].

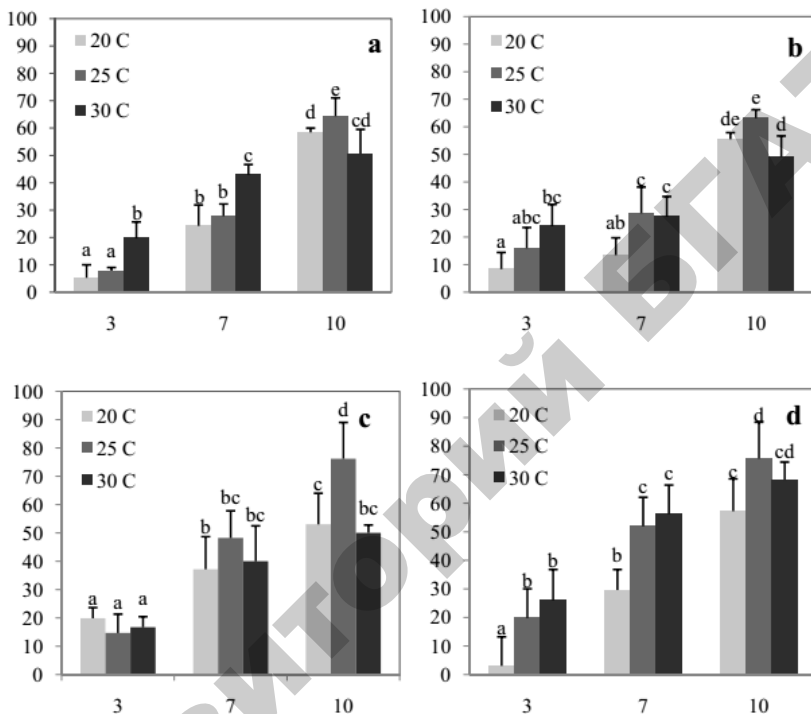


Рис. 8.2. Процентное уменьшение ингибирования ферментов в зависимости от времени УЗ обработки при различных температурах:

*a* – кориандр; *b* – капуста; *c* – спаржевая фасоль; *d* – красный перец

Для кориандра и перца время и температура обработки оказывают влияние на уменьшение остатка пестицидов. С увеличением времени обработки эффективность очистки заметно увеличивается. Для капусты и фасоли эффективность очистки изменяется незначительно при обработке в течение 3 и 7 мин при всех температурах и заметно увеличивается при обработке в течение 10 мин. УЗ очистка кориандра, капусты, фасоли и перца приводит к уменьшению остатков пестицидов до 64, 63, 76 и 75 %, соответственно.

Интересно отметить, что при обработке при 25 °С в течение 10 мин уменьшение остатков пестицидов является наибольшим и значительно отличается от того, что имеет место при других температурах. Влияние температуры жидкости на эффективность очистки обусловлено рядом причин. Изменение температуры приводит к изменению вязкости жидкости, скорости диффузии растворенных газов, растворимости газа в жидкости и давления пара, и это все влияет на интенсивность кавитации. С увеличением температуры растет число кавитационных пузырьков и, как следствие, кавитация становится более интенсивной. С другой стороны, с увеличением температуры повышается давление пара в жидкости и, соответственно, содержание газа в пузырьках, что приводит к уменьшению силы захлопывания пузырьков. Наличие этих двух противоположных по своему действию факторов предполагает необходимость определения оптимальной температуры, при которой достигается максимальная интенсивность кавитации [258]. В условиях данных экспериментов следует считать, что такой оптимальной температурой, при которой обеспечивается наилучшая очистка, является температура 25 °С.

Процесс УЗ очистки можно описать, используя уравнение кинетики реакции первого порядка:

$$-\frac{dC}{dt} = kC, \quad (8.1)$$

где  $C$  – концентрация;  $t$  – время;  $k$  – константа скорости процесса очистки [257].

При интегрировании уравнение (1) принимает следующий вид:

$$-\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = kt. \quad (8.2)$$

Таким образом, согласно выражению (8.2) зависимость  $\ln C$  от времени представляет собой линейную функцию, наклон которой соответствует значению  $k$ , как показано на рис. 8.3 [257].

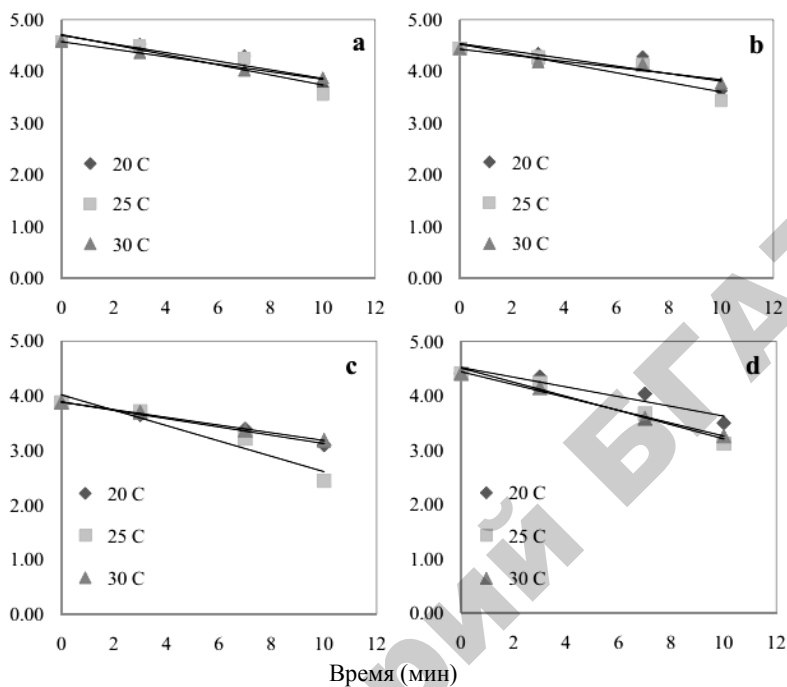


Рис. 8.3. Кинетика первого порядка уменьшения остатков пестицидов в результате УЗ очистки: *a* – кориандра; *b* – капусты; *c* – спаржевой фасоли; *d* – красного перца

Влияние температуры можно описать с помощью уравнения Аррениуса

$$k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (8.3)$$

где  $k_0$  – константа;  $E_a$  – энергия активации;  $R$  – газовая константа;  $T$  – абсолютная температура (K).

При построении кривой зависимости  $\ln k$  от  $1/T$  (1/K) получаем линейную функцию, наклон которой соответствует  $-E_a/R$ . Кроме того, из зависимости  $\log C$  от  $t$  может быть определено время десятичного уменьшения ( $D$ ), как показано в табл. 8.5 [257].

Таблица 8.5

Влияние УЗ очистки на константу скорости процесса очистки ( $k$ ), время десятичного уменьшения остатков пестицидов ( $D$ ) и энергию активации процесса очистки ( $E_a$ ) для четырех видов овощей

Овощи	$D$ (мин)			$k \times 10^3$ (с <sup>-1</sup> )			$E_a \times 10^{-3}$ (кал/моль)
	20 °С	25 °С	30 °С	20°С	25 °С	30 °С	
Кориандр	26.2	22.3	32.6	1.38	1.62	1.20	2.462
Капуста листовая	28.2	22.8	34.6	1.20	1.53	0.98	3.443
Спаржевые бобы	29.6	16.1	33.4	1.27	2.33	1.17	1.322
Красный перец чили	25.2	17.8	20.0	1.48	2.17	1.97	5.021

Константа скорости процесса ( $k$ ) определяется по наклону кривой зависимости (2). Большое значение  $k$  означает, что скорость уменьшения остатков пестицидов велика. Время десятичного уменьшения ( $D$ ) означает время (в мин), потраченное для того, чтобы удалить 90 % остатков пестицидов за счет УЗ очистки (за это время количество оставшихся пестицидов уменьшается в 10 раз). Чем меньше  $D$ , тем лучше очистка, поскольку остатки пестицидов удаляются быстрее. При этом энергия активации реакции ( $E_a$ ) указывает, что температура влияет на скорость очистки.

Из табл. 8.5 можно видеть, что остатки пестицидов наиболее сильно уменьшаются при температуре 25 °С, которой соответствуют самое низкое  $D$  и самое высокое  $k$  для четырех видов овощей. Величины  $D$  и  $k$  при 25 °С показывают, что уменьшение остатков пестицидов в фасоли больше, чем в перце, кориандре и капусте, соответственно. Это можно объяснить тем, что грубая поверхность фасоли способствует развитию кавитационных пузырьков в противоположность гладкой поверхности перца, а также сложной структуре (ветви и листья) кориандра и капусты, которые трудно поддаются очистке.

Обработка овощей без ультразвука, т. е. обычное вымачивание в воде приводит к уменьшению остатков пестицидов на поверхности кориандра, капусты, фасоли и перца до 27, 29, 48 и 65 %, соответственно. При этом температура выдержки в воде почти не оказывает влияния на очистку, однако время выдержки влияет довольно существенно: чем дольше овощи выдерживаются в воде, тем больше удаляются остатки пестицидов, как показано на рис. 8.4 [257].

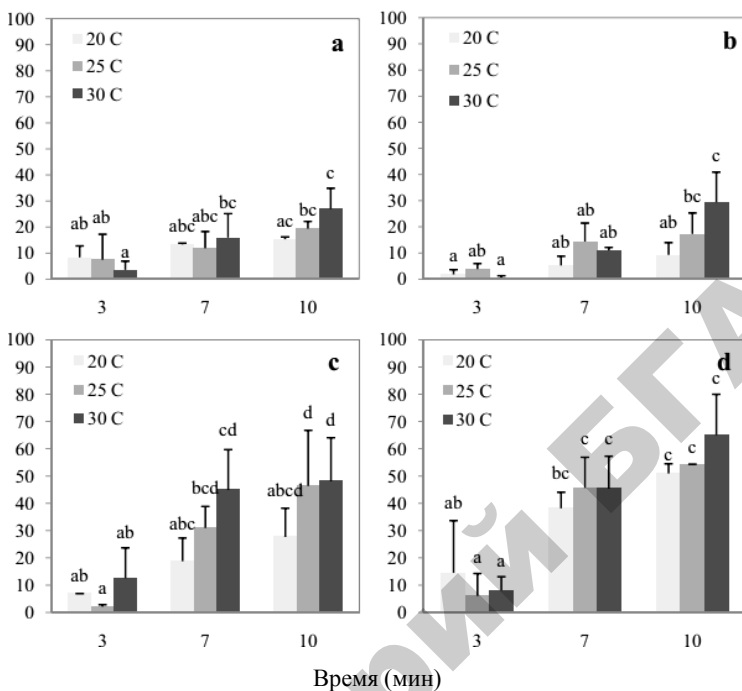


Рис. 8.4. Процентное уменьшение ингибирования ферментов при различных температурах в сравнении с начальным ингибированием (перед очисткой) в зависимости от времени очистки путем вымачивания в воде: *a* – кориандр; *b* – капуста; *c* – спаржевая фасоль; *d* – красный перец

На рис. 8.5 [257] показано изменение во времени константы скорости процесса очистки  $k$  для случая, когда она осуществляется без ультразвука. Значения кинетических параметров для очистки без ультразвука показаны в табл. 8.6 [257].

Как видно из таблицы, температура 30 °С является оптимальной для очистки, потому что с повышением температуры уменьшается вязкость воды и усиливается удаление остатков пестицидов. Значения  $D$  и  $k$  при 30 °С показывают уменьшение остатков пестицидов в перце больше, чем в фасоли, капусте и кориандре, соответственно, что обусловлено различиями в характере поверхности и форме разных видов овощей. Гладкая поверхность и простая форма перца позволяют остаткам пестицидов, а также почвенным загрязнениям удаляться более легко, нежели сложная форма, как в капусте и кориандре. Удаление

остатков пестицидов затруднено для фасоли, характеризующейся наличием нерегулярных поверхностей. Высокая величина  $E_A$  для капусты указывает, что требуется высокая энергия активации для очистки, и влияние температуры на очистку значительно.

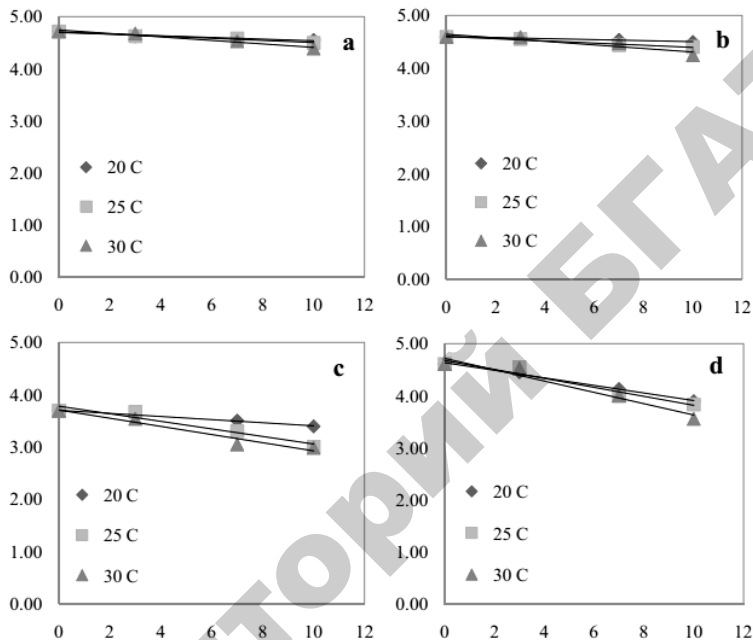


Рис. 8.5. Кинетика первого порядка уменьшения остатков пестицидов в результате вымачивания в воде: *a* – кориандра; *b* – капусты; *c* – спаржевой фасоли; *d* – красного перца

### Особенности очистки огурцов

Огурцы восприимчивы к насекомым и болезням, поэтому они довольно широко изучены в связи с присутствием на них остатков пестицидов. В основном на огурцах сохраняются остатки органофосфорных пестицидов [259, 260]. Как отмечалось выше, высокотемпературная кулинарная обработка приводит к значительному сокращению остатков пестицидов в пищевых продуктах, но поскольку огурцы чаще всего употребляют в сыром виде, в салатах и холодных супах, то необходимы иные методы обработки огурцов, способные эффективно удалять пестициды с их поверхности.

Эксперименты показывают, что УЗ очистка овощей позволяет уменьшить остатки пестицидов в большей степени, чем очистка вымачиванием в воде. Температура значительно влияет на УЗ очистку и слабо влияет на замачивание в воде. Значения  $D$ ,  $k$  и  $E_a$  показывают, что 25 °С для УЗ очистки и 30 °С для очистки вымачиванием в воде являются оптимальными температурами.

В работе [51] исследовалось влияние мойки водопроводной водой и различными моющими растворами, а также УЗ обработки на уровни остатков на поверхности сырых огурцов органофосфорных пестицидов: хлорофоса, диметоата, дихлофоса, фенитроциона и хлорпирифоса.

Таблица 8.6

Влияние замачивания овощей в воде на константу скорости процесса очистки ( $k$ ), время десятичного уменьшения остатков пестицидов ( $D$ ) и энергию активации процесса очистки ( $E_a$ ) для четырех видов овощей

Овощи	$D$ (мин)			$k \times 10^3$ (с <sup>-1</sup> )			$E_a \times 10^{-3}$ (кал/моль)
	20 °С	25 °С	30 °С	20 °С	25 °С	30 °С	
Кориандр	139.3	104.6	70.2	0.27	0.33	0.48	10.473
Капуста листовая	237.3	121.2	66.2	0.15	0.33	0.55	22.948
Спаржевые бобы	76.9	33.3	32.4	0.50	1.20	1.30	16.931
Красный перец чили	32.3	29.7	21.9	1.20	1.42	1.80	7.143

Свежие зубчатые огурцы были собраны с экспериментальных участков без предварительного применения пестицидов. Их сохраняли при температуре 4 °С и анализировали не позднее 24 ч после сбора. Для загрязнения поверхности огурцов пестицидами 10 мл исходного стандартного раствора пестицидов каждого вида растворяли в водопроводной воде до концентрации 1000 мг/л. 500 г свежих огурцов погружали в полученный раствор и выдерживали в нем в течение 50 мин, пока количество пестицидов не увеличится до определенного уровня. Загрязненные пестицидами огурцы высушивали на воздухе в вытяжном шкафу.

Все виды обработки огурцов проводили в течение 5, 10 или 20 мин. В качестве моющих средств использовали различные по концентрации растворы поваренной соли, уксусной кислоты, карбоната натрия и бикарбоната натрия.

Мойка водопроводной водой и моющими растворами способствовала удалению пестицидов. Однако мойка водопроводной водой была менее эффективной. Так, при ее использовании в течение 20 мин уменьшение остатков хлорофоса, диметоата, дихлофоса, фенитротиона и хлорпирифоса составляло 53,7 %, 32,6 %, 52,4 %, 26,7 % и 62,9 %, соответственно. Среди моющих растворов 5%-ный раствор карбоната натрия вызывал самую большую потерю хлорофоса и диметоата: 97,6 % и 78,3 %, соответственно; 5%-ный раствор бикарбоната натрия вызвал самую большую потерю дихлофоса, фенитротиона и хлорпирифоса – 98,8 %, 66,7 % и 85,2 %, соответственно. Таким образом, мойка растворами карбоната натрия и бикарбоната натрия является вполне приемлемым способом удаления органофосфорных пестицидов. Кроме того, для удаления дихлофоса вполне подходит раствор уксусной кислоты. Удаление пестицидов увеличивалось с повышением концентрации моющих растворов, а также длительности обработки.

Подобное влияние обработки овощей моющими растворами на удаление остатков пестицидов наблюдалось в других работах. Так, было установлено, что мойка раствором уксусной кислоты обеспечивает высокую степень очистки перца от остатков профенофоса [120]. Также было показано, что органофосфорные пестициды (пиримифос метил, малатион, профенофос) удаляются кислыми, нейтральными и щелочными растворами эффективнее, чем органохлористые пестициды [261].

Влияние УЗ обработки огурцов на удаление остатков пестицидов показано в табл. 8.7 [261]. Уменьшение остатков пестицидов увеличивалось со временем обработки. УЗ очистка в течение 20 мин вызывала более значительное уменьшение остатков хлорофоса, диметоата и особенно фенитротиона, чем мойка водопроводной водой: уменьшение остатков составляло 82,9 %, 52,5 % и 84,4 %, соответственно. Уменьшение остатков дихлофоса и хлорпирифоса при использовании УЗ очистки не отличалось от результатов, полученных в процессе мойки водопроводной водой.



Таблица 8.7

Влияние УЗ обработки на удаление остатков пестицидов в огурцах

Пестицид	Время					
	5 мин		10 мин		20 мин	
	Концентрация*	Уменьшение (%)	Концентрация*	Уменьшение (%)	Концентрация*	Уменьшение (%)
Trichlorfon	0.26± 0.045	36.6	0.16± 0.046	61.0	0.07± 0.025	82.9
Dimethoate	0.26± 0.052	43.5	0.24± 0.013	47.8	0.22± 0.033	52.2
Dichlorvos	0.70± 0.023	16.7	0.66± 0.043	21.4	0.59± 0.013	49.8
Fetitrothion	0.12± 0.056	73.3	0.10± 0.045	77.8	0.07± 0.025	84.4
Chlorpyrifos	0.38± 0.064	53.1	0.33± 0.056	59.3	0.30± 0.023	63.0

\*Среднее значение концентрации ( $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ )

### Особенности очистки мандаринов

Основными вредителями мандаринов являются листоблошка (*Diaphorina citri* Kuwayama: Psyllidae), тля (*Toxoptera sp.*), трипс (*Scirtothrips dorsalis* Hood: Thripidae) и красный клещ (*Eutetranychus africanus* Tucker: Tetranychidae). Эти вредители питаются мандаринами и распространяют болезни, которые портят внешний вид фруктов. Для борьбы с ними необходимо регулярно применять в больших количествах пестициды – практически каждую неделю, даже во время сбора урожая.

Одним из распространенных инсектицидов, используемых при выращивании мандаринов, является этион – органофосфатный пестицид, способный поражать тлю, клещей, трипсов и других насекомых-вредителей, ингибируя ферменты группы холинэстеразы в их нервной системе. Однако этион оставляет остатки на поверхности плодов, а иногда поглощается растительными тканями. Имеются сообщения о том, что мандарины могут содержать остатки этиона

с концентрацией выше максимально допустимого уровня (Maximum Residue Limits, MRL), равного 1 мг/кг.

В работе [262] исследовалась эффективность удаления остатков этиона с поверхности мандаринов путем их обработки ультразвуком и озоном. В экспериментах использовалась УЗ моечная установка, которая содержала ванну объемом 55 л, снабженную восемью преобразователями (частота 1000 кГц, мощность 24 Вт). Образцы мандаринов обрабатывали этионом в течение одного дня перед уборкой урожая. Фрукты погружали в дистиллированную воду и подвергали мойке в условиях воздействий ультразвука и озона, как в отдельности, так и совместно. Кроме того, контрольные образцы подвергали обычной мойке в дистиллированной воде. Изменение количества остатков этиона определяли газовым хроматографом, оснащенный пламенно-фотометрическим детектором.

Результаты экспериментов (рис. 8.6) [262] показали, что наиболее эффективной была 60-минутная совместная обработка ультразвуком и озоном. После этой обработки остатки этиона имели самый низкий уровень, равный 0,03 ppm, что соответствовало приблизительно 73 % удаленного вещества. После обработки ультразвуком или озоном в отдельности, а тем более после обычной мойки эффективность удаления остатков этиона была значительно меньше. Это можно объяснить тем, что совместное воздействие ультразвука и озона вызывает образование радикалов  $\bullet\text{OH}$ , которые эффективно разрушают остатки этиона на поверхности мандарина.

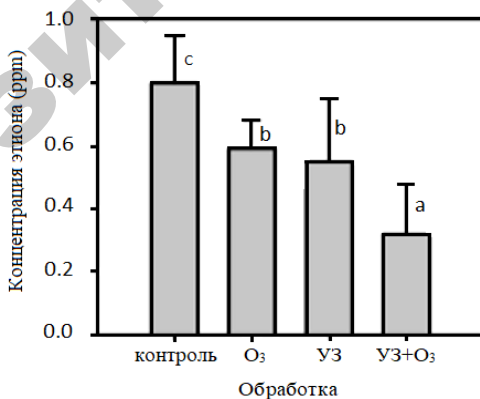


Рис. 8.6. Уменьшение остатков этиона на мандаринах после обработки ультразвуком и озоном

## Особенности очистки земляники

Земляника играет важную роль в человеческом питании и поэтому выращивается в промышленных масштабах. Земляника обладает низкой калорийностью (32 кал/100 г) и жирностью и вместе с тем является богатым источником полезных для здоровья растительных питательных веществ, минералов и витаминов. Кроме того, земляника содержит большое количество фенольных фитохимических соединений типа антоциана и эллаговой кислоты. Исследования показывают, что употребление этих ягод способствует предотвращению рака, старения, воспалительных и неврологических заболеваний [263, 264]. Свежие ягоды земляники являются превосходным источником витамина С, а также витаминов А, Е и В.

Однако в течение очень короткого времени плодоношения земляника оказывается восприимчивой к некоторым грибковым болезням (*Botrytis cinerea* Pers, *Mycosphaerella fragariae*, *Erysiphales* и др.) и насекомым-вредителям (*Otiorhynchus* spp., *Anthonomus rubi* и др.). Поэтому при ее выращивании широко используются фунгициды и инсектициды. Пестициды общего действия абсорбируются листьями, стеблями или корнями и затем транспортируются по сосудистой системе растения. Контактные пестициды осаждаются на поверхность растений и действуют на вредителей при непосредственном контакте.

В ряде работ сообщалось о присутствии остатков различных типов пестицидов на землянике, иногда выше разрешенных максимальных остаточных уровней, и их негативном влиянии на здоровье человека [265, 266]. Поэтому является актуальной разработка эффективных методов устранения пестицидов с земляники.

Ниже описаны выполнявшиеся в работе [53] исследования влияния мойки водопроводной и озонированной водой, УЗ очистки и кипячения на удаление с поверхности земляники остатков различных пестицидов. Всего рассмотрено 16 видов пестицидов, в том числе 10 фунгицидов (боскалид, бапиримат, ципродинил, фенгексамид, флудиоксонил, фолпет, ипродион, пираклостробин, тетраконазол и трифлукситробин) и 6 инсектицидов (ацетамиприд, альфа-циперметрин, хлорпирифос, делтаметрин, лямбда-цигалотрин и пиримикарб). Выбранные виды пестицидов наиболее часто обнаруживаются в землянике.

Земляника (разновидность Senga Sengana) собиралась на открытом экспериментальном поле, которое предварительно не обрабатывалось пестицидами. Поле было разделено на участки площадью

6 м<sup>2</sup>, на которых применяли указанные выше фунгициды и инсектициды (каждое средство защиты растений на одном участке).

Земляника опылялась на растениях на начальной стадии созревания, средства защиты растений применялись дважды в рекомендованных дозах. Образцы земляники после опыления собирали произвольным образом, упаковывали в полиэтиленовые мешки и транспортировали в охлажденных условиях в лабораторию, где их сохраняли в холодильнике при температуре 4 °С до анализа, который проводили на следующий день.

Приблизительно с 10 кг образцов, взятых с каждого участка, отделяли четыре представительных аналитических пробы (приблизительно по 2,5 кг каждая). Для уменьшения фактора вариабельности образцы выбирали произвольным образом, каждую обработку выполняли трижды. Процедура обработки и план взятия проб показаны на рис. 8.7 [53].

Как показано на рисунке, каждая аналитическая проба разделялась на две части. Одна часть (0,5 кг) не подверглась никакой обработке (необработанные образцы). Эту часть пробы гомогенизировали в блендере и замораживали (-20 °С) до проведения анализа. Другую часть (оставшиеся 2 кг) разделяли на 200-граммовые образцы и обрабатывали в течение 1, 2 или 5 мин. После обработки образцы сушили воздухом в течение 5 мин, после чего также замораживали до проведения анализа.

Земляника, не подвергавшаяся никакой обработке, использовалась для определения начальной концентрации пестицидов, которая была важна для оценки факторов обработки.

Условия мойки водопроводной водой: образцы массой 200 г промывали хлорированной водопроводной водой (20 °С, 0,1 мг Cl<sub>2</sub>/л) путем погружения в нее. Условия мойки озонированной водой: озон генерировался озоновым генератором со скоростью потока 1 л/мин (максимальное количество озона, которое могло быть растворено при этих условиях, составляло 1 мг O<sub>3</sub>/л); образцы массой 200 г погружали в озонированную воду (20 °С, 1 мг O<sub>3</sub>/литр). Условия УЗ очистки: образцы массой 200 г помещали в корзину из нержавеющей стали, заливали 1 л водопроводной воды и очищали в ультразвуковой ванне (частота 40 кГц). Условия кипячения: образцы массой 200 г помещали в корзину из нержавеющей стали и погружали в 1 л кипящей воды (100 °С). Все виды обработки выполняли в течение 1, 2 и 5 мин.

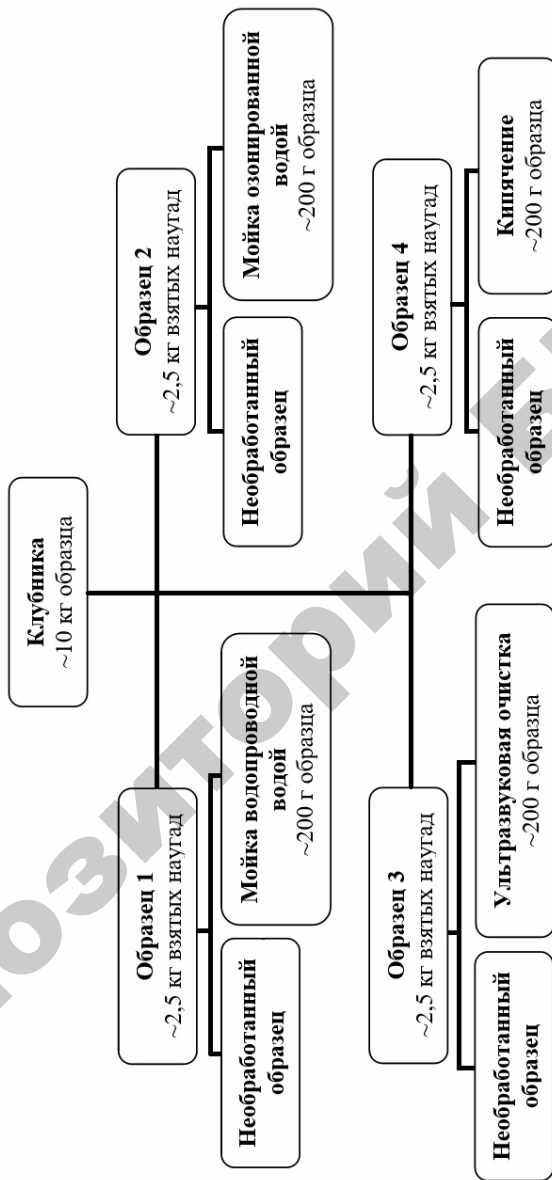


Рис. 8.7. Схема отбора и обработки образцов земляники

Факторы обработки вычисляли для всех видов обработки по формуле

$$\Phi = \frac{C}{C_0}, \quad (8.4)$$

где  $C$  и  $C_0$  – концентрация остатков пестицидов в обработанном и исходном продукте, соответственно (мг/кг).

Как показали результаты экспериментов, концентрация почти всех видов пестицидов после обработки уменьшалась, что было особенно заметно, когда время обработки увеличивалось до 5 мин. Особенности изменения концентрации остатков фунгицидов и инсектицидов во время обработки рассмотрены ниже для каждого отдельного случая обработки [53].

#### 1. *Мойка водопроводной водой.*

Обработка приводила к разным по величине изменениям концентрации остатков всех пестицидов. Так, после обработки в течение 5 мин остатки бапиримата сократились на 19,8 %, в то время как хлорпирифоса – на 68,1 % ( $\Phi = 0,80$  и  $0,32$ , соответственно). После обработки в течение 5 мин значительно (более чем 50 %) уменьшилась концентрация трех инсектицидов и двух фунгицидов: ацетамиприда, альфа-циперметрина, хлорпирифоса, ципродинила и фенгексамида – на 56,5, 53,4, 68,1, 54,1 и 57,2 %, соответственно.

Эти результаты могут быть объяснены на основании анализа взаимосвязи между физико-химическими свойствами пестицидов, в частности, их растворимостью в воде, и значениями РF. Известно, что полярные, растворимые в воде пестициды, удаляются путем мойки в большей мере, чем пестициды с низкой полярностью [267]. В рассматриваемых исследованиях для ацетамиприда, характеризующегося сравнительно низкой полярностью и высокой растворимостью в воде,  $\Phi = 0,43$ , в отличие от делтаметрина, для которого  $\Phi = 0,73$ .

Вместе с тем можно предположить, что высокая растворимость в воде не оказывает решающего влияния на эффективность мойки в каждом конкретном случае, а удаление остатков пестицидов также

зависит от их локализации в растительном материале во время транспирации (выделения из растительного материала). Так, для таких пестицидов, как бапиримат и пиримикарб, значения  $\Phi$  составляли 0,80 и 0,79, соответственно, поскольку они были в меньшей мере транспортированы во внутренние части земляники, несмотря на их высокую растворимость в воде.

## 2. Мойка озонированной водой.

Озон ( $O_3$ ) является одним из самых мощных дезинфицирующих средств, применяемых против широкого спектра микроорганизмов, и наиболее подходит для удаления остатков пестицидов с фруктов и овощей [268]. В рассматриваемом исследовании после 5 мин мойки в озонированной воде остатки тетраконазола были уменьшены на 36,1 % ( $\Phi = 0,64$ ), а хлорпирифоса на 75,1 % ( $\Phi = 0,25$ ). Как и в случае мойки водопроводной водой, самое большое сокращение наблюдалось у хлорпирифоса. Последний является несистемным инсектицидом, он действует тогда, когда входит в прямой контакт с растительными тканями и не транспортируется в другие части растения, поэтому его можно удалить сравнительно легко. Напротив, системные инсектициды, такие как тетраконазол или бапиримат проникают к более глубоким слоям ткани растения и поэтому удаляются более трудно ( $\Phi = 0,56$  и  $0,64$ , соответственно).

Из сравнения рассмотренных выше результатов следует, что озонированная вода более эффективна для удаления пестицидов, чем водопроводная вода. Это можно объяснить тем, что растворенный озон генерирует гидроксильные радикалы, которые способны вызывать разложение органических молекул, в том числе пестицидов [269, 270].

Кроме того, предполагается, что степень сокращения остатков пестицидов зависит от молекулярного веса каждого из них [53]. Отсюда следует, что мойка озонированной водой более эффективна при удалении пестицидов с более низкой молекулярной массой, таких как боскалид или ацетамиприд ( $M \leq 343,21$  г/моль) (у обоих  $\Phi = 0,37$ ), по сравнению с тетраконазолом ( $M = 372,15$  г/моль) и трифлукситробинном ( $M = 408,37$  г/моль) ( $\Phi = 0,64$  и  $0,56$ , соответственно).

## 3. УЗ очистка.

Остатки пестицидов удаляются в наибольшей степени в результате УЗ обработки, причем сокращение остатков пестицидов становится более значительным с увеличением длительности

обработки. После 5 мин УЗ очистки концентрация альфа-циперметрина снижалась на 91,2 % ( $\Phi = 0,09$ ), в то время как для фенгексамида – на 45,1 % ( $\Phi = 0,55$ ). Существенные сокращения концентрации, выше 70 %, также наблюдались для пираклостробина (на 89,4%), тетраконазола (на 84,5 %) и хлорпирифоса (на 79,1 %) со значениями PF, равными 0,11, 0,15 и 0,21, соответственно.

Предполагается, что эффективность УЗ очистки зависит от способа действия исследуемых пестицидов [53]. Так, несистемные пестициды (альфа-циперметрин, хлорпирифос, делтаметрин, фолпет и ипродион) более легко удалялись ультразвуком ( $\Phi \leq 0,35$ ), по сравнению с бапириматом, ацетамипридом, трифлукситробиноном и ципродинилом ( $0,43 \leq \Phi \leq 0,48$ ), которые имеют системные способы действия.

#### 4. Кипячение.

Высокотемпературная обработка в кипящей воде часто используется для консервирования земляники. Обработка кипячением приводит к значительному уменьшению концентрации пестицидов. Кипячение в течение 5 мин вызвало гораздо большее сокращение остатков пестицидов, чем обычная мойка. Самое высокое сокращение во время этой обработки наблюдалось для пираклостробина (92,9 %,  $\Phi = 0,07$ ), самое низкое – для ципродинила (42,8 %,  $\Phi = 0,57$ ).

Вместе с тем, как показали результаты обработки кипячением, концентрации трех инсектицидов пиретроидного класса (альфа-циперметрина, делтаметрина и лямбда-цигалотрина) увеличились и для них, соответственно, имели место значения  $\Phi > 1$ . Это можно объяснить тем, что концентрация пестицидов увеличивалась по мере выпаривания воды из земляники во время кипения [271]. Подобные результаты были получены в работе [272], где было обнаружено, что кипячение не уменьшает остатки пестицидов в яблоках.

Особенности влияния кипячения на пестициды также могут быть объяснены тем, что хорошо растворимые в воде пестициды, такие как пиримикарб и ацетамиприд, удалялись весьма значительно, в отличие от альфа-циперметрина, делтаметрина и лямбда-цигалотрина, обладающих низкой растворимостью [53].

Удаление остатков пестицидов во время кипячения может происходить и из-за их разложения в результате повышения температуры. Нагревание может вызывать испарение, гидролиз или другие формы деградации и таким образом снижать уровни остатков пестицидов [267].



Таким образом, результаты выполненных исследований показали, что рассмотренные методы обработки земляники в той или иной мере приводят к удалению остатков пестицидов. Из них самой высокой эффективностью характеризуется УЗ обработка, обеспечивающая наиболее полное удаление остатков всех исследованных видов пестицидов.

### 8.3. Очистка от загрязнений насекомыми-вредителями

Экспериментальные исследования показывают, что УЗ обработка пищевых продуктов способствует удалению насекомых-вредителей. Так, ультразвук убивает личинки уксусной мухи [157], а также разрывает хромосомы у личинок плодовой мушки [158].

В работе [273] исследовалось влияние УЗ обработки на удаление вредителей с поверхности яблок. УЗ обработку проводили с помощью УЗ моечной установки типа ADC 5002 (Branson Cleaning Equipment Co, Shelton, Conn.). Фрукты, поверхность которых была заражена вредителями, обрабатывали в течение различного времени в ванне с дистиллированной водой объемом 2 л. В отдельных экспериментах в ванну вводили водный раствор моющего средства Ultra Dawn (Procter and Gamble; Cincinnati, Ohio) с концентрацией 0,05 мл/л.

УЗ обработке подвергались яблоки сорта Delicious, поверхность которых была заражена следующими насекомыми-вредителями: яблонной плодовой жук (Cydia pomonella), паутинным клещом (Tetranychus urticae), западным цветочным трипсом (Frankliniella occidentalis). Кроме того, обрабатывались яблоки с дикой яблони, поверхность которых была заражена калифорнийской щитовкой (Quadraspidiotus perniciosus).

Заражение яблок яблонной плодовой жук осуществляли с помощью специально выведенных взрослых женских особей насекомых, которые откладывали яйца на яблоках. Когда яйца достигали в своем развитии личинной стадии, их подсчитывали, после чего проводили УЗ обработку в воде в течение 15, 30 или 45 мин. Каждое яблоко обрабатывали отдельно, чтобы препятствовать стиранию яиц с поверхности при соприкосновении фруктов. Общее количество яиц, подвергаемых обработке, варьировалось от 50 до 80.

Обработанные яйца выдерживали при 25 °С в течение недели, затем подсчитывали число выживших яиц.

Заражение ябллок трипсом осуществляли с помощью нимф и взрослых особей насекомых, которых помещали в картонные контейнеры, содержавшие яблоки (по пять ябллок в каждом контейнере), так что насекомые имели возможность распределиться по поверхности ябллок. Каждое зараженное яблоко обрабатывали в отдельности ультразвуком в воде в течение 1, 5, 10 мин или в растворе моющего средства в течение 10 мин. Сразу же после обработки каждое яблоко помещали в отдельный полиэтиленовый пакет и замораживали, а затем на следующий день посчитывали число трипсов, оставшихся в пакете.

Для заражения ябллок клещом специально создавали колонию насекомых, используя рассаду фасоли пинто (*Phaseolus vulgaris*). Ябллки размещали в рассаду, с которой клещи могли переползть на поверхность ябллок. Зараженные клещами ябллки подвергали такой же обработке, что и в случае их заражения трипсами. После обработки ябллки помещали в отдельные пакеты и замораживали. Эффективность обработки определяли путем подсчета числа клещей в пакетах.

Заражение ябллок щитовкой осуществлялось непосредственно на поле, где находились ябллки. Зараженные ябллки делили на пять групп, каждая с примерно одинаковым числом насекомых, и подвергали УЗ обработке в воде в течение 1, 5, 10 мин или в растворе моющего средства в течение 10 мин. Три дня спустя посчитывали число щитовок, оставшихся на ябллках.

Все испытания проводились многократно. В ходе исследований не было выявлено каких-либо повреждений фруктов, которые могли бы быть вызваны ультразвуком, даже при больших длительностях его воздействия. По всей видимости, кавитация, возникавшая в заполненной водой УЗ ванне, не распространялась в эпидерму. Кроме того, не наблюдалось заметного повышения температуры в воде во время УЗ обработки.

Результаты исследований показали, что УЗ обработка является довольно эффективным способом удаления насекомых-вредителей с поверхности фруктов.

Смертность яиц яблонной плодовой гнили (*Cydia pomonella*) была пропорциональна длительности УЗ обработки, наибольшая

смертность доходила до 60 % после 45 мин обработки (рис. 8.8) [273]. Смертность клещей и трипсов также увеличивалась с длительностью УЗ обработки, причем добавление моющих средств в УЗ ванну способствовало повышению эффективности обработки (табл. 8.8) [273]. Вместе с тем УЗ обработка не обеспечивала удаление щитовки, даже при наличии моющих средств (рис. 8.9) [273]. Данное обстоятельство автор работы [273] объясняет тем, что щитовка – уникально структурированные насекомые, и, возможно, кутикула минимизирует эффект кавитации. При этом предполагается, что более мощный ультразвук мог бы удалить щитовку с поверхности фруктов.

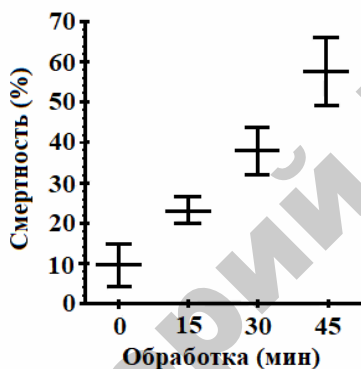


Рис. 8.8. Зависимость смертности личинок яблонной плодовой жоржки на поверхности яблок от продолжительности ультразвуковой обработки в воде

Таблица 8.8

Число живых клещей и трипсов на яблоках после различной по длительности ультразвуковой обработки

Обработка (мин)	Трипсы			Клещи		
	Среднее число	SE*	Репликация	Среднее число	SE*	Репликация
0 (контроль)	38.8	6.6	11	44.0	18.2	7
1	19.6	5.7	11	24.0	8.1	7
5	13.1	2.2	11	19.7	4.8	7
10	8.0	1.8	11	9.7	3.3	7
10 + моющее средство	6.2	1.6	11	1.8	0.3	7

\*SE – стандартная ошибка

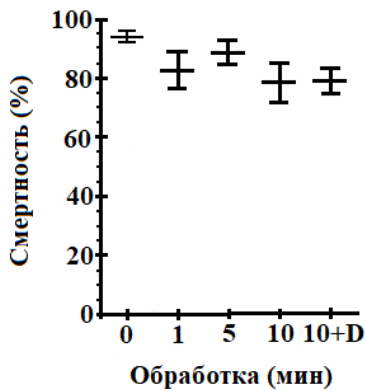


Рис. 8.9. Зависимость смертности личинок яблонной плодовой мушки на поверхности яблок от продолжительности ультразвуковой обработки в воде и моющем средстве (D)

## 9. ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИИ НА КАЧЕСТВО ОЧИЩАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

### 9.1. Качество деталей сельскохозяйственной техники

#### Основные закономерности воздействия кавитации на поверхность деталей

Повышение энергетических и временных параметров УЗ кавитационной очистки способствует более эффективному удалению загрязнений с поверхности металлических деталей. Однако при выборе указанных параметров не следует допускать их чрезмерно больших значений, поскольку сильно развитая кавитация может приводить к разрушению поверхности [18, 130].

В процессе УЗ очистки кавитация начинает оказывать непосредственное воздействие на поверхность сразу же после того, как поверхность очищается от загрязнений. Соответственно, с этого момента возникает опасность кавитационной эрозии металла. Во избежание этого нежелательного явления при осуществлении УЗ очистки металлических деталей следует уделять особое внимание отработке режимов очистки, при необходимости ограничивая кавитационное воздействие на очищенную поверхность путем уменьшения его интенсивности и длительности [18].

При проведении УЗ очистки важно учитывать особенности изменения состояния обрабатываемой поверхности во времени, для того чтобы можно было предпринимать соответствующие меры по предотвращению кавитационной эрозии. В экспериментальной практике о характере влияния кавитации на состояние поверхности образца металла обычно судят по потере его массы вследствие эрозии, а также по изменению микроструктуры и микротвердости [10, 18]. Следовательно, представляет особый интерес исследование кинетических закономерностей изменения указанных параметров.

На рис. 9.1 показана типичная кривая изменения массы  $\Delta G$  образца металла в зависимости от длительности  $\tau$  УЗ кавитационной обработки [18]. На кривой имеется начальный участок длительностью  $\tau_0$  с нулевым значением  $\Delta G$  – это так называемый инкубационный период, наличие которого характерно для большинства металлов, разрушающихся под действием кавитации. В течение этого периода потери

массы практически не происходит, т. е. металл не подвергается эрозии, а энергия кавитации тратится в основном на деформацию и структурные превращения, происходящие в приповерхностном слое. Этот период характеризует сопротивляемость металла кавитационному разрушению. Его величина определяется условиями кавитационной обработки и физико-механическими свойствами обрабатываемого металла и может изменяться в довольно широких диапазонах. Так, для сталей в зависимости от интенсивности кавитации этот период может доходить до десятков минут и даже часов, в то время как для свинца при тех же условиях он может составлять всего лишь несколько секунд [18]. За инкубационным периодом следует период разрушения, который сопровождается потерей массы.

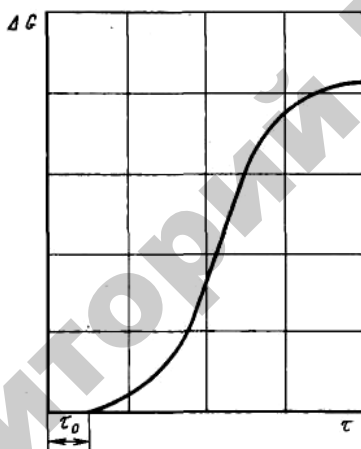


Рис. 9.1. Зависимость изменения массы  $\Delta G$  образца металла от длительности  $\tau$  УЗ кавитационной обработки;  $\tau_0$  – инкубационный период

В работе [274] исследовалось влияние длительности УЗ кавитационной обработки на состояние поверхности стали 12X17, структура которой представляет собой сфероидизированные карбиды в легированной хромом ферритной матрице. Образцы стали подвергали кавитационному воздействию в воде после предварительного шлифования, полирования и травления. На рис. 9.2 показано изменение структуры поверхности под влиянием кавитации, а на рис. 9.3 – изменение микротвердости [274].

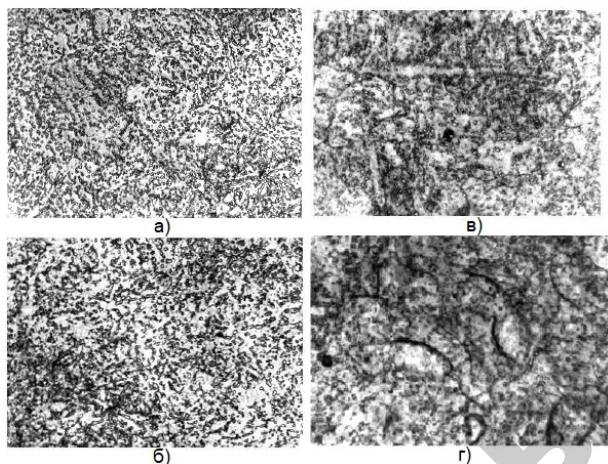


Рис. 9.2. Микроструктура стали ( $\times 2000$ ) 12X17: а – в исходном состоянии; при различной длительности УЗ обработки: б – 30 мин; в – 60 мин; г – 90 мин

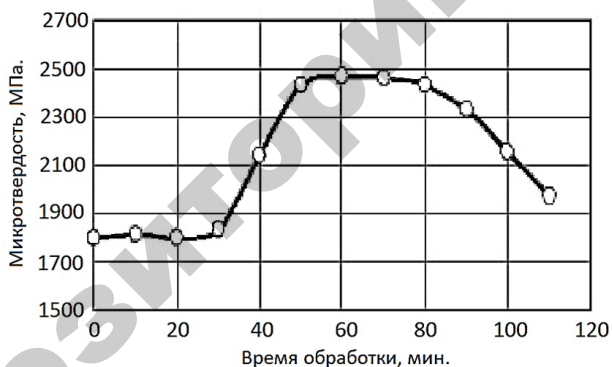


Рис. 9.3. Изменение микротвердости стали 12X17 в зависимости от длительности УЗ обработки

В рамках инкубационного периода можно выделить два временных интервала: 1-й интервал, в пределах которого структура и микротвердость практически не изменяются, и сменяющий его 2-й интервал, в пределах которого происходит деформационное упрочнение, сопровождающееся ростом микротвердости, уширением межфазных границ и проявлением границ ферритных зерен [274].

Далее, по мере продолжения УЗ обработки, упрочнение поверхности сменяется ее разупрочнением, после чего начинается разрушение поверхности. При этом происходит образование глубоких вмятин вследствие пластического течения ферритной основы, причем, в этот процесс вовлекаются и зерна карбидов; одновременно наблюдается падение микротвердости.

В рамках периода разрушения также можно выделить два временных интервала: 1-й интервал, в пределах которого скорость эрозии возрастает, и сменяющий его 2-й интервал, в пределах которого скорость эрозии уменьшается [10]. Кроме того, в ряде исследований отмечается наличие 3-го интервала, характеризующегося стационарной эрозией [10].

Таким образом, процесс изменения состояния поверхности образца металла под действием кавитации носит сложный, многостадийный характер: сначала происходит упрочнение поверхности, затем ее разупрочнение и, наконец, разрушение.

В целях совершенствования технологии УЗ кавитационной очистки особый практический интерес представляет изучение закономерностей изменения структуры и свойств поверхности на стадиях, предшествующих ее разрушению. Учет этих закономерностей важен с точки зрения оптимизации режимов УЗ очистки, а именно: выбора таких режимов, которые обеспечивают, во-первых, удаление загрязнений с очищаемой металлической поверхности без нарушения ее целостности и, во-вторых, повышение ее прочности [275, 276]. Также в практическом отношении представляет интерес изучение особенностей влияния кавитации на шероховатость поверхности [10].

Характер и степень изменения состояния поверхности деталей в процессе УЗ очистки определяются не только интенсивностью и длительностью кавитационных воздействий на обрабатываемую поверхность, но и исходными структурой и свойствами этой поверхности [130, 274, 275]. Кроме того, эти изменения могут зависеть от состава и свойств моющей жидкости [130]. Так, если УЗ очистка осуществляется в воде или иной моющей жидкости, химически не взаимодействующей с материалом детали, то очищаемая поверхность подвергается только кавитационному воздействию. Если же используемая моющая жидкость химически взаимодействует с материалом детали (например, при удалении окисных пленок с металлов), то очищаемая поверхность



подвергается совместным кавитационным и коррозионным воздействиям. При этом разрушение поверхности будет более значительным, чем только лишь при одном кавитационном воздействии.

### **Упрочнение поверхности**

УЗ кавитационное упрочнение представляет собой процесс упрочнения с использованием высокого давления, индуцированного УЗ кавитацией в жидкостях (как правило, в воде) [277]. Ударное давление, вызываемое микроструей, возникающей при захлопывании кавитационного пузырька в процессе УЗ обработки, может достигать довольно больших значений – до 1 ГПа [278]. Такое давление является достаточным для того, чтобы деформировать различные металлические материалы, в том числе стали. При этом остаточные сжимающие напряжения, образующиеся в результате УЗ обработки, подобны тем, которые имеют место при дробеструйной обработке. Эта обработка является эффективным способом повышения усталостной прочности металлов, однако она приводит к ухудшению микрорельефа поверхности, которая покрывается многочисленными лунками, образующимися в результате ударов дроби. Кроме того, эти удары вызывают дефекты в приповерхностном слое. Преимущество кавитационной обработки по сравнению с дробеструйной обработкой состоит в том, что она позволяет повысить усталостную прочность путем создания остаточных сжимающих напряжений без образования поверхностных дефектов [278]. Кавитационную обработку особенно эффективно использовать для мелких деталей.

В работе [277] изучалось УЗ кавитационное упрочнение поверхности образцов из нержавеющей стали 304 и никелевого сплава 200 (с пределом текучести 207–276 МПа и около 83 МПа, соответственно). Схема экспериментальной установки показана на рис. 9.4. Испытуемые образцы (предварительно отполированные) погружали в воду и подвергали воздействию ультразвука с частотой 20 кГц. Титановый излучатель стержневого типа имел длину 121 мм и диаметр 19 мм. Зазор между нижней торцевой частью излучателя и обрабатываемой поверхностью образца (где могла возникать кавитация) составлял 1 мм. Амплитуда вибраций излучателя регулировалась от 20 % до 100 % ее максимального значения, равного приблизительно 20 мкм. В ходе экспериментов определяли влияние обработки на микротвердость (по Виккерсу) поверхности образцов.

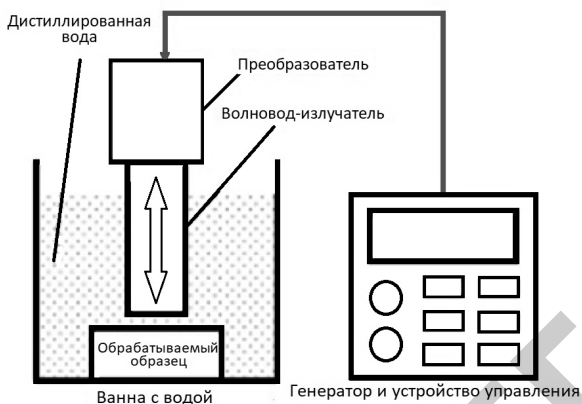


Рис. 9.4. Схема экспериментальной установки

На рис. 9.5 показаны значения твердости для образцов из нержавеющей стали после обработки в течение 10 мин с различными амплитудами вибраций излучателя (значение амплитуды 0 соответствует необработанным образцам, у которых твердость поверхности была около 227 HV). Измерения твердости проводили в пределах обработанных участков поверхности (на расстоянии не менее 1 мм от границ участков). Твердость заметно увеличивалась в результате обработки, когда амплитуда вибраций излучателя превышала 6 мкм. Дальнейший рост амплитуды вибраций приводил к еще более сильному увеличению твердости, что обусловлено развитием кавитации. Так, твердость образцов, обработанных при амплитуде вибраций 20 мкм, повышалась до 269 HV, что на 18 % выше, чем твердость необработанных образцов.



Рис. 9.5. Твердость образцов из нержавеющей стали после УЗ кавитационного упрочнения в течение 10 мин с различными амплитудами вибраций излучателя

На рис. 9.6 показаны значения твердости образцов из никелевого сплава (меньшее время обработки 3 мин было выбрано из-за более низкого предела текучести образцов из никелевого сплава по сравнению с образцами из нержавеющей стали). Необработанные образцы имели твердость 116  $HV$ , в то время как твердость обработанных образцов при амплитуде вибраций 20 мкм достигала 154  $HV$ , т. е. повышалась на 32 %.

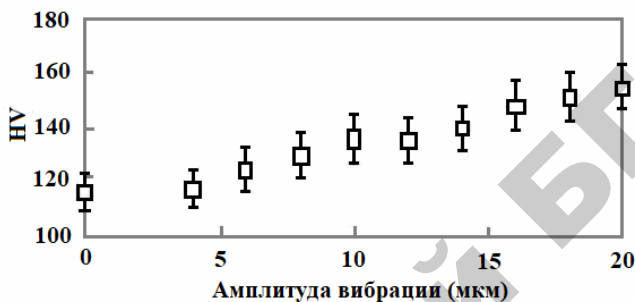


Рис. 9.6. Твердость образцов из никелевого сплава после УЗ кавитационного упрочнения в течение 3 мин с различными амплитудами вибраций излучателя

Аналогичная рассмотренной выше методика испытаний была использована в работе [275] при исследовании влияния УЗ обработки на структуру и твердость армко-железа, сталей 45, 40Х и 10Х18Н9. В рабочую емкость с водой погружали стержневой магнитострикционный преобразователь, работающий с частотой 22 кГц. Образцы цилиндрической формы диаметром 15 мм и высотой 10 мм также погружали в воду и подвергали обработке. Основные параметры обработки: амплитуда вибраций излучателя – варьировалась от 7 до 45 мкм; длительность обработки – минимальная длительность составляла 15 мин (при меньшей длительности видимых изменений в структуре и свойствах не наблюдалось), максимальная длительность – 60 мин (при большей длительности на поверхности появлялись эрозионные кратеры); расстояние от излучателя до обрабатываемой поверхности – для эффективного УЗ поверхностного упрочнения деталь размещали на расстоянии 6–10 мм от излучателя.

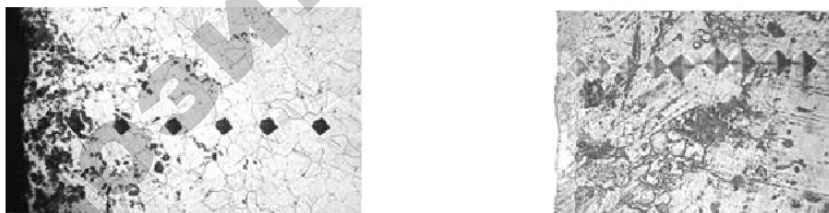
На рис. 9.7 представлены микроструктуры армко-железа и стали 45 после обработки в течение 60 мин с амплитудами вибраций излучателя 7 и 15 мкм [275]. С увеличением амплитуды вибраций

увеличивается интенсивность УЗ воздействия, что приводит не только к формированию приповерхностного слоя с развитой дислокационной структурой, но и к измельчению зерна, в результате чего дополнительно повышается поверхностная твердость испытуемых образцов.



*Рис. 9.7.* Микроструктуры армко-железа (а, б) и стали 45 (в) после УЗ обработки в течение 60 мин при амплитудах вибраций излучателя:  
*а* – 7 мкм; *б*, *в* – 15 мкм

На рис. 9.8 показаны изменения структуры образцов из армко-железа и стали 45, подвергнутых УЗ обработке в течение 30 мин с амплитудами вибраций излучателя 7 и 15 мкм, соответственно [275].



*Рис. 9.8.* Микроструктура образцов из армко-железа (а) и стали 45 (б) после УЗ обработки в течение 30 мин при амплитудах вибраций излучателя:  
*а* – 7 мкм; *б* – 15 мкм

На рис. 9.9 показан характер влияния амплитуды вибраций излучателя и длительности обработки на толщину упрочненного слоя образцов из армко-железа и стали 40Х [275].

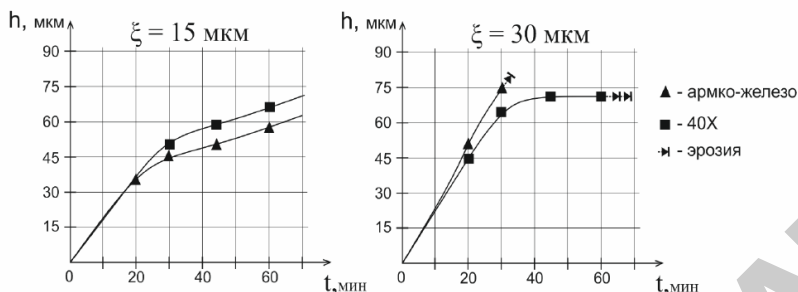


Рис. 9.9. Влияние амплитуды вибраций излучателя ( $\xi$ ) и длительности ультразвуковой обработки на толщину упрочненного слоя армко-железа – ▲ и стали 40X – ■

Согласно экспериментальным данным максимальная толщина упрочнения без нарушения целостности поверхности обеспечивается для образцов из армко-железа и стали 10X18Н9 через 30 мин УЗ обработки и достигает 70 мкм [275]. Длительность УЗ обработки, необходимая для получения упрочненного слоя такой же толщины для образцов из сталей 45 и 40X, составляет 40–45 мин.

По результатам экспериментальных исследований, выполненных в работе [276], определены предпочтительные режимы УЗ обработки, обеспечивающие наибольшее упрочнение без нарушения целостности поверхности образцов из разных материалов. Так, для сталей с ферритной и аустенитной структурой рекомендовано проводить обработку с амплитудой вибраций излучателя 7–30 мкм и длительностью обработки 15–30 мин, для сталей с перлитной структурой – с амплитудой вибраций излучателя 15–50 мкм и длительностью 30–60 мин. УЗ обработка сталей с использованием предложенных режимов вызывает повышение микротвердости поверхностного слоя в 1,3–1,5 раза.

На рис. 9.10 приведены значения микротвердости для образцов из армко-железа, сталей 10X18Н9, 45, 40X до и после УЗ обработки [276]. Как видно из представленных на рисунке данных, степень упрочнения существенно зависит от структуры стали. Так, наибольшее упрочнение достигается в сталях с аустенитной структурой, в меньшей мере – с ферритной, а в сталях с перлитной структурой степень упрочнения зависит от содержания углерода: чем больше содержание углерода в стали, тем меньше увеличение твердости в приповерхностном слое обрабатываемой стали.

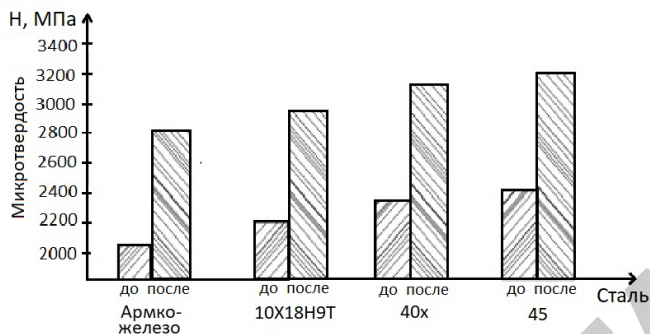


Рис. 9.10. Влияние УЗ обработки на повышение микротвердости приповерхностного слоя сталей

В работе [278] изучался процесс УЗ кавитационного упрочнения поверхности плоской пластины из нержавеющей стали (SUS304) с поперечными размерами 120×100 мм и толщиной 3 мм. Схема экспериментальной установки показана на рис. 9.11.

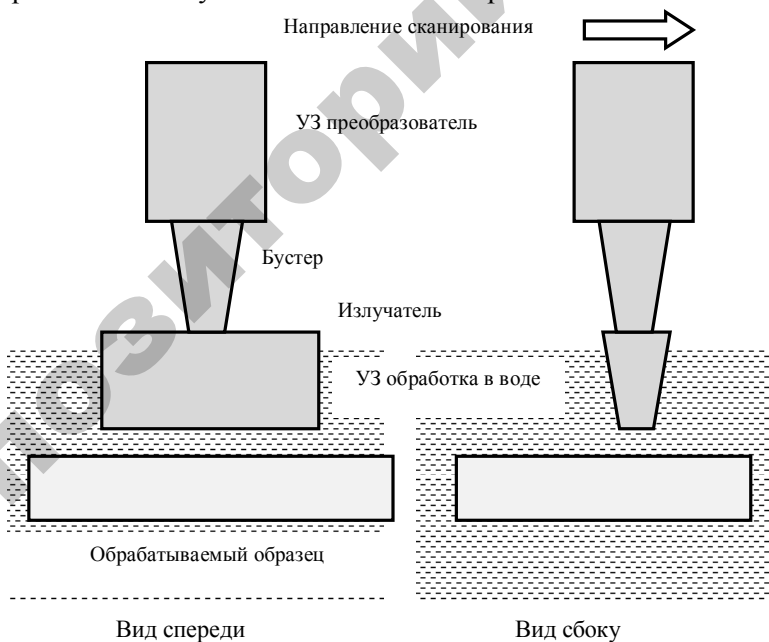


Рис. 9.11. Схема экспериментальной установки

Поверхность неподвижно закрепленной пластины обрабатывалась ультразвуком на частоте 19,5 кГц с помощью сканирующего излучателя блочного типа (рис. 9.12). Размеры обрабатываемого участка поверхности составляли 92 мм (ширина – соответствует ширине излучателя) и 100 мм (длина – соответствует длине пути сканирования). Обработка велась в воде при температуре 25 °С.



Рис. 9.12. Излучатель блочного типа

На рис. 9.13 представлено распределение остаточного напряжения на поверхности двух обработанных пластин – А и В. Пластина А обрабатывалась в течение одного прохода со скоростью сканирования 6 мм/мин, пластина В – в течение 2 проходов со скоростью сканирования 12 мм/мин. Условия обработки пластин были равнозначными, поскольку среднее время их обработки было одинаковым.

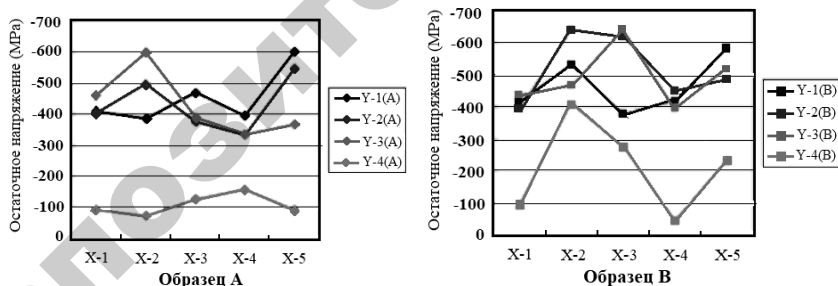


Рис. 9.13. Распределение остаточного напряжения на поверхности обработанного участка пластины

В пределах обработанного участка остаточное сжимающее напряжение увеличивалось гораздо больше, чем на необработанной поверхности, где оно составляло 20 МПа. Однако значение сжимающего

напряжения в некоторых точках измерения вдоль направления «У-4» было ниже, чем в других точках. Это объясняется тем, что точки измерения вдоль направления «У-4» расположены вблизи границы обрабатываемого участка, где кавитация может быть неустойчивой. Распределение остаточных сжимающих напряжений в разных точках измерения (за исключением направления «У-4») было немного неоднородным, при этом значения напряжения для всех точек превышало - 350 МПа, а для некоторых из них было более - 600 МПа.

Таким образом, УЗ кавитационная обработка металлических поверхностей позволяет давать существенный упрочняющий эффект, благодаря чему она находит применение в практике поверхностного упрочнения деталей машин. Так, УЗ кавитационное упрочнение дисков и лопаток компрессоров из титановых сплавов получило широкое использование на Запорожском заводе «Мотор Сич» [276]. Усталостная прочность лопаток, упрочненных таким способом, повышается на 25–30 %.

### **Разрушение поверхности и изменение ее шероховатости**

Процесс кавитационного разрушения поверхности образца металла начинается после того как пластические деформации, развивающиеся в его приповерхностном слое, превысят некоторое критическое значение. Этот процесс включает зарождение поверхностных трещин и их последующее распространение через все сечение образца металла [10, 274, 276]. Трещины могут проходить как по телу зерна – транскристаллитное разрушение, так и по границам между зернами – интеркристаллитное разрушение.

Основные механизмы кавитационного разрушения связаны с действием кумулятивных струй и ударных волн, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков [10].

Зона максимальных напряжений, которая формируется в результате кавитационных воздействий, может быть соизмерима с размерами зерен отдельных структурных составляющих металла [130]. Возникающие в этой зоне напряжения могут достигать довольно высокого уровня, превышающего предел текучести металла. В результате наименее стойкие к кавитационным воздействиям структурные составляющие начинают разрушаться, и на поверхности обрабатываемого образца металла появляются очаги эрозии. По-



явление этих очагов на тех или иных участках поверхности зависит от интенсивности кавитационного воздействия и кавитационной стойкости металла на этих участках. При этом следует учитывать, что кавитационная стойкость может быть неодинакова на разных участках образца металла в силу объемной неоднородности его структуры. Кроме того, она может быть неодинакова у металлов разных типов, поэтому необходимо предпринимать специальные меры по снижению опасности разрушения деталей, изготовленных из металлов с малой кавитационной стойкостью, например, из алюминия, магния или меди.

Степень разрушающего действия кавитации на поверхность деталей зависит от амплитуды  $\zeta$  колебаний излучателя, а также расстояния  $L$  от излучателя [18]. Так, на частоте колебаний 22 кГц увеличение  $\zeta$  приводит к увеличению и суммарной эрозии, и эрозии в ближней зоне, прилегающей к излучателю, причем по мере увеличения  $\zeta$  доля эрозии в ближней зоне увеличивается и при  $\zeta = 50\text{--}60$  мкм достигает 80–85 % от величины суммарной эрозии. При расположении испытуемого образца на близком расстоянии от излучателя (0,5 мм) увеличение интенсивности эрозионного воздействия наблюдается во всем интервале исследуемых амплитуд колебательных смещений, вплоть до  $\xi = 60$  мкм. По мере удаления образца от излучателя наблюдается появление максимума зависимости массового съема материала от амплитуды колебаний излучателя, что связано с образованием зоны с высоким уровнем поглощения звука в кавитационной области с ростом  $\xi$ . Эта зона непосредственно примыкает к излучающей поверхности и практически полностью заполнена кавитационными пузырьками.

Металлографические исследования влияния кавитации на поверхность деталей позволяют выявить четкие границы слоев с различными свойствами (рис. 9.14) [138]. Верхний слой, который непосредственно воспринимает действие кавитации, представляет собой деформированные раздробленные зерна. Второй слой состоит из зерен, которые вытянуты по нормали к поверхности материала. Ниже располагаются деформированные слои. Деформирование и дробление зерен, происходящие в результате кавитационного воздействия, вызывают в поверхностном слое микронапряжения сжатия.

Как правило, кавитационное разрушение поверхности усиливается с увеличением шероховатости поверхности. В тех случаях,

когда кавитационные пузырьки и неровности шероховатой поверхности близки по размеру, микрогеометрию поверхности можно рассматривать как совокупность щелевых зазоров, в которых действие кавитации многократно возрастает. Например, при значениях параметра шероховатости  $Ra < 0,04$  мкм изменение шероховатости резко возрастает, при  $0,04 < Ra < 0,1$  мкм – резко уменьшается (рис. 9.15) [138]. Дальнейшее увеличение  $Ra$  ведет к постепенному росту изменения шероховатости. Влияние шероховатости поверхности на степень кавитационного разрушения обусловлено особыми условиями развития кавитации вблизи шероховатой поверхности [3].

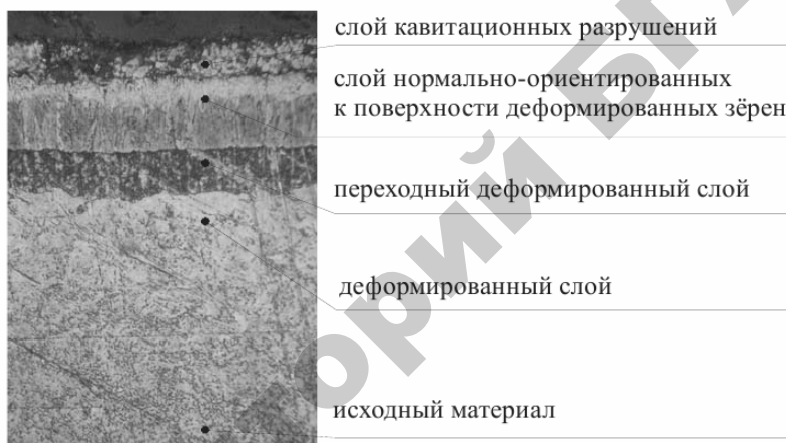


Рис. 9.14. Структура материала после кавитационной обработки

Шероховатость поверхности, с одной стороны, влияет на характер кавитационного воздействия на поверхность, а с другой – сама зависит от условий этого воздействия. На рис. 9.16 показано изменение шероховатости поверхности в зависимости от амплитуды  $\xi$  колебаний излучателя, на рис. 9.17 – в зависимости от расстояния  $L$  от излучателя, а на рис. 9.18 – в зависимости от длительности УЗ обработки [10]. Как видно из рисунков, максимальное изменение шероховатости происходит при  $\xi = 12\text{--}15$  мкм; кавитация оказывает заметное влияние на шероховатость при  $L \leq 15$  мм излучателя, а при  $L > 15$  мм шероховатость изменяется незначительно; изменение шероховатости не происходит при длительности обработки до 15 мин (это может быть связано

с наличием инкубационного периода накопления напряжений), далее происходит переход упругих деформаций в пластические и наблюдается рост изменений шероховатости.

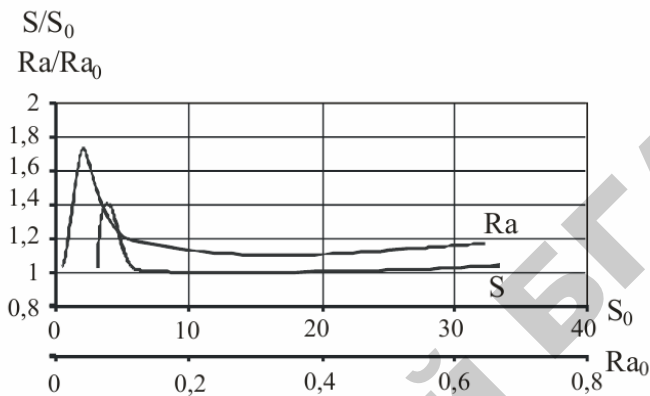


Рис. 9.15. Зависимость изменения среднего арифметического отклонения  $Ra$  и среднего шага местных выступов профиля  $S$  от начального значения после УЗ обработки

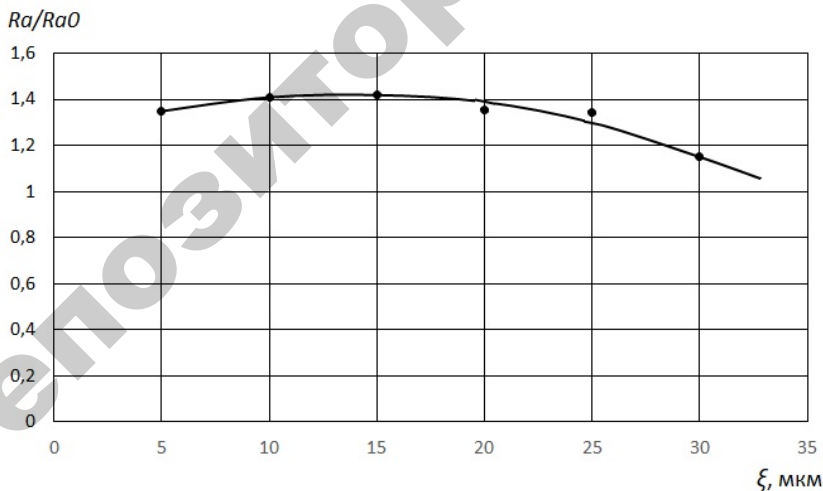


Рис. 9.16. Зависимость изменения шероховатости от амплитуды колебаний

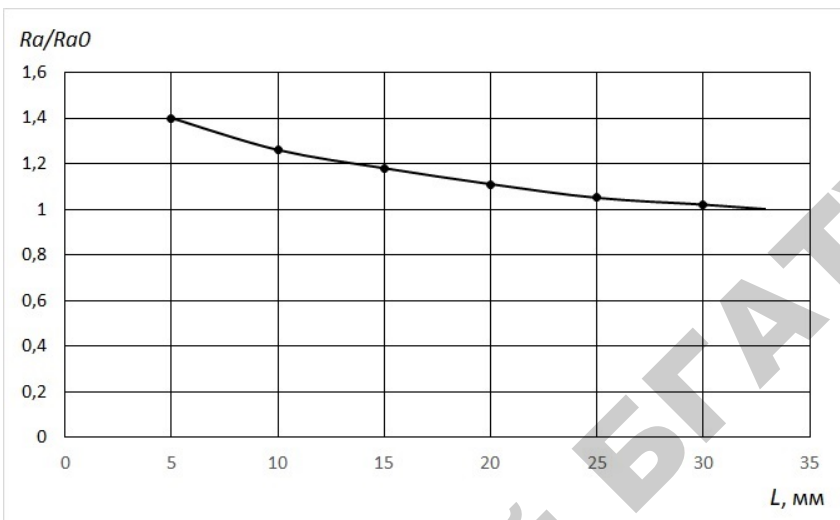


Рис. 9.17. Зависимость изменения шероховатости от расстояния от излучателя

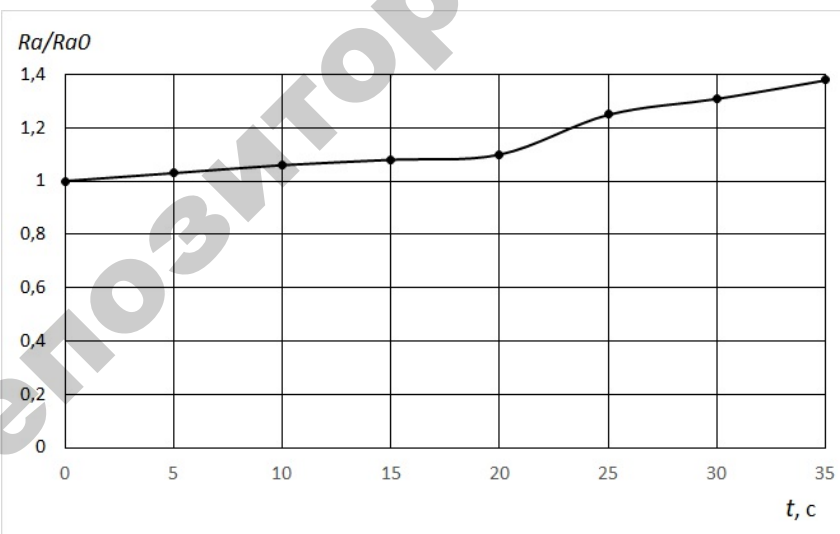


Рис. 9.18. Зависимость изменения шероховатости от времени обработки

## 9.2. Качество плодоовощных продуктов

### Питательная ценность

Под питательной ценностью пищевых продуктов понимается совокупность свойств пищевых продуктов, при наличии которых удовлетворяются физиологические потребности человека в необходимых веществах и энергии [279]. УЗ обработка пищевых продуктов может оказывать влияние на их питательную ценность. Причины этого влияния чаще всего связывается с образованием гидроксильных свободных радикалов ОН под действием кавитации, которые могут взаимодействовать с компонентами пищевых продуктов [149, 280]. При этом, однако, отмечается, что результаты этого взаимодействия могут быть как положительными, так и отрицательными – в зависимости от особенностей процесса УЗ обработки и обрабатываемых продуктов [281]. Также возможны и иные причины изменения питательной ценности пищевых продуктов, связанные с УЗ обработкой [149, 280].

Большинство работ по данной тематике посвящено изучению влияния ультразвука на содержание аскорбиновой кислоты и минеральных веществ в овощах, фруктах и ягодах, а также в продуктах их переработки (в основном соков).

Аскорбиновая кислота является одним из основных компонентов в человеческом рационе. Она обладает сильным антиоксидантным действием и играет важную роль в метаболических процессах. Биологически активный изомер аскорбиновой кислоты – *L*-аскорбиновая кислота называется витамином С.

Аскорбиновая кислота может разлагаться в результате УЗ обработки, что может быть обусловлено образованием •ОН-радикалов [280]. В частности, было установлено, что с увеличением мощности и продолжительности действия ультразвука содержание аскорбиновой кислоты в цельных овощах и фруктах, а также в их соках снижалась [283]. Например, в томатном соке, обработанном ультразвуком (23 кГц, 1,5 мин), потери витамина С составили 12 % от начального содержания [283]. Вместе с тем во время хранения аскорбиновая кислота сохранялась в обработанном ультразвуком апельсиновом соке лучше, чем в соке, подвергнутом тепловой обработке [283, 284]. Также было обнаружено, что УЗ обработка (20 кГц) не приводила к уменьшению содержания витамина С в моркови [285].

Влияние УЗ обработки на содержание витамина С зависит от условий обработки. Так, в клубнике содержание витамина С начало снижаться сразу после сбора урожая. После УЗ обработки (40 и 59 кГц) это снижение замедлялось, что позволяло увеличить срок хранения ягод благодаря ингибированию процессов увядания и жизнедеятельности микроорганизмов [156]. В то же время не было обнаружено каких-либо существенных различий в содержании витамина С в ягодах контрольной группы и ягодах, прошедших УЗ обработку при 25 и 28 кГц.

Для уменьшения влияния УЗ обработки на содержание витамина С было предложено вносить аскорбиновую кислоту в обрабатываемую ультразвуком среду [149]. При этом предполагалось, что внесенная аскорбиновая кислота будет реагировать с большинством •ОН-радикалов, образовавшихся под воздействием кавитации, что, в свою очередь, позволит уменьшить взаимодействие между •ОН-радикалами и компонентами пищевых продуктов. Аналогичный эффект достигался при введении этанола в обрабатываемую ультразвуком среду, благодаря чему степень образования •ОН-радикалов снижалась приблизительно до 50% (по сравнению с 95%-ным снижением в присутствии аскорбиновой кислоты) [286].

В работе [287] наблюдалось значительное увеличение аскорбиновой кислоты в грейпфрутовом соке после УЗ обработки (28 кГц), которое связывалось с удалением растворенного кислорода под действием кавитации [288]. В работе [289] наблюдалась сохранность аскорбиновой кислоты в земляничном соке, обработанном ультразвуком (20 кГц, 1,5 кВт), что также объяснялось удалением растворенного кислорода во время кавитаций, поскольку наличие растворенного кислорода ускоряет процесс окислительной дегградации аскорбиновой кислоты.

Минеральные вещества являются незаменимым компонентом в питании человека, они участвуют во всех биохимических процессах, протекающих в организме. Ценными источниками минеральных веществ являются овощи и фрукты, в которых они находятся в виде солей различных органических и минеральных кислот, а также содержатся в составе высокомолекулярных органических соединений в виде химических элементов. УЗ обработка приводит к снижению содержания минеральных веществ, которое обычно наблюдается через 10–20 мин обработки и зависит от вида минеральных

веществ и обрабатываемой плодоовощной продукции [149]. Потери минеральных веществ также зависят от размера плодов: чем мельче плоды, тем больше потери. Потери кальция могут достигать до 60 %, магния, цинка и марганца – до 75 %, а железа – до 85 % [290]. При длительности УЗ обработка более 30 мин потери минеральных веществ уменьшаются.

### **Органолептические свойства**

К органолептическим свойствам пищевых продуктов относятся такие свойства, которые выявляются и оцениваются с помощью органов чувств. По ним устанавливают степень доброкачественности продуктов, их пригодность к употреблению в пищу.

УЗ обработка пищевых продуктов может оказывать влияние на их органолептические свойства. Однако малочисленность исследований особенностей этого влияния не позволяет выявить в нем каких-либо общих закономерностей [149]. Как правило, по результатам таких исследований отмечается, что после УЗ обработки органолептические свойства пищевых продуктов изменяются незначительно либо вообще не изменяются.

Большинство работ по данной тематике посвящено изучению влияния ультразвука на органолептические свойства овощей, фруктов и ягод, а также продуктов их переработки (в основном соков).

Так, УЗ обработка (20 кГц) виноградных ягод приводила к существенным различиям в их цветовых характеристиках по сравнению с необработанными ягодами [291]. С другой стороны, после УЗ обработки апельсинового сока происходили небольшие изменения его цвета, который становился светлее, а зеленый и желтый оттенки – более глубокими. Между тем, дегустационная комиссия не выявила статистически значимых отличий цвета апельсинового сока [292]. Подобный результат получен в работе [293], где было показано, что при хранении апельсинового сока после УЗ обработки при температуре 10 °С его цвет изменялся весьма незначительно. Исследования УЗ обработки сока ежевики также показали, что после различного по длительности воздействия ультразвука цветовые характеристики сока существенно не изменялись [294]. После обработки земляники с ультразвуком (35 кГц) в течение 2 минут наблюдалось лучшее сохранение окраски, чем при других обработках [295].

УЗ обработка практически не влияет на вкус и аромат пищевых продуктов, лишь в некоторых видах соков обнаруживается остаточная горечь [149]. Так, дегустационная комиссия не обнаружила статистически значимых изменений вкуса и аромата апельсинового сока после УЗ обработки, даже если она проводилась в экстремальных условиях [292]. Аналогично, после различной по длительности УЗ обработки сока ежевики не было выявлено значительных отличий в его вкусе и аромате. Следует, однако, заметить, что при длительности обработки выше 8 мин ощущался нежелательный «вареный» привкус [294].

Влияние ультразвука на органолептические свойства пищевых продуктов может быть связано с соответствующими изменениями концентрации определенных компонентов продуктов, а также с их структурными или химическими превращениями, обусловленными действием ультразвука.

Так, упомянутое выше появление нежелательного привкуса сока ежевики после УЗ обработки могло быть обусловлено разложением или образованием вкусоароматических веществ с низким порогом органолептического обнаружения [297].

Аналогично изменение цветových характеристик пищевых продуктов после УЗ обработки может быть вызвано влиянием ультразвука на содержащиеся в продуктах вещества, обладающие пигментными свойствами. К таким веществам относятся антоцианы – растительные пигменты, придающие пищевым продуктам красную и синюю окраску.

Во время УЗ обработки антоцианы могут разлагаться в результате реакций окисления, которым способствуют свободные радикалы, образованные в условиях кавитации [289]. Однако степень такого разложения антоцианов сравнительно невелика. Так, потери антоцианов в соках клубники и ежевики не превышали 5 % даже при использовании довольно мощного ультразвука [292, 296]. В соке ежевики после УЗ обработки с длительностью не более 32 мин практически не изменялось содержание таких антоцианов, как цианидин 3-глюкозид и цианидин 3-(6-малонил) глюкозид [294]. При изучении стабильности антоцианов в обработанном ультразвуком (20 кГц) земляничном соке во время его хранения обнаружен довольно высокий уровень содержания этих веществ. Также выявлена значительная сохранность антоцианов в виноградных



соках после обработки ультразвуком (20 кГц): 97,5 % цианидина, 48,2 % мальвидина и 80,9 % дельфинидина [297]. В работе [295] после обработки земляники ультразвуком (35 кГц) наблюдалось более высокое содержание антоцианов, чем после мойки в химических растворах (спустя 6 дней хранения обработанных образцов при комнатной температуре).

Важной разновидностью органолептических свойств пищевых продуктов является текстура, которая представляет собой особую характеристику структуры (внутреннего строения) продуктов, оцениваемую при их разжевывании по чувственному восприятию (в виде комплекса зрительных, слуховых и осязательных ощущений) [298]. По способности пищевых продуктов противостоять деформирующим воздействиям различают продукты с пластичной и хрупкой текстурой. В случае пластичной текстуры продукты в процессе деформирования сохраняются без разрушения, в случае хрупкой текстуры – разрушаются (особенно, при резких деформациях).

Сохранение текстуры овощей и фруктов обычно связывается с консервацией структуры растительных тканей, которая в процессе УЗ обработки практически не изменяется [149]. Некоторые изменения текстуры возможны лишь в тех случаях, когда овощи и фрукты подвергается ультразвуковой осмотической дегидратации, вызывающей повреждение клеток растений [149].

Существенным изменениям подвергается текстура мягких ягод (таких как клубника), которые быстро размягчаются, теряют плотность, что является причиной их короткого срока хранения. Ультразвуковая обработка предотвращает размягчение ягод и сохраняет их в плотном состоянии на протяжении всего срока хранения [149]. Так, плотность ягод клубники, обработанных ультразвуком с частотой 40 кГц, на восьмые сутки хранения оказалась на 17,5 % выше, чем у необработанных ягод [156].

### **Ферментативная активность**

Ферменты в пищевых продуктах оказывают каталитическое действие на метаболические процессы, поэтому оценка ферментативной активности может быть индикатором качества продуктов, их питательной ценности и органолептических свойств [280]. Активность ферментов в значительной степени определяется присутствием в среде веществ, способных оказывать активирующее или

ингибирующее влияние на ферменты, т. е. соответственно повышающих или понижающих скорость ферментативных реакций.

Ферменты представляют собой белковые молекулы, поэтому любые факторы, вызывающие денатурацию белков, приводят к инактивации ферментов. Инактивирующее влияние на ферменты могут оказывать повышенная температура, сильные кислоты и щелочи, соли тяжелых металлов, некоторые растворители, радиация, ультрафиолетовое излучение.

Активность ферментов может изменяться под действием ультразвука. Однако особенности влияния ультразвука на активность ферментов, в том числе содержащихся в пищевых продуктах, исследованы недостаточно.

Большинство работ по данной тематике посвящено изучению влияния ультразвука на состояние ферментов в продуктах переработки овощей, фруктов и ягод (в основном в соках).

УЗ обработка овощей и фруктов может вызвать инактивацию ряда содержащихся в них ферментов – липоксигеназы, пероксидазы, полифенолоксидазы, а также устойчивых к нагреванию липазы и протеазы [149].

Причины УЗ инактивации ферментов связываются с образованием в кавитационной зоне свободных гидроксильных радикалов, которые оказывают деструктивное действие на ферменты, что приводит к утрате ими каталитической активности [299].

Эффективность инактивирующего влияния ультразвука на ферменты зависит от активности ферментов, а также температуры, значения рН и состава окружающей среды [149].

Установлено, что инактивация ряда ферментов (трипсина, пепсина, тирозиназы) в результате УЗ обработки наблюдается в том случае, если обработка происходит в присутствии кислорода, и не наблюдается в среде, насыщенной водородом [183].

В целом ультразвук оказывает инактивирующее влияние на разные ферменты по-разному: в большей или меньшей мере, а иногда и вовсе не вызывает инактивацию. Например, оксидазы чувствительны к воздействию ультразвука, в то время как редуктазы, каталазы и амилазы обладают довольно значительной устойчивостью [183].

Срок хранения свеженарезанных овощей и фруктов ограничен физиологическими повреждениями, которые появляются в ходе их обработки (при очистке кожуры, выемке сердцевины, резке).

Поверхность среза быстро темнеет, что уменьшает привлекательность свеженарезанных продуктов для потребителей. В процессе ферментативного потемнения продуктов принимают участие полифенолоксидаза и пероксидаза, активность которых может быть существенно снижена в результате комбинированного воздействия ультразвука и аскорбиновой кислоты, играющей роль активатора ферментов [300].

Соки цитрусовых плодов со временем осветляются. Это происходит в результате осаждения мути, обусловленного химическими превращениями, инициируемыми пектинметилэстеразой (ПМЭ). Активность ПМЭ снижается с увлечением продолжительности и мощности воздействия ультразвука. В течение 10 мин обработки при плотности энергии ультразвука в 1,05 Вт/мл достигалась 62 %-ная инактивация ПМЭ [301]. Наблюдаемое снижение активности ПМЭ в апельсиновом и лимонном соках обуславливало увеличение стабильности мути в результате механического повреждения структуры молекул ПМЭ.

Инактивирующее действие ультразвука на ферменты усиливается в условиях повышенных температур. В томатном соке в результате УЗ обработки (20 кГц) при температуре 50–75 °С существенно увеличивалась скорость инактивации полигалактуроназы (в 4 раза) и ПМЭ (в 6 раз) [302, 303]. Активность пектинэстеразы лимона в результате совместного часового действия ультразвука и нагрева (50 °С) снижалась на 83 %, тогда при действии только ультразвука (25 °С) она снижалась только на 30 % [204].

В большинстве растительных тканей содержится липоксигеназа, которая в присутствии кислорода катализирует окисление ненасыщенных жирных кислот, что вызывает нежелательный запах в овощах [305]. Кроме того, липоксигеназа вызывает такие нежелательные эффекты, как разрушение хлорофилла и каротиноидов, окислительное повреждение белков и витаминов. Установлено, что УЗ обработка (20 кГц) буферного раствора соевой липоксигеназы приводит к ее инактивации [305].

Одним из наиболее распространенных ферментов растительных тканей является пероксидаза (POD). Инактивация POD увеличивает срок годности овощей во время хранения в замороженном состоянии. Использование для инактивации POD тепловой обработки малоэффективно, поскольку этот фермент стоек к высоким

температурам, и поэтому высокотемпературная обработка может изменить свойства продуктов (питательную ценность, аромат, насыщенность цвета [306, 307]. Установлено (на примере УЗ обработки помидоров), что действие ультразвука в течение 150 с приводит к практически полной инактивации POD [307].

### **Структура растительных тканей**

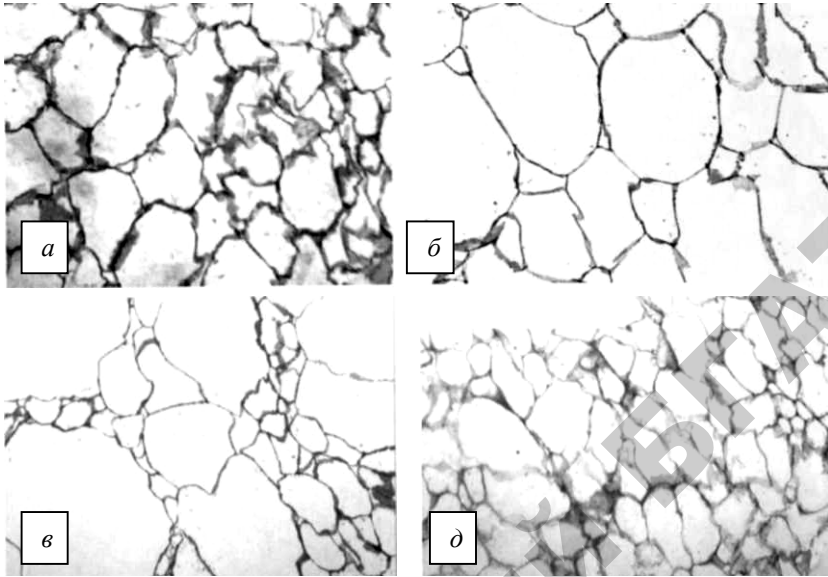
Одним из важных показателей качества пищевых продуктов являются их прочностные свойства, зависящие от структуры, которая, в свою очередь определяется микроструктурой продуктов [280]. Характерная черта продуктов растительного происхождения, особенно свежих овощей и фруктов – волокнистость структуры, обусловленная растительными волокнами.

Основополагающими элементами структуры растений являются клетки, которые, несмотря на микроскопически малую величину, имеют сложное строение [308]. Клетки снабжены твердыми, не растворимыми в воде клеточными стенками, которые, являясь внутренним скелетом растения, обеспечивают его механическую прочность. В свою очередь, прочность клеточной стенки обуславливает целлюлоза, из которой формируется каркас стенки. Стенки соседних клеток скреплены межклеточным веществом – срединной пластинкой, которая представляет собой единый слой, общий для двух соседних клеток. Срединная пластинка состоит из протопектина. Межклеточные пространства заполнены органическим веществом, скрепляющим клетки друг с другом. Состав этого вещества зависит от природы растительной ткани, но всегда в межклетниках находятся белки либо пектины как связующие вещества растительной ткани.

УЗ обработка овощей и фруктов вызывает процессы попеременного сжатия и расширения растительных тканей, в результате чего в тканях могут образовываться микроканалы [309–311].

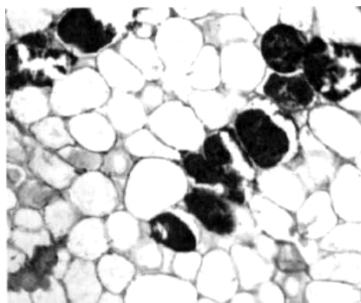
Некоторые особенности изменения структуры различных видов плодов в результате УЗ обработки показаны на рис. 9.19–9.22 [149].

На микроснимках свежих плодов (рис. 9.19) видны тонкие стенки клеток с обычной морфологией, которые отличаются незначительным объемом внеклеточного пространства, либо полным его отсутствием.



*Рис. 9.19.* Микроснимки свежих плодов:  
*а* – ананаса; *б* – дыни; *в* – папайи; *д* – малайского яблока (ямбозы)

На микроснимке черной хурмы (сапоты) (рис. 9.20) видны два вида клеток: паренхимные (на рисунке белые) и плотные (на рисунке черные). Паренхимные клетки характеризуются в основном округлой формой, некоторые из них слегка вытянуты. Объем межклеточного пространства в местах соединения нескольких клеток довольно мал. Плотные клетки расположены рядом друг с другом и содержат значительное количество фенольных соединений.



*Рис. 9.20.* Микроснимок свежей черной хурмы

В течение первых 10–20 мин УЗ обработки в тканях плодов происходили изменения (рис. 9.21). В тканях дыни (рис. 9.21, b) сформировались две четкие области: в одной клетке, впитав воду, разбухли, а в другой – существенно уменьшились и приобрели игольчатую форму. Клетки папайи (рис. 9.21, c) практически разрушились, что привело к образованию обширного межклеточного пространства. Некоторые клетки черной хурмы (рис. 9.21, d) заметно искривились, плотные клетки сплюснулись и вытянулись, образовав микроканалы, подобные микроканалам в тканях дыни.

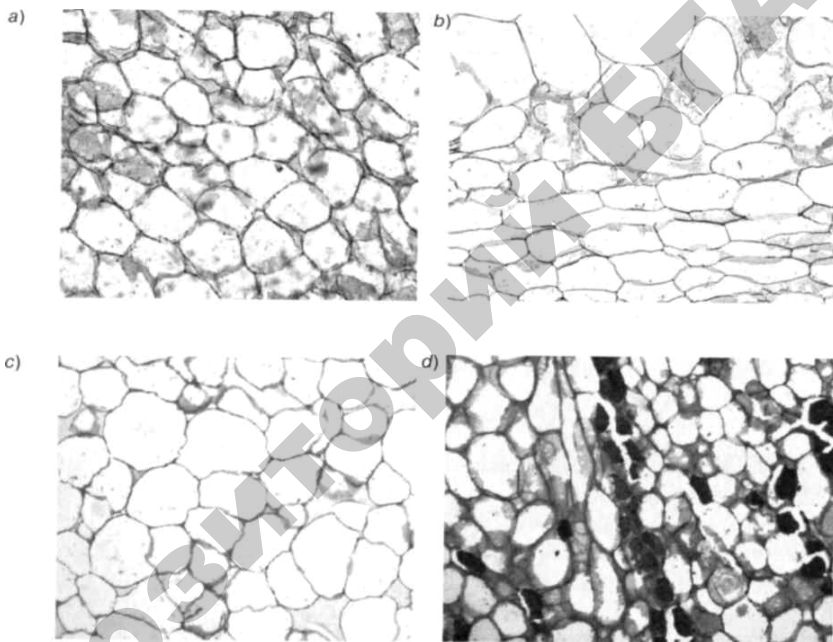


Рис. 9.21. Микроснимки плодов после 20-минутной УЗ обработки:  
a – ананаса; b – дыни; c – папайи; d – черной хурмы

После 30-минутной УЗ обработки клетки плодов искривились и начали появляться микроканалы (рис. 9.22). В одних областях отчетливо наблюдались места взаимного соединения соседних клеток, в результате которого межклеточное пространство уменьшилось, в то время как в других областях клетки разрушились и межклеточное пространство увеличилось. Далее происходило образование новых

и расширение уже имеющихся микроканалов. Механизм образования микроканалов в тканях ананаса (рис. 9.22, а) отличался от механизма их образования в тканях дыни (рис. 9.22, б), где они возникали в результате сплющивания и вытягивания клеток. В папайе (рис. 9.22, с) в результате разрушения смежных клеток образовалось обширное межклеточное пространство.

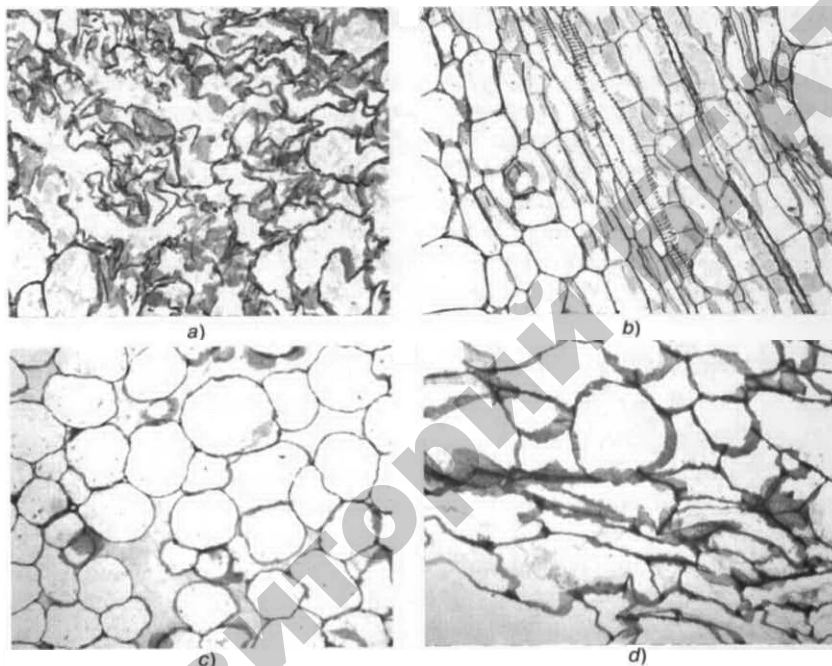


Рис. 9.22. Микроснимки тканей плодов после 30-минутной УЗ обработки:  
а – ананаса; б – дыни; с – папайи; d – малайского яблока

УЗ обработка может вызывать разрушение структуры растительных тканей только лишь при определенных условиях, когда степень воздействия ультразвука достаточно велика [280]. В частности, целенаправленное разрушение клеток растений с помощью ультразвука применяется при осуществлении процессов экстрагирования внутриклеточных соединений [312].

В работе [151] исследовалось влияние мощности ультразвука и длительности УЗ обработки на структуру и свойства некоторых листовых овощей.

При обработке листьев шпината в объеме ванны УЗ моечной установки (21 кГц) было обнаружено, что пороговые значения удельной мощности ультразвука находились между значениями 200 и 300 Вт/л (рис. 9.23). При удельной мощности 200 Вт/л сразу же после УЗ обработки не наблюдалось никакого явного повреждения поверхности шпината, когда же она увеличивалась до 300 Вт/л, то и на верхней, и на нижней поверхности листьев появлялись водянистые пятна. Образование водянистых пятен на растительной ткани связывалось с повреждением клеточных стенок.

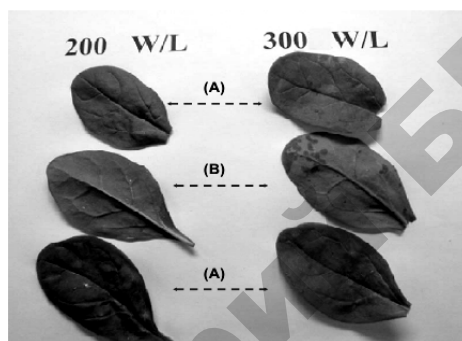


Рис. 9.23. Листья шпината после УЗ обработки.  
А – верхняя поверхность; В – нижняя поверхность

Для определения влияния длительности УЗ обработки на состояние растительной ткани проводились эксперименты, в которых о возможных повреждениях структуры клеток судили по величине электропроводности раствора, окружающего обрабатываемые продукты. При этом предполагалось, что электропроводность раствора изменяется в результате вытекания клеточной жидкости растений в электролитный состав, вызванного кавитационным повреждением клеток во время обработки продуктов.

Результаты экспериментов, представленные на рис. 9.24, показали, что уровень электропроводности всех видов обрабатываемых листовых овощей увеличивается в результате обработки. При этом можно выделить две фазы изменения электропроводности. На первой фазе электропроводность увеличивается быстро, в то время как на второй – медленно. Такое нелинейное двухфазное изменение электропроводности объясняется ограниченной проникающей способностью ультразвука.



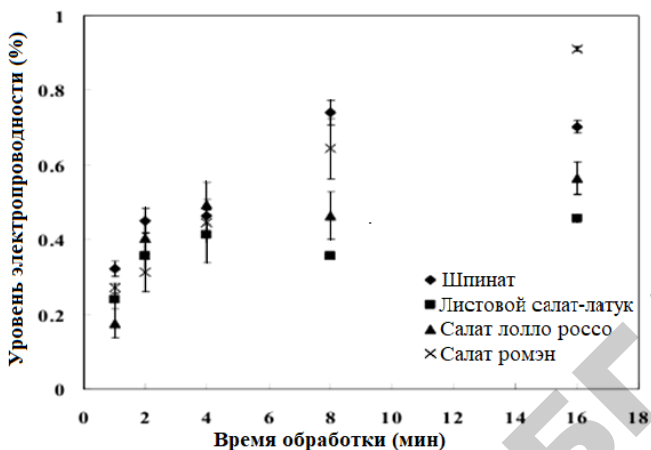


Рис. 9.24. Влияние длительности УЗ обработки листовых овощей на частоте 34 кГц при плотности акустической мощности 81 Вт/л на электропроводность окружающего раствора

Только те растительные клетки, к которым может проникнуть ультразвук, могут быть повреждены разрушению во время УЗ обработки. Быстрое увеличение электропроводности на первой фазе обусловлено, соответственно, быстрым вытеканием электролита из клеток, расположенных на поверхности и в приповерхностном слое продуктов, поскольку эти клетки подвергаются наибольшему разрушительному воздействию ультразвука. В свою очередь, медленное увеличение электропроводности на второй фазе обусловлено, соответственно, медленным вытеканием электролита из клеток, которые расположены в относительно глубоких слоях и поэтому менее доступны воздействию ультразвука. Исключение составлял ромэн-салат, при обработке которого наблюдалась линейная зависимость электропроводности раствора от длительности обработки. Это может быть связано со структурой растительной ткани салата, имеющей много пор, благодаря чему УЗ кавитация может легко развиваться во внутренних клетках.

Хотя изменение электропроводности раствора было довольно значительным, какого-либо визуально наблюдаемого структурного качества обработанных продуктов не происходило как сразу после обработки, так и после 14 дней хранения продуктов (рис. 9.25).

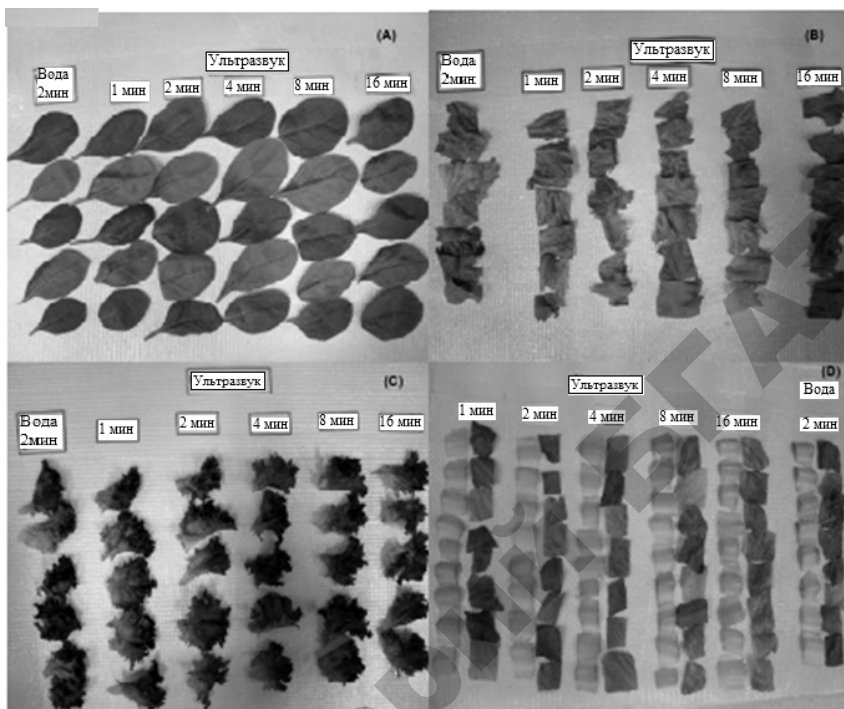


Рис. 9.25. Овощи, обработанные ультразвуком (34 кГц, 81 Вт/л) и сохраненные при 1 °С в течение 14 дней: А – молодой шпинат; В – листовой салат; С – салат лоло росо; D – ромэн-салат

## 10. СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАВНОМЕРНОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ

### 10.1. Обеспечение равномерной гидрокавитационной очистки

Для обеспечения равномерного удаления загрязнений с поверхностей деталей сельскохозяйственной техники в процессе гидрокавитационной очистки можно использовать технологические приемы, обычно применяемые в струйной очистке. Как правило, эти приемы сводятся к определенному размещению деталей относительно струй жидкости так, чтобы очищаемые поверхности каждой детали не находились в теневых зонах, а в случае одновременной очистки нескольких деталей – к их определенному размещению относительно друг друга так, чтобы одни детали не создавали теневых зон для других деталей [313].

Для реализации этих приемов служит соответствующее моечно-очистное оборудование, которое делится на два основных типа: 1) с перемещением деталей относительно стационарно зафиксированных форсунок и 2) с перемещением форсунок относительно стационарно зафиксированных изделий.

В случае струйной очистки традиционное оборудование каждого типа имеет следующие конструктивные особенности:

– оборудование 1-го типа содержит рабочую камеру, в центре которой установлена платформа или корзина, вращающаяся в процессе очистки в горизонтальной плоскости с небольшой скоростью (1–2 оборота в минуту); в то время как детали вращаются, к ним с разных сторон рабочей камеры (снизу, сверху, сбоку) поступает моющая жидкость под заданным давлением;

– оборудование 2-го типа содержит рабочую камеру, в которой установлены полки-корзины с размещенными на них деталями; распылительная система состоит из вращающихся форсунок, расположенных снизу и сверху каждой полки.

Кроме того, существует комбинированное оборудование, в котором обеспечивается перемещение и деталей, и форсунок.

Характерным примером эффективного подхода к решению проблемы равномерной гидрокавитационной очистки является способ

очистки, заключающийся в том, что очищаемую поверхность сканируют непрерывной кавитирующей струей мощней жидкости [314]. Особенность данного способа состоит в том, что струю закручивают вокруг своей оси в форме вихревого потока, который способствует удалению загрязнений из углублений на поверхности. Оторвавшиеся частички загрязнения, увлекаемая вихревой струей и вращаясь под ее действием как внутри вихря, так и на его периферии, способствуют более эффективному очищению поверхности.

Для повышения равномерности, а также производительности гидрокавитационной очистки предложено устройство, в котором моечно-очистная обработка осуществляется с помощью системы взаимно пересекающихся кавитирующих струй (рис. 10.1) [315]. При воздействии одиночной кавитирующей струи на зону обработки 2 поверхности 3 (рис. 10.1. а) кавитационные пузырьки в поперечной плоскости кавитирующей струи 1 распределены неравномерно, что наглядно показано на рис. 10.1, б, где большее количество кавитационных пузырьков показано темным цветом (количество пузырьков градиентно уменьшается к центру струи, так что по краю кавитирующей струи оно максимально, а в ее центре – минимально). При воздействии несколькими кавитирующими струями без их пересечения получается ряд практически не сливающихся зон обработки, отдельных для каждой форсунки 4 (эти зоны только соприкасаются своими краями между собой). Количество кавитационных пузырьков в зоне обработки увеличивается, а их распределение в этой зоне становится равномерным в результате взаимного пересечения кавитирующих струй (рис. 10.1, в).

Для того чтобы кавитирующие струи пересекались друг с другом, следует выбрать расстояние  $L$  между продольными осями форсунок таким, чтобы оно удовлетворяло соотношению

$$25tg(\alpha/2) \leq L/d_{\phi} \leq 60tg(\alpha/2), \quad (10.1)$$

где  $\alpha$  – угол расширения кавитирующей струи;  $d_{\phi}$  – диаметр форсунки, причем расстояние  $h$  от форсунок до зоны обработки находится в интервале  $(40-60) d_{\phi}$ , а угол  $\alpha$  расширения кавитирующей струи – в интервале  $15^{\circ}-70^{\circ}$  [315].

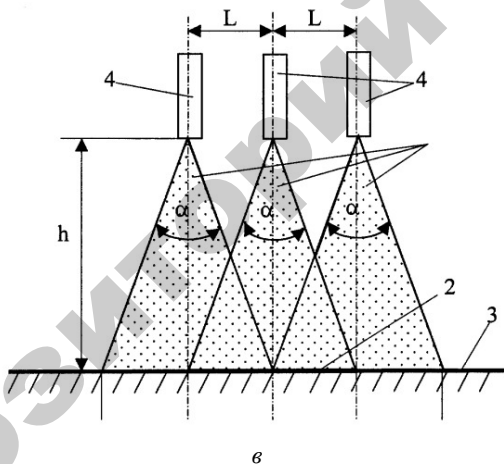
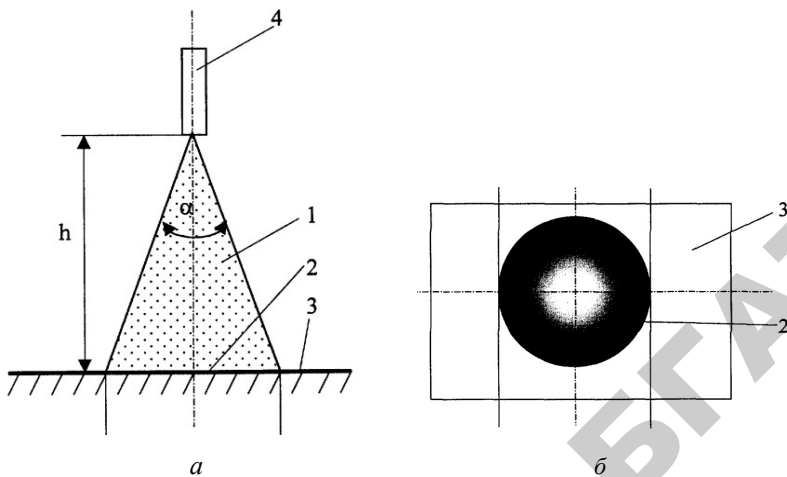


Рис. 10.1. Устройство для очистки с помощью пересекающихся кавитирующих струй:

- 1 – кавитирующие струи; 2 – зона обработки;  
3 – обрабатываемая поверхность; 4 – форсунки

При прохождении объединенной кавитирующей струи, образованной отдельными струями, вдоль обрабатываемой поверхности (при перемещении самого очищаемого изделия, например, корпусной детали) сначала происходит предварительная очистка поверхности

краем зоны 2, а затем окончательная очистка центральной частью общей зоны, в которой количество кавитационных пузырьков значительно больше, чем при использовании одной кавитирующей струи или нескольких непересекающихся кавитирующих струй.

## 10.2. Обеспечение равномерной акустико-кавитационной очистки

### Очистка с помощью ультразвуковых погружных излучателей

Существенным недостатком использования УЗ стержневых излучателей для очистки крупногабаритных деталей (например, корпусных частей машин) является сравнительно малая площадь излучающего торца. Для устранения этого недостатка предложено использовать динамический режим УЗ обработки, когда излучатель перемещается относительно очищаемой поверхности [316]. Для определения рациональных параметров очистки в этом режиме экспериментально исследовали кавитационную эрозию тест-объектов из алюминиевой фольги по схеме, представленной на рис. 10.2 [316].

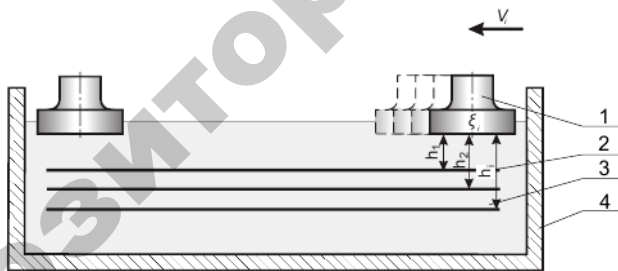


Рис. 10.2. Схема проведения экспериментальных исследований эрозионной активности перемещающегося УЗ излучателя:

1 – излучатель; 2 – эрозионный тест; 3 – моющая жидкость; 4 – ванна

Как показали эксперименты, степень кавитационной эрозии в значительной мере зависит от амплитуды УЗ колебаний  $\zeta$ , скорости перемещения излучателя  $V$  и расстояниях от излучателя до обрабатываемой поверхности  $h$  (рис. 10.3 [316]). С учетом полученных экспериментальных результатов было разработана установка для

координатной УЗ очистки, в основу конструкции которой положен принцип точного позиционирования излучателя относительно очищаемой поверхности. Для этого установка снабжена механизмом перемещения излучателя, шаговыми двигателями, электронным блоком управления, а также рабочей емкостью (ванной) с нагревателями моющей жидкости (рис. 10.4 [316]).

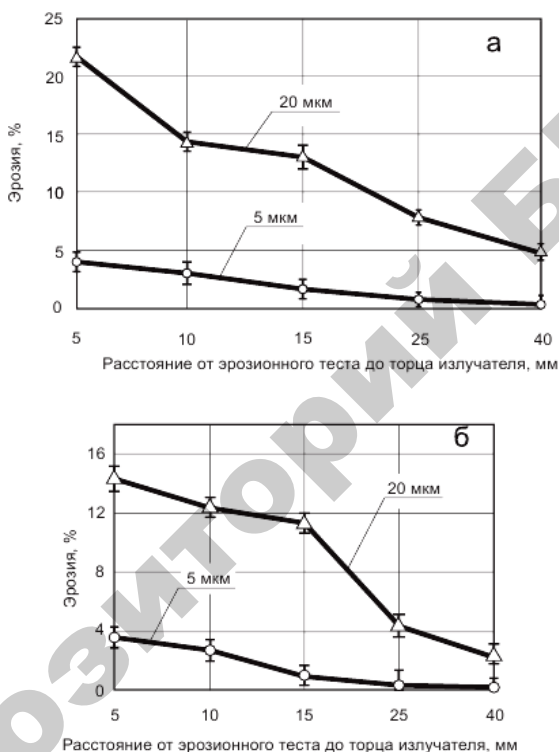


Рис. 10.3. Зависимость эрозионной активности от амплитуды УЗ колебаний (мкм) и расстояния от излучателя до образца (мм) при скорости перемещения излучателя: а – 6 мм/с; б – 18 мм/с

Многие детали машин, в частности, корпусные детали двигателей, имеют довольно сложную форму, так что «ручное» управление перемещением излучателя не позволяет обеспечить требуемую величину технологического зазора между излучателем и очищаемой

поверхностью и, кроме того, существенно увеличивает трудоемкость написания управляющей программы для перемещения излучателя в процессе очистки. Поэтому рекомендуется использовать специализированные программы управления перемещением излучателя, которые создаются по заранее подготовленной трехмерной модели очищаемого изделия.

В работе [16] было выполнено моделирование описанного выше процесса координатной УЗ очистки. В частности, рассматривалась одномерная математическая модель перемещения прямоугольного излучателя длиной  $L$  и шириной  $B$  с постоянной скоростью  $V$  вдоль поверхности очистки длиной  $a$ , на которой находится равномерный слой загрязнений  $G$  с относительной приведенной плотностью начального загрязнения  $G_0 = G/B$ . Целью построения модели было установить зависимость количества удаляемого загрязнения с поверхности за один проход излучателя от амплитуды колебаний торца излучателя, расстояния и скорости перемещения излучателя.

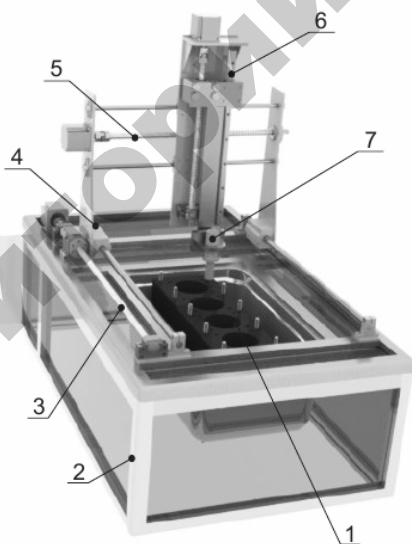


Рис. 10.4. Установка для координатной УЗ очистки:

- 1 – ванна с очищаемыми деталями; 2 – каркас нижнего блока установки;
- 3 – каркас верхнего блока установки; 4 – привод продольного перемещения излучателя; 5 – привод поперечного перемещения излучателя;
- 6 – привод вертикального перемещения излучателя; 7 – УЗ излучатель



Процесс очистки описывался уравнением для неподвижного положения излучателя

$$\frac{dG}{d\tau} = -KG_{ocm} \frac{1}{\sqrt{\tau}}, \quad (10.2)$$

где  $dG$  – масса удаляемого загрязнения,  $G_{ocm}$  – масса оставшегося загрязнения,  $\tau$  – локальное время очистки,  $K$  – коэффициент, определяющий относительную эрозионную активность УЗ поля, создаваемого стержневым излучателем, зависящий от амплитуды колебаний торца излучателя (рис. 10.5), а также расстояния от излучателя до очищаемой поверхности (при определении значений  $K$  тест-объект устанавливался на расстоянии 5 мм до излучателя) [16].

В начальный момент времени левый край излучателя имел координату  $x = 0$ , конечное положение излучателя характеризовалось координатой левого края излучателя  $x = a - L$ .

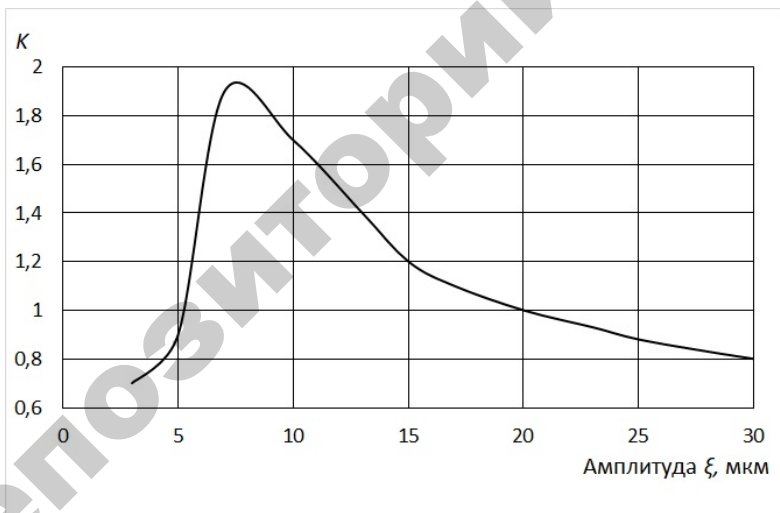


Рис. 10.5. Экспериментальная зависимость коэффициента  $K$  от амплитуды колебаний излучателя

Ниже рассмотрен процесс очистки загрязненной поверхности, который разделен на три участка (рис. 10.6) [5].

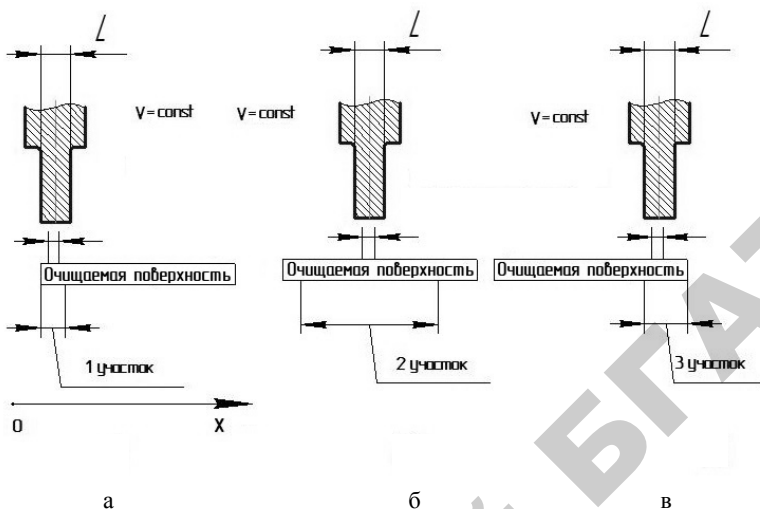


Рис. 10.6. Схема математической модели процесса очистки:  
 а – первый участок очистки; б – второй участок очистки;  
 в – третий участок очистки

На первом участке (рис. 10.6, а) излучатель начинает свое движение, значение координаты  $x$  находится в интервале  $0 < x < L$  и количество удаляемых загрязнений возрастает. Интегрируя (10.2) и проводя соответствующие преобразования, можно получить количество удаляемого загрязнения  $M_1$  на первом участке (2):

$$M_1 = \int_0^L G(x) dx = G_0 \left( L - V \frac{1 - e^{-2K\sqrt{\frac{L}{V}} \left( 2K\sqrt{\frac{L}{V}} + 1 \right)}}{2K^2} \right). \quad (10.3)$$

На втором участке (рис. 10.6, б) количество удаляемого загрязнения  $M_2$  стабилизируется, оно является прямо пропорциональным длине участка и определяется по формуле:

$$M_2 = G(x)(a - 2L) = G_0 \left( 1 - e^{-2K\sqrt{\frac{L}{V}}} \right) (a - 2L). \quad (10.4)$$

Третий участок (рис. 10.6, в) определяется текущей координатой левого края излучателя из условия  $a - 2L < x < a - L$ , количество удаляемого на этом участке загрязнения  $M_3$  можно найти по формуле

$$M_3 = \int_{a-2L}^{a-L} G(x) dx. \quad (10.5)$$

Динамика очистки на третьем участке является симметричным отражением очистки на первом участке ( $M_3 = M_1$ ). Общее количество загрязнения  $M = 2M_1 + M_2$ , удаляемое на всей длине поверхности, определяется

$$M = 2G_0 \left( L - V \frac{1 - e^{-2K\sqrt{\frac{L}{V}} \left( 2K\sqrt{\frac{L}{V}} + 1 \right)}}{2K^2} \right) + G_0 \left( 1 - e^{-2K\sqrt{\frac{L}{V}}} \right) (a - 2L). \quad (10.6)$$

Разработанная модель проверялась экспериментально. Обработку поверхности проводили стержневым излучателем, перемещающимся со скоростью  $V = 6$  мм/с, в низкоамплитудном режиме при амплитуде колебаний излучателя  $\xi = 5$  мкм и высокоамплитудном режиме при  $\xi = 20$  мкм на различных расстояниях от излучателя до тест-объекта (алюминиевой фольги) (рис. 10.7) [16].

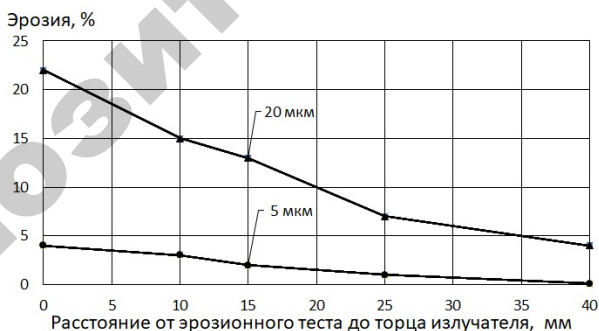


Рис. 10.7. Зависимость площади эрозионных повреждений тест-объекта при перемещении излучателя со скоростью 6 мм/с от амплитуды колебаний излучателя и расстояния от эрозионного теста до торца излучателя

Площадь повреждений алюминиевой фольги при высокоамплитудном режиме обработки была значительно больше (при расстоянии 5 мм более чем в 3,5 раза), чем при низкоамплитудном режиме, что объясняется присутствием большего количества кавитационных пузырьков при высокоамплитудном режиме обработки, оставляющих, соответственно, больше повреждений на тест-объекте.

Результаты исследования технологических возможностей излучателя, перемещающегося в диапазоне скоростей от 6 до 50 мм/с, показаны на рис. 10.8 [16], где видно, что наибольшая эрозия наблюдается при минимальном расстоянии от излучателя до тест-объекта, что вызвано образованием зоны развитой кавитации, расположенной непосредственно вблизи торца излучателя.

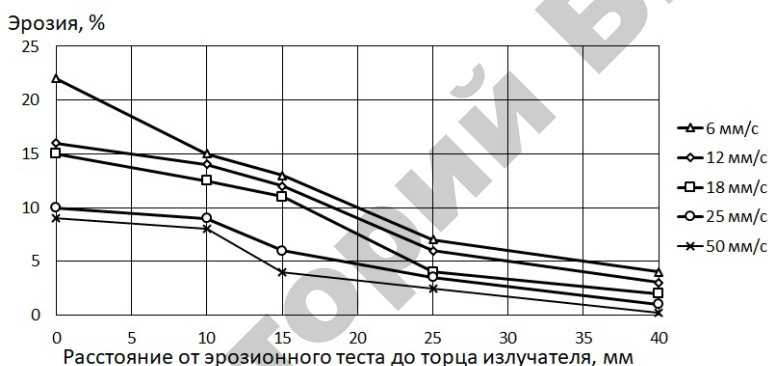


Рис. 10.8. Изменение эрозии при высокоамплитудном режиме обработки от скорости перемещения излучателя и расстояния от излучателя до обрабатываемой поверхности

Исследование комплексного влияния амплитуды колебаний излучателя  $\xi$ , скорости перемещения излучателя  $V$  и расстояния от излучателя до очищаемой поверхности  $h$  на продолжительность процесса очистки  $t$ , которое проводилось с использованием методики планирования многофакторных экспериментов, позволило получить следующее уравнение регрессии [5]:

$$t = 321,76 - 16,58\xi - 5,93V - 9,47h + 0,17\xi V + 0,13\xi h + 0,25\xi^2 + 0,06V^2 + 0,29h^2. \quad (10.7)$$

Максимальные значения величины коэффициентов регрессии в уравнении (10.7) находятся при параметрах  $\xi$  и  $h$ , откуда следует, что эти параметры оказывают наибольшее влияние на продолжительность очистки, которая становится минимальной при увеличении  $\xi$  и уменьшении  $h$ . Дифференцирование выражения (10.7) по независимым переменным позволило определить следующие оптимальные значения параметров:  $\xi_{\text{опт}} = 29$  мкм,  $V_{\text{опт}} = 7$  мм/с,  $h_{\text{опт}} = 9$  мм.

В работе [12] выполнен анализ конструктивных особенностей различных видов деталей машин и предложены рациональные условия их очистки с использованием двух типов УЗ излучателей: стержневых и цилиндрических. Применение стержневых излучателей требует точного взаимного ориентирования очищаемых деталей и излучателей из-за малой площади излучения, что, как отмечалось выше, снижает эффективность очистки крупногабаритных корпусных деталей со сложной конфигурацией. Цилиндрические излучатели обладают большей площадью излучения и не требуют специального ориентирования очищаемых деталей.

В результате анализа конструктивных особенностей очищаемых деталей были выделены две их группы. К первой группе относятся малогабаритные детали, в том числе детали со сквозными и глухими отверстиями (пружины, штуцеры, клапаны, регулировочные винты и т. п.), а также крупногабаритные детали простой конфигурации (мембраны, крышки и т. п.). Очистка деталей этой группы осуществляется стержневыми излучателями. Очищаемые детали помещают в специальные кассеты, задающие им ориентированное положение относительно излучателя. Перемещением излучателя над деталями обеспечивается удаление загрязнений из глухих отверстий, очистка крупногабаритных деталей по всей поверхности, а также очистка нескольких деталей одновременно. Ко второй группе относятся крупногабаритные корпусные детали сложной конфигурации (корпус и крышка электромагнитного клапана, корпуса вентиля и т. п.), для очистки которых используют цилиндрические излучатели.

На рис. 10.9 показана экспериментальная зависимость продолжительности очистки  $\tau$  плоской поверхности от скорости перемещения излучателя  $V$ , которая описывается следующим выражением [16]:

$$\tau = -5 \cdot 10^{-6} V^3 + 0,01 V^2 - 0,91 V + 35. \quad (10.8)$$

Как видно на рис. 10.9, оптимальная скорость перемещения излучателя находится в пределах 40–60 мм/с и дальнейшее ее увеличение не дает существенного уменьшения продолжительности очистки.

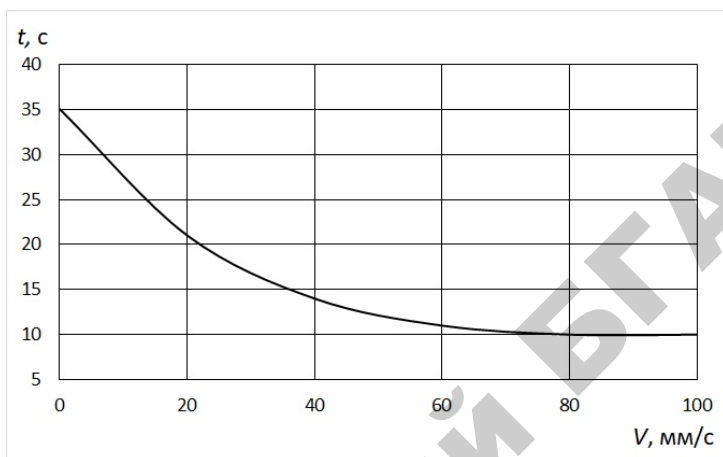


Рис. 10.9. Зависимость продолжительности очистки  $t$  от скорости перемещения излучателя  $V$  при очистке плоской поверхности

В работе [16] экспериментально изучалась зависимость продолжительности очистки глухих отверстий от скорости перемещения излучателя [16]. Эксперименты проводили на прозрачных моделях, имеющих отверстия диаметром 5, 10, 15, 20 и 25 мм и глубину 30 мм. В ходе экспериментов определялась продолжительность очистки отверстия при неподвижном положении излучателя и при его перемещении относительно моделей со скоростью  $V = 50$  мм/с.

Продолжительность очистки деталей с глухими отверстиями может быть уменьшена при относительном перемещении излучателя и очищаемых деталей, что объясняется мощными гидродинамическими потоками при частичном перекрытии отверстия торцом излучателя, которые обеспечивают интенсивное удаление загрязнения из глубины отверстия. При этом оптимальная скорость перемещения излучателя находится в интервале 40–60 мм/с. Наибольшая продолжительность очистки требуется для глухих отверстий малого диаметра, что обусловлено образованием в отверстиях пульсирующих пузырьков, которые препятствуют образованию гидродинамических потоков и выносу загрязнения со дна отверстия.

### Неравномерность очистки в ультразвуковых ваннах

Исследования вопросов объемно-неоднородного развития кавитации в УЗ ваннах начали систематически проводиться в 1970–80-е годы [18, 130]. Интерес к ним особенно возрос в последние 10–15 лет в связи с расширением производства и применения УЗ ванн [317–319]. В ходе проведения этих исследований были экспериментально определены основные закономерности формирования кавитационных зон в УЗ ванне. В частности, было показано, что активность кавитации  $a_k$  уменьшается по мере удаления от УЗ излучателей. Также было показано, что при загрузке ванны очищаемыми предметами значения  $a_k$  по объему ванны снижаются, а характер их объемного распределения в окрестности предметов изменяется. Кроме того, было установлено неоднородное распределение  $a_k$  вдоль направления распространения УЗ волн в соответствии с чередованием областей разрежения и сжатия.

Типичным примером такого рода исследований является работа [318], в которой оценивалась неоднородность кавитационного поля в рабочем объеме УЗ ванны, как при наличии кассеты с очищаемыми деталями, так и без кассеты (детали располагали перпендикулярно площади излучения). Измерение кавитационного давления проводили в зоне очистки, а также на различных расстояниях от излучателя. Результаты измерений показаны на рис. 10.11. Кавитационное давление уменьшается с удалением от излучателя. Кроме того, оно уменьшается, когда в ванну помещена кассета с деталями.

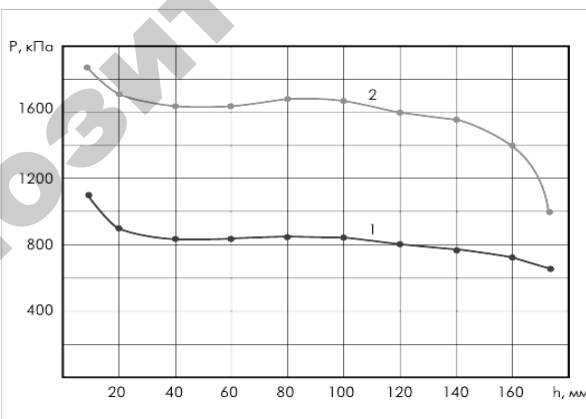


Рис. 10.11. Зависимость давления УЗ-поля в центре ванны от расстояния до излучателя при наличии кассеты с деталями (1) и без кассеты (2)

Следует отметить, что во всех выполнявшихся до сих пор работах, посвященных изучению объемно-неоднородного развития кавитации в УЗ ванне, как правило, отсутствуют экспериментальные данные, свидетельствующие о том, насколько сильно влияет неоднородность развития кавитации в объеме моющей жидкости на равномерность удаления загрязнений с очищаемых поверхностей. Комплекс экспериментальных исследований влияния характера объемного распределения  $a_k$  в УЗ ванне на равномерность очистки деталей сельскохозяйственной техники и плодоовощных продуктов выполнен в работах [320, 321].

Эксперименты проводили на установке УЗУ-0,25 (генератор: потребляемая мощность 450 Вт, выходная – 250 Вт, рабочая частота – 18 кГц; полость ванны: длина – 22 см, ширина – 17 см, глубина – 16 см, объем – 4,5 л). Ванна была снабжена тремя УЗ излучателями, встроенными в ее донной части. Ванну заполняли водой до некоторого фиксированного уровня  $H_0$ . Значения  $a_k$  оценивали с помощью кавитометра ICA-4D, действие которого основано на анализе спектра кавитационного шума, воспринимаемого шупом. Измеряемые значения  $a_k$  выражали в относительных единицах – о величине  $a_k$  судили по электрическому напряжению, которое указывалось на индикаторной шкале электронного блока. При проведении измерений шуп кавитометра перемещали по объему воды в ванне.

Основные результаты этих экспериментов рассмотрены ниже.

В работе [320] в качестве загружаемых в УЗ ванну объектов использовали специально изготовленные модельные образцы различных размеров и формы. Некоторые из них играли роль тестовых образцов, подвергаемых очистке, для чего на их поверхность предварительно наносили модельные загрязнения различного состава. В ванну загружали как одиночные, так и множество объектов. Требуемое положение объектов в объеме воды обеспечивали с помощью механических держателей.

На рис. 10.12 представлена типичная кривая зависимости  $a_k(H)$ , полученная для незагруженной ванны ( $H_0 = 12$  см). Она имеет вид нисходящего синусоидального затухающего тренда. Такая форма кривой выявляется вследствие высокой локальности измерений, осуществляемых кавитометром, благодаря чему он воспринимает изменения  $a_k$ , соответствующие чередованиям областей разрежения и сжатия вдоль направления распространения УЗ волн. Области



разрежения, так же как и области сжатия, следуют через полуволновые периоды  $\lambda/2 \approx 4$  см (длина волны в воде  $\lambda = v/f \approx 8$  см, скорость звука в воде  $v = 1480$  м/с, частота колебаний  $f = 18$  кГц).

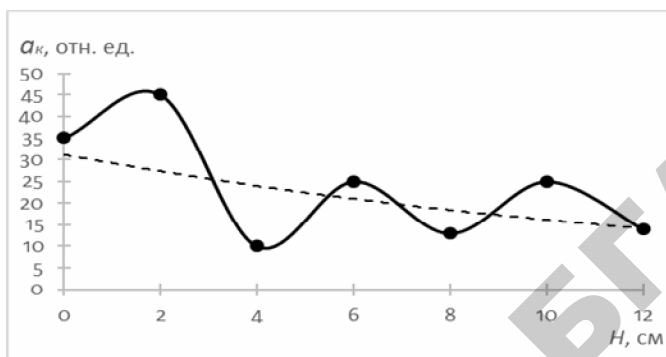


Рис. 10.12. Зависимость активности кавитации  $a_k$  от расстояния  $H$  от излучателей в незагруженной ванне

Для того чтобы дать достаточно точную оценку общему уменьшению  $a_k$  по высоте столба воды в ванне — от излучателей (от дна ванны) до водной поверхности, предпочтительно рассматривать вместо этой кривой соответствующую ей срединную кривую (на рис. 10.12 она показана пунктиром).

Периодическое изменение  $a_k$  по высоте столба воды в ванне проявляется в неравномерном эрозионном воздействии кавитации на полосу алюминиевой фольги, которую устанавливали вертикально в полости ванны над одним из излучателей: следы эрозии в виде сквозных пробоин возникают в тех местах фольги, которые соответствуют областям сжатия в стоячей УЗ волне (рис. 10.13).

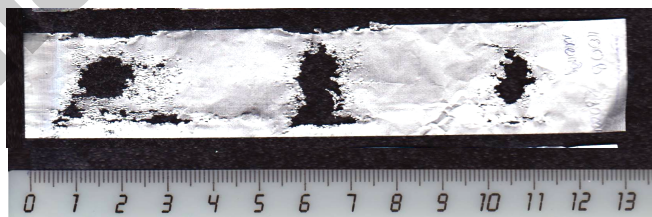


Рис. 10.13. Эрозионное разрушение фольги в результате УЗ обработки

Подобным образом периодическое изменение  $a_k$  находит свое отражение в неравномерной очистке поверхности деталей. На рис. 10.14 показан длиномерный стальной стержень с резьбовой поверхностью (диаметр 8 мм, длина 115 мм), который, будучи вертикально установленным в ванне над одним из излучателей, подвергался очистке от модельного загрязнения в виде смеси глины и моторного масла марки 10W-40 в объемном соотношении 3:1, предварительно нанесенного на его поверхность равномерным по толщине слоем (левая часть стержня в процессе очистки была обращена вниз, т. е. к излучателю). Загрязнение удалялось преимущественно в местах поверхности, соответствующих распределению областей сжатия в УЗ волне.

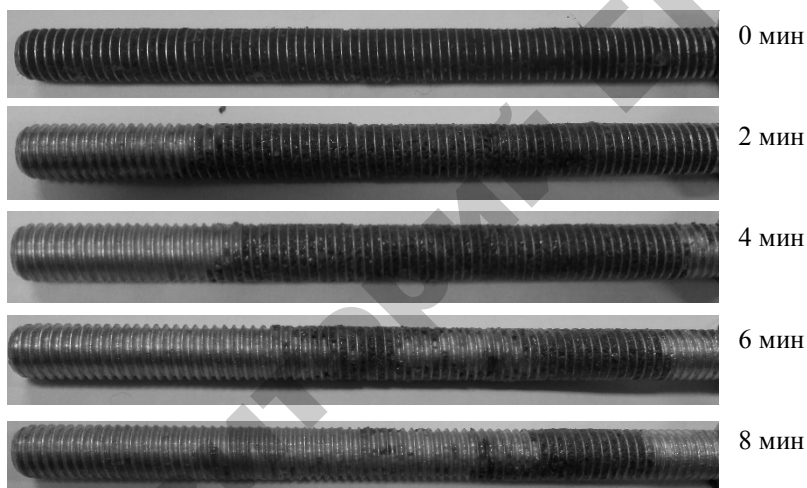


Рис. 10.14. Резьбовая поверхность стержня после УЗ очистки через разные промежутки времени

Анализ выполненных экспериментальных исследований формирования УЗ поля в объеме воды в незагруженной ванне показывает, что  $a_k$  распределяется по высоте столба воды довольно неравномерно. Значения  $a_k$  являются наибольшими вблизи излучателей и уменьшаются по мере удаления от них – у стенок ванны они становятся меньше приблизительно в 1,2 раз, у водной поверхности – в 2 раза и более.

Уменьшение  $a_k$  с удалением от излучателей обусловлено затуханием УЗ волн вследствие их поглощения водой. Оно оказывает влияние на очистку поверхности деталей, расположенных на разном удалении от

излучателя. Это ярко демонстрируется на рис. 10.14: очистка поверхности стержня начинается с его нижней части, расположенной вблизи излучателя, и далее распространяется вверх по всей длине стержня.

Для оценки степени влияния объемно-неоднородного распределения  $a_k$  на процесс удаления загрязнений были выполнены эксперименты по очистке тестовых образцов в виде стальных цилиндров диаметром 20 мм и длиной 43 мм (рис. 10.15). На цилиндрической поверхности образцов были выточены кольцевые канавки шириной 1,3 мм и глубиной 4 мм, которые заполняли тем же модельным загрязнением в виде смеси глины и моторного масла марки 10W-40 в объемном соотношении 3:1. Образцы, ориентированные продольной осью в горизонтальном направлении, размещали в воде, заполняющей ванну ( $H_0 = 14$  см), над одним из излучателей на разном удалении от него. Во время УЗ обработки образцы периодически извлекали из воды и фотографировали. На увеличенных фотоизображениях образцов измеряли высоту  $h$  слоя загрязнения в канавках.

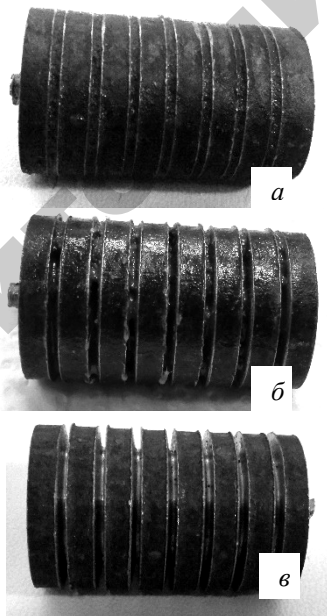
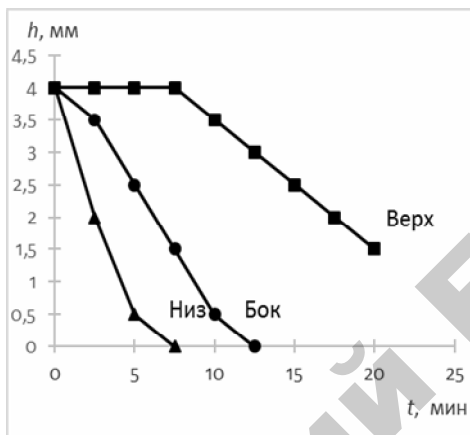
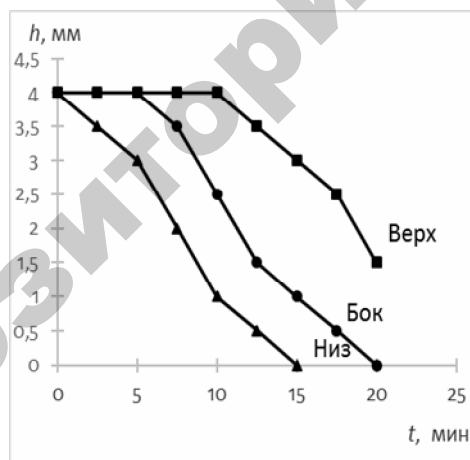


Рис. 10.15. Цилиндрические тест-образцы на разных стадиях очистки:  
а – канавки полностью загрязнены; б – частично загрязнены;  
в – полностью очищены

Эксперименты показали, что  $h$  уменьшается тем быстрее, чем меньше  $H$  (рис. 10.16). Так, на нижней стороне цилиндра (обращенной в сторону излучателя) слой загрязнения полностью удаляется через 7,5 мин обработки при  $H = 2$  см и через 15 мин при  $H = 5$  см.



а



б

Рис. 10.16. Уменьшение высоты  $h$  слоя загрязнения в канавках цилиндрических тестовых образцов во времени при: а –  $H = 2$  см; б –  $H = 5$  см

Эксперименты также показали, что скорость удаления загрязнений зависит не только от расстояния очищаемой поверхности от излучателя, но и от ее ориентации относительно излучателя, а именно:

$h$  для нижней стороны образца уменьшается гораздо быстрее, чем для верхней стороны. Так, если на нижней стороне загрязнение полностью удаляется через 7,5 мин обработки, то на верхней оно удаляется приблизительно наполовину через 20 мин (при  $H = 2$  см).

Такая неравномерная очистка участков поверхности очищаемого объекта, различным образом ориентированных относительно излучателя, обусловлена неоднородным распределением  $a_k$  в окрестности этого объекта, который представляет собой препятствие на пути распределения УЗ волн, вызывающее их рассеяние.

Для исследования характера распределения  $a_k$  в окрестности одиночного препятствия были выполнены эксперименты, в которых в качестве препятствия использовали пластмассовые диски толщиной 3 мм с разными диаметрами  $D$ . Диски размещали горизонтально в воде, заполняющей ванну ( $H_0 = 13$  см), в центральной части полости ванны (между излучателями) на расстоянии 7,5 см от дна ванны. Щуп располагали над верхней стороной дисков (обращенной в сторону водной поверхности) на расстоянии 2–3 мм от дисков. Зависимость  $a_k(D)$  представлена на рис. 10.17 (значение  $D = 0$  соответствует случаю отсутствия диска). В результате экспериментов установлено, что за дисками образуется область акустической тени, характеризующаяся уменьшенными значениями  $a_k$ , причем эти значения тем меньше, чем больше  $D$ . Так,  $a_k$  при  $D = 10$  см в 2,5 раза меньше, чем при  $D = 0$ . Образование акустической тени за препятствием связано с дифракцией УЗ волн.

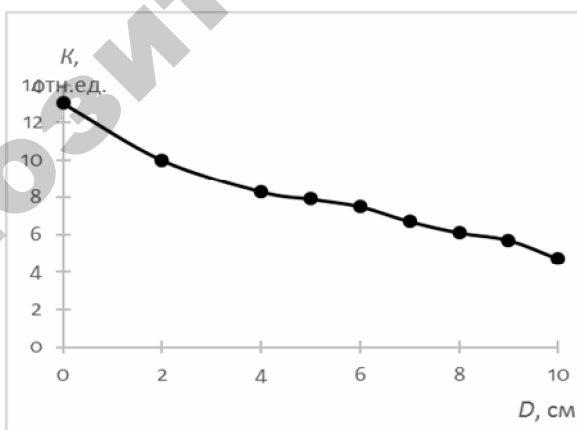


Рис. 10.17. Зависимость активности кавитации  $a_k$  от диаметра дисков  $D$

При наличии на пути распространения УЗ волн не одного, а множества препятствий, волны подвергаются многократному рассеянию.

Для исследования особенностей распределения  $a_k$  в объеме воды в ванне в условиях многократного рассеяния УЗ волн были выполнены эксперименты, в которых в качестве препятствий использовали диски из плотной резины диаметром 6 см и толщиной 2 см. Диски, ориентированные горизонтально, размещали в полости ванны в три слоя.

В верхнем и нижнем располагалось по три диска, уложенных в один ряд по длине полости ванны, в среднем слое – шесть дисков, уложенных в два ряда. В пределах каждого слоя диски размещали преимущественно в центральной части полости ванны, т. е. над излучателями. Диски, находящиеся в соседних слоях, частично перекрывали друг друга. Расстояние между соседними слоями, между нижним слоем и дном ванны составляло 2 см. При проведении измерений  $a_k$  щуп кавитометра погружали в воду в зазорах между дисками. Типичная кривая зависимости  $a_k(H)$  для загруженной ванны ( $H_0 = 14$  см) представлена на рис. 10.18.

Сравнивая эту кривую с аналогичной кривой, полученной для незагруженной ванны, можно отметить следующее.

Во-первых, кривая  $a_k(H)$  в случае загруженной ванны расположена значительно ниже, чем в случае незагруженной ванны, т. е. загрузка ванны в целом приводит к существенному снижению значений  $a_k$ .

Во-вторых, кривая  $a_k(H)$  в случае загруженной ванны идет менее круто, чем в случае незагруженной ванны. Казалось бы, это должно приводить к уменьшению различий в значениях  $a_k$  вблизи излучателей и у водной поверхности – соответственно  $a_{к.из}$  и  $a_{к.вп}$ . Однако на самом деле имеет место обратная картина: загрузка ванны приводит к увеличению различий в указанных значениях, что объясняется их общим снижением. Действительно, о степени влияния загрузки ванны на уменьшение  $a_k$  по высоте столба воды можно судить по величине соотношения  $\gamma_3/\gamma_{нз}$ , где  $\gamma_3 = (a_{к.из}/a_{к.вп})_3$  – случай загруженной ванны и  $\gamma_{нз} = (a_{к.из}/a_{к.вп})_{нз}$  – случай незагруженной ванны. С учетом усредненных результатов ряда измерений, выполненных кавитометром, получаем:  $\gamma_3 = 2,9$  и  $\gamma_{нз} = 2,2$  и, соответственно,  $\gamma_3/\gamma_{нз} \approx 1,3$ . Таким образом, уменьшение  $a_k$  по высоте столба воды для загруженной ванны в 1,3 раза больше, чем для незагруженной.

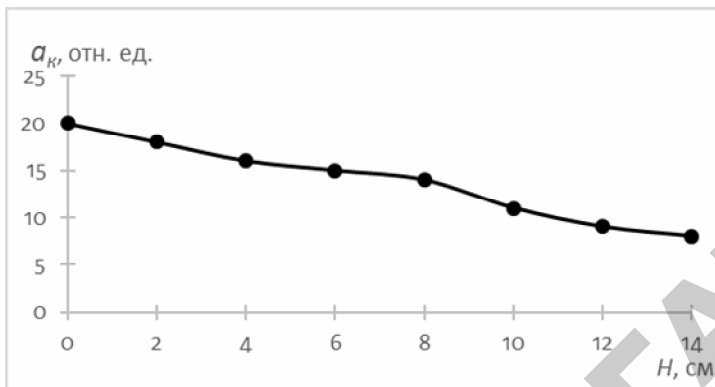


Рис. 10.18. Зависимость активности кавитации  $a_k$  от расстояния  $H$  от излучателей в ванне, загруженной дисками

Для исследования влияния неоднородного распределения  $a_k$  по высоте столба воды в ванне на равномерность очистки загруженных в ванну резиновых дисков были выполнены эксперименты, в которых на плоские поверхности дисков (нижнюю и верхнюю) в их центральной части предварительно наносили модельные загрязнения в виде смеси глины и нигрола в объемном соотношении 3:1. Загрязнением покрывали небольшие участки поверхности в форме кружков диаметром 15 мм, для чего использовали специально подготовленный трафарет. Толщина слоя загрязнения составляла 1 мм. Длительность УЗ очистки составляла 5 мин. Как показали визуальные наблюдения, загрязнения удаляются крайне неравномерно: быстрее подвергаются очистке поверхности, обращенные вниз, т. е. в сторону излучателей, причем, у дисков, расположенных ближе к излучателям. Приблизительная оценка степени удаления загрязнений с поверхности дисков в процентном выражении представлена в табл. 10.1 (100 % – загрязнение удалено полностью, 0 % – загрязнение практически не удалено, т. е. осталось в исходном состоянии).

Активность кавитации изменяется пропорционально интенсивности УЗ-волн [322], которая, как известно, уменьшается по экспоненциальному закону с увеличением расстояния  $H$  от излучателя в результате поглощения УЗ волн водой [124]. Соответственно, с увеличением  $H$  по такому же закону уменьшается и активность кавитации.

Таким образом, зависимость  $a_k(H)$ , представленная нисходящей серединной кривой для незагруженной ванны (см. рис. 10.12), имеет следующий вид:

$$a_k = a_{k0} e^{-kH}, \quad (10.9)$$

где  $a_{k0}$  – активность кавитации у поверхности излучателя;  $k$  – коэффициент снижения активности кавитации в результате поглощения УЗ волн водой: чем больше  $k$ , тем сильнее снижается  $a_k$ . При уменьшении  $a_k$  в  $e$  раз показатель степени в (1)  $kH = 1$ , откуда следует, что  $k = 1/H$ .

Итак, коэффициент поглощения  $k$  обратно пропорционален расстоянию распространения УЗ волны, на котором уровень кавитации убывает в  $e$  раз.

Таблица 10.1  
Степень удаления загрязнений с поверхности дисков, %

Слой расположения дисков	Ориентация поверхности дисков	
	Верхняя	Нижняя
Верхний	0	20–30
Средний	10–20	100
Нижний	50–60	100

Зависимость  $a_k(H)$ , представленная нисходящей затухающей синусоидальной кривой для незагруженной ванны на рис. 10.12, может быть описана следующим эмпирическим уравнением:

$$a_k = [a_{k0} + n \sin(mH)] e^{-kH}. \quad (10.10)$$

Здесь  $n$  и  $m$  – параметры, определяющие амплитуду и частоту синусоидальной кривой, соответственно. Чем меньше  $n$ , тем меньше амплитуда. Чем меньше  $m$ , тем меньше частота. При  $n \rightarrow 0$  и/или  $m \rightarrow 0$  нисходящая затухающая синусоидальная кривая (2) вырождается в нисходящую серединную кривую (1).

Коэффициент  $k^*$  определяет крутизну снижения серединной кривой и одновременно крутизну уменьшения амплитуды синусоидальной кривой. Чем меньше  $k^*$ , тем круче опускается серединная



кривая и тем круче уменьшается амплитуда волн с увеличением расстояния  $H$ .

Зависимость  $a_{\kappa}(H)$ , представленная нисходящей кривой для загруженной ванны на рис. 10.18, описывается выражением

$$a_{\kappa} = Q a_{\kappa 0} e^{-qkH}, \quad (10.11)$$

где  $Q$  и  $q$  – безразмерные коэффициенты, определяемые экспериментальным путем. Коэффициент  $Q$  определяет степень снижения положения кривой  $a_{\kappa}(H)$ , а коэффициент  $q$  – степень снижения крутизны кривой  $a_{\kappa}(H)$  в результате загрузки ванны очищаемыми объектами.

Сравнительный анализ уравнений (10.9) и (10.11) показывает, что они в формальном отношении подобны друг другу.

Уравнение (10.9) описывает серединную кривую зависимости  $a_{\kappa}(H)$ , показанную на рис. 10.12, при условии  $a_{\kappa 0} = 31,067$  и  $k = 0,065$  и, соответственно, имеет вид

$$a_{\kappa} = 31,067 e^{-0,065H}. \quad (10.12)$$

В свою очередь, уравнение (10.11) описывает кривую зависимость  $a_{\kappa}(H)$ , показанную на рис. 10.18, при условии  $Q a_{\kappa 0} = 21,04$  и  $qk = 0,066$  и, соответственно, имеет вид

$$a_{\kappa} = 21,04 e^{-0,066H}. \quad (10.13)$$

Таким образом, как показали результаты исследований, в объеме жидкости, заполняющей УЗ ванну, оснащенную донными излучателями, активность кавитации  $a_{\kappa}$  распределяется весьма неоднородно, что обусловлено затуханием УЗ волн вследствие их поглощения водой, наличием чередующихся областей разрежения и сжатия вдоль направления распространения волн, рассеянием волн на очищаемых изделиях. Это приводит к существенно-неравномерному удалению загрязнений с поверхности разных изделий, погруженных в ванну, а также с разных участков поверхности одного и того же изделия.

Дополнительным подтверждением неравномерного удаления загрязнений под действием кавитации являются приведенные ниже примеры экспериментов по очистке деталей сельскохозяйственной техники от масляно-грунтовых загрязнений [321].

Пример 1. Стальную зубчатую рейку топливного насоса УТН-5 (используемого в дизельных двигателях тракторов и грузовых автомобилей), имеющую длину 18 см и высоту зубьев 1,5 мм, размещали вертикально в УЗ ванне над одним из излучателей при  $H_0 = 14$  см. Предварительно на зубчатую поверхность рейки наносили равномерный по толщине слой модельное загрязнение в виде смеси глины (3 части) и нигрола (1 часть). В процессе УЗ очистки рейку периодически (через 5 мин) извлекали из ванны и фотографировали очищаемую поверхность (рис. 10.19). Как показал эксперимент, загрязнение удалялось в первую очередь с нижнего конца рейки, расположенного вблизи излучателя (на рис. 10.19 этот конец расположен слева), а затем со временем очищенная область распространялась вверх по всей длине рейки.

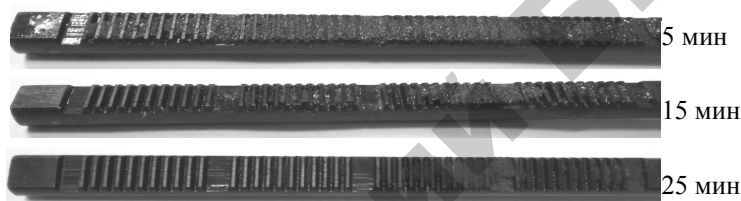


Рис. 10.19. Поверхность зубчатой рейки спустя разные периоды УЗ очистки

Пример 2. Стальную крышку топливного насоса УТН-5 – трапециевидную пластину толщиной 9 мм с длиной оснований 8 см и 8,5 см и боковых сторон 11 см размещали горизонтально в УЗ ванне при  $H_0 = 13$  см над излучателями на расстоянии 6 см от них. На обе стороны крышки в ее центральной и периферийной частях предварительно наносили модельное загрязнение (то же, что и в примере 1). Загрязнением покрывали небольшие участки поверхности крышки в форме кружков диаметром 15 мм, для чего использовали специально подготовленный трафарет (рис. 10.20). Толщина слоя загрязнения составляла 1 мм. При размещении крышки в ванне участок загрязнения в периферийной части располагался над одним из излучателей, а участок загрязнения в центральной части – между излучателями. В разных опытах крышку ориентировали вогнутостью вверх или вниз. Во время очистки крышку время от времени извлекали и визуально контролировали наличие загрязнений, фиксируя длительность УЗ обработки, максимальное значение которой составляло 5 мин.

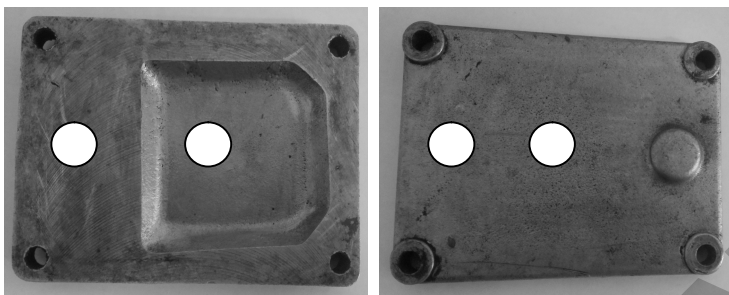


Рис. 10.20. Две стороны крышки топливного насоса (участки нанесенного загрязнения обозначены белыми кружками)

Результаты очистки крышки представлены в табл. 10.2. Загрязнение удаляется быстрее с поверхности, обращенной вниз, т. е. в сторону излучателей, чем с поверхности, обращенной вверх. На поверхности, обращенной вниз, загрязнение удаляется быстрее в периферийной части, чем в центральной. Это обусловлено тем, что участок загрязнения в периферийной части, располагаясь над излучателем, подвергается большему УЗ воздействию. На поверхности, обращенной вверх, загрязнение также удаляется быстрее в периферийной части, чем в центральной. Это, в свою очередь, обусловлено тем, что участок загрязнения в центральной части, оказывается в области акустической тени, где УЗ воздействие весьма незначительно. Ориентация крышки вогнутостью вверх или вниз практически не оказывала влияния на скорость удаления загрязнения, что может быть связано с малой величиной вогнутости.

Таблица 10.2

Степень удаления загрязнения на разных участках поверхности крышки топливного насоса при разной длительности  $t$  УЗ обработки

Центральная часть крышки	Периферийная часть крышки
Поверхность крышки, обращенная вверх	
Загрязнение почти не удаляется ( $t = 5$ мин)	Загрязнение удаляется наполовину ( $t = 3$ мин)
Поверхность крышки, обращенная вниз	
Загрязнение удаляется полностью ( $t = 3$ мин)	Загрязнение удаляется полностью ( $t = 2$ мин)

Аналогично неравномерное удаление загрязнений наблюдается и с поверхности плодоовощных продуктов, о чем свидетельствуют результаты экспериментов, описанных в работе [321], где в качестве загружаемых в УЗ ванну объектов использовали яблоки.

На рис. 10.21 представлено распределение  $a_k$  по вертикали в незагруженной (кривая 1,  $H_0 = 13$  см) и загруженной (кривая 2,  $H_0 = 14$  см) ванне. При проведении экспериментов с загруженной ванной ее полость заполняли яблоками размером 4–5 см, располагая их в три слоя – по семь яблок в каждом слое (нижнем, среднем и верхнем). Положение яблок в воде фиксировали с помощью проволочного каркасного ограничителя, который предотвращал их всплытие. При проведении измерений  $a_k$  щуп помещали в воду в зазорах между яблоками.

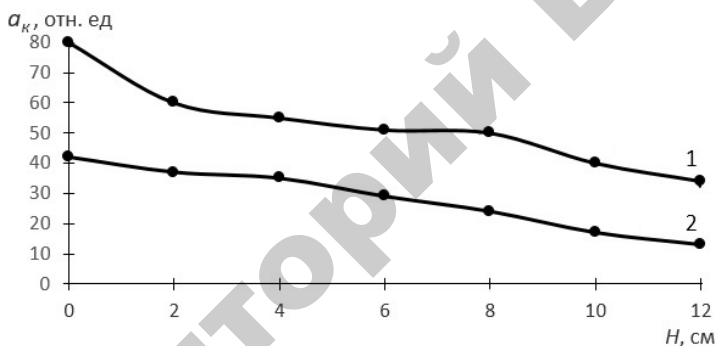


Рис. 10.21. Изменение  $a_k$  вдоль вертикального направления:  
1 – в незагруженной ванне; 2 – в загруженной ванне

В незагруженной ванне наблюдается довольно значительное уменьшение значений  $a_k$  с удалением от излучателей: различие в значениях  $a_k$  вблизи излучателей и у водной поверхности доходит приблизительно до 2 раз. Кривая 1 имеет характерную волнообразную форму, что свидетельствует о наличии периодического изменения значений  $a_k$  по высоте столба воды.

В загруженной ванне, как и в незагруженной, значения  $a_k$  уменьшаются с удалением от излучателей по вертикали. Вместе с тем в загруженной ванне наблюдается общее снижение  $a_k$  (приблизительно в 2 раза) по сравнению с незагруженной ванной. Об этом свидетельствует положение кривой 2, которая лежит значительно

ниже кривой 1. Кроме того, у кривой 2 в отличие от кривой 1 практически не наблюдается волнообразной формы. Указанные особенности зависимости  $a_k(H)$  для загруженной ванны обусловлены многократным рассеянием УЗ волн множеством яблок.

Иная картина распределения  $a_k$  имеет место в случае однократного рассеяния УЗ волн, когда в ванну погружено одиночное яблоко. При проведении соответствующих экспериментов яблоки размером 6–7 см располагали поодиночке в воде при  $H_0 = 13$  см на расстоянии 5 см от дна ванны. Схема измерений  $a_k$  показана на рис. 10.22. Измеряли значения  $a_k$  за яблоком, т. е. у верхней поверхности яблока (в точке А) и перед яблоком, т. е. у нижней поверхности яблока (в точке Б) (для этого в яблоке делали сквозное отверстие, через которое проходил шуп кавитометра). В обоих случаях концевую часть щупа располагали в непосредственной близости от яблока (на расстоянии 2–3 мм). Также измеряли значения  $a_k$  в точках А и Б без яблока.

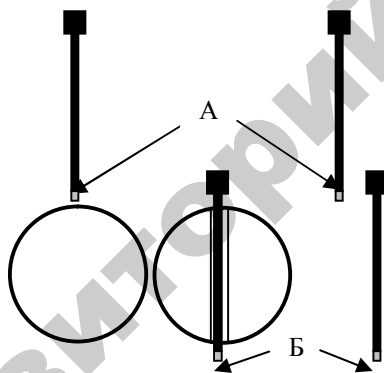


Рис. 10.22. Схема измерений  $a_k$  вблизи одиночного яблока

Результаты измерений представлены в табл. 10.3. Там же даны отношения значений  $a_k$  в точках Б и А ( $a_{кБ}/a_{кА}$ ), показывающие, во сколько раз активность кавитации в точке Б больше, чем в точке А.

Анализ полученных результатов показывает, что значения  $a_k$  вблизи яблока, помещенного в воду в УЗ ванне, неодинаковы: у нижней поверхности яблока они выше, чем у верхней. Это различие обусловлено не только затуханием УЗ волн по мере их удаления от излучателя, но и тем, что яблоко играет роль препятствия,

рассеивающего УЗ волны. О характере распределения  $a_k$  в окрестности яблока можно судить по соотношению значений  $a_{kB}/a_{kA}$  для случаев наличия и отсутствия яблок, представленных в таблице:  $1,31/1,09 = 1,2$ . Таким образом, в результате рассеивающего действия яблока значение  $a_k$  у нижней поверхности оказывается на 20 % больше, чем у верхней поверхности.

Таблица 10.3

Результаты измерения  $a_k$  (отн. ед.) вблизи одиночного яблока (см. рис. 10.22)

Условия измерений	Точка измерения		$a_{kB}/a_{kA}$
	А	Б	
Наличие яблока	26	34	1,31
Отсутствие яблока	43	47	1,09

Неоднородности распределения  $a_k$  по объему воды в УЗ ванне являются причиной неравномерного удаления загрязнений с поверхности яблок, подтверждением чему являются представленные ниже примеры экспериментов по УЗ очистке яблок.

Пример 1. Очистка яблок от грунтовых загрязнений.

Яблоки диаметром 6–7 см поодиночке помещали в УЗ ванну (объем воды 3,5 л) над одним из излучателей на расстоянии 5 см от него. Наряду с УЗ очисткой для сравнения проводили обычную мойку яблок. Длительность УЗ очистки и обычной мойки составляла 2 мин. На поверхность яблок предварительно наносили модельное загрязнение, для чего яблоки погружали в водную суспензию почвенного грунта (объемное отношение почвенного грунта к воде 2:3). После извлечения из суспензии яблоки, покрытые грязевой пленкой, высушивали, в результате чего формировалось плотное покрытие из частиц грунта, прочно приставших к поверхности яблок. Во время УЗ очистки и обычной мойки яблоки хаотически перемещали в воде с помощью проволочного захвата. Кроме того, УЗ очистке подвергали яблоки, расположенные неподвижно. При исследовании качества очистки яблок особое внимание обращали на состояние участка поверхности вокруг плодоножки, поскольку этот участок характеризуется наибольшим скоплением загрязнений, осаждаемых из атмосферы.

Фотографии яблок, обработанных в разных условиях, показаны на рис. 10.23. Поверхность яблока в области углубления у плодоножки после обычной мойки полностью не очищается от загрязнений. Также не достигается полная очистка поверхности в области углубления после УЗ обработки в неподвижном состоянии, когда плодоножка постоянно обращена вверх. Практически полная очистка поверхности в области углубления обеспечивается после УЗ обработки в неподвижном состоянии, когда плодоножка постоянно обращена вниз, т. е. в сторону излучателя. Наиболее равномерное и полное удаление загрязнений со всей поверхности яблок происходило после УЗ обработки в условиях хаотического перемещения (достижение состояния полной очистки визуально наблюдалось уже через 30 секунд).

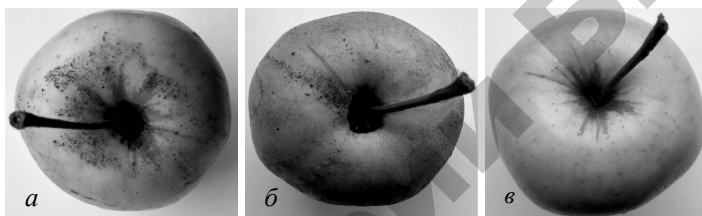


Рис. 10.23. Поверхность яблок в области углубления у плодоножки после очистки в разных условиях:

*а* – обычная мойка с хаотическим перемещением, когда плодоножка попеременно обращается то вниз, то вверх; *б, в* – УЗ очистка в неподвижном состоянии, когда плодоножка постоянно обращена вверх или вниз

Пример 2. Очистка яблок от микробиальных загрязнений [323]. В УЗ ванну загружали партию яблок размером около 5 см. Яблоки размещали в полости ванны в 2 слоя (в каждом по 7 яблок). После завершения укладки яблок ванну заливали водой объемом 2 л. Во время УЗ обработки, длительность которой доходила до 10 мин, яблоки занимали фиксированные положения в объеме воды в ванне. В опытных, а также контрольных (не подвергавшихся обработке) образцах яблок определяли общее количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (МАФАНМ), т. е. общую бактериальную обсемененность. Исследования показали, что эффективность УЗ очистки зависит от местоположения яблок в объеме воды в ванне, а именно: яблоки нижнего слоя (расположенные ближе к излучателям) очищаются от микроорганизмов приблизительно в 2 раза лучше, чем яблоки верхнего слоя.

### **Способы повышения равномерности очистки в УЗ ваннах**

Рассмотренные выше экспериментальные исследования процессов развития кавитации в УЗ ванне, оснащенной донными излучателями, показывают, что уровень кавитации распределяется по объему воды в ванне весьма неоднородно. Причины этого связаны с поглощением УЗ волн водой по мере удаления от излучателей, чередованием областей разрежения и сжатия вдоль направления распространения волн и рассеянием волн на очищаемых предметах. Как следствие, осуществляемая в УЗ ванне очистка характеризуется значительной неравномерностью. Во-первых, степень очистки поверхности в целом зависит от уровня ее расположения относительно донных излучателей: вблизи излучателей очистка идет лучше, чем у поверхности воды. Во-вторых, степень очистки поверхности в целом или ее отдельных участков зависит от расположения очищаемой поверхности или ее отдельных участков относительно областей разрежения и сжатия. В-третьих, степень очистки отдельных участков поверхности зависит от их ориентации относительно донных излучателей: загрязнения удаляются лучше на участках поверхности, ориентированных вниз, т. е. в сторону излучателей.

На практике повышение равномерности УЗ очистки достигается двумя способами [318]. Первый способ заключается в повышении объемной однородности УЗ поля с помощью специальных конструктивных приемов, в частности, за счет использования системы излучателей, устанавливаемых в определенном порядке на противоположных стенках полости ванны. Однако реализация этого способа связана с необходимостью усложнения конструкции ванн, что ведет к увеличению их стоимости. К тому же этот способ не решает полностью проблему обеспечения равномерной очистки. Более эффективным является второй способ, который заключается в использовании специальных приспособлений, обеспечивающих повышение равномерности очистки в объемно-неоднородном УЗ поле путем регулируемого изменения расположения очищаемых предметов в объеме воды в ванне.

В обычно используемых конструкциях УЗ ванн роль дна выполняет излучающая диафрагма электроакустического преобразователя [318]. При этом оказывается довольно большой неравномерность распределения акустического давления, создаваемая преобразователем: в центре ванны над диафрагмой давление имеет максимальное значение и уменьшается к краю мембраны. Для обеспечения равномерности УЗ поля в объеме ванны используют



изгибно-колеблющуюся диафрагму, возбуждаемую системой распределенных преобразователей, установленных попарно в пучностях изгибных колебаний пластины. Однако акустическое давление над такой УЗ колебательной системой также имеет максимумы и минимумы, а сборка и настройка этих систем чрезвычайно сложна.

Более перспективно применять модульную систему распределенных преобразователей, установленных в шахматном порядке так, что если мысленно провести прямые через их центры, то образуется решетка треугольной структуры с длиной стороны, кратной  $n\lambda/\sqrt{3}$ , где  $n$  – целые числа 1,2,3...;  $\lambda$  – длина УЗ волны в жидкой среде [318] (рис. 10.24). Такое расположение преобразователей обеспечивает создание однородного по площади УЗ поля при трехфазном возбуждении за счет суперпозиции УЗ волн, излучаемых преобразователями, подключенными к разным каналам УЗ генератора. Расстояние между центрами в группе кратно длине УЗ волны  $\lambda$ . УЗ-преобразователи в каждой группе электрически соединены параллельно и подключены к соответствующим каналам А, В или С модульного УЗ-генератора.

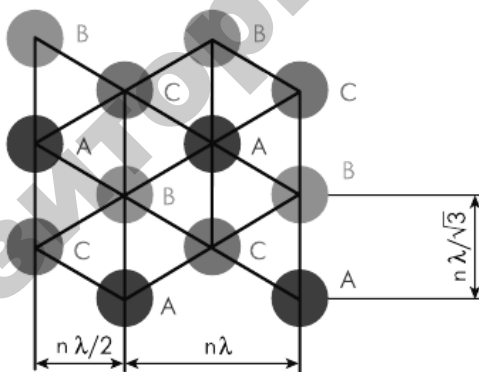


Рис. 10.24. Расположение УЗ-преобразователей:

А, В, С – преобразователи, подключенные к каналам А, В и С УЗ-генератора

Канал представлен транзисторным автогенератором, который работает в ключевом режиме. Схема питания каждого канала двухполупериодная, без фильтрации, благодаря чему осуществляется амплитудная и частотная (100 Гц) модуляция выходного сигнала,

который представлен суммой трех гармоник (с основной  $\omega$  и боковыми частотами  $\omega \pm 100$  Гц).

Выпрямители блоков питания через понижающие трансформаторы подключены к соответствующим фазам трехфазной сети переменного тока, так что сигналы на выходе каналов оказываются сдвинутыми по фазе на  $120^\circ$ , а на преобразователи поступают группы импульсов УЗ колебаний, сдвинутые по фазе на тот же угол. Область наибольшего акустического давления, соответствующая максимальному напряжению на преобразователе, последовательно перемещается от преобразователя А к В и далее к С (или наоборот при изменении фаз каналов) в каждой группе. В результате возникают направленные макропотоки жидкости из зоны большего в зону меньшего акустического давления.

Для изменения расположения очищаемых деталей в УЗ ванне служат различные приспособления. Для усреднения УЗ воздействия по глубине ванны детали размещают на сетчатых корзинах либо закрепляют на кассетах, которые выполняют с возможностью вертикального возвратно-поступательного перемещения [318, 324]. Для обеспечения двухсторонней очистки деталей используют устройства, поворачивающие детали относительно излучателей [7–9,17]. Мелкие детали загружают насыпью в сетчатые барабаны, которые вращают либо качают относительно излучателей [130, 325]. При этом детали непрерывно переворачиваются, так что практически все участки их поверхности подвергаются равномерному УЗ воздействию. При использовании таких приспособлений необходимо иметь в виду, что они (так же как и детали) оказывают экранирующее влияние на УЗ волны, поэтому их надо выполнять из редкой проволочной сетки [317].

В работе [326] предложено устройство УЗА-6 (рис. 10.25), предназначенное для УЗ очистки деталей, имеющих форму тел вращения. В этом устройстве деталь вращается вокруг горизонтальной оси, так что все участки ее поверхности последовательно проходят внутри УЗ ванны, подвергаясь очистке. Вращение осуществляется с помощью электродвигателя, связанного клиноременной передачей с редуктором и накидной муфтой, охватывающей вал очищаемого изделия.

Приспособления, подобные тем, которые были рассмотрены выше, могут с успехом использоваться для УЗ очистки яблок, а также других плодоовощных продуктов [321]. При этом следует учитывать отличительную особенность их применения, связанную

с тем, что плодовоовощные продукты легче воды, в то время как детали сельхозтехники, наоборот, значительно тяжелее. Отсюда вытекает важное требование к конструкции и условиям применения этих приспособлений, а именно: они должны предотвращать всплытие яблок на поверхность воды (в случае же очистки деталей они должны предотвращать погружение деталей на дно ванны и, особенно, на поверхность излучателей).

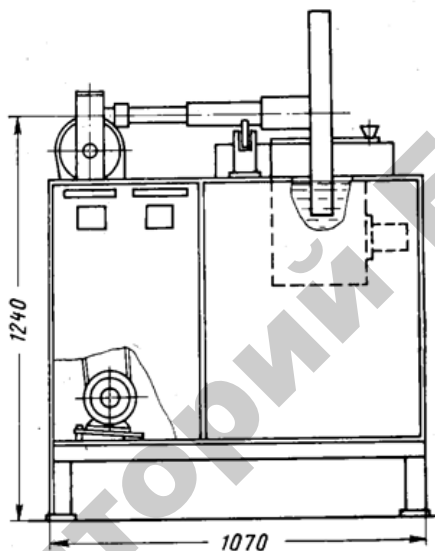


Рис. 10.25. Ультразвуковой аппарат УЗА-6

Для УЗ очистки яблок можно эффективно использовать перемешивающие устройства барабанного типа, о чем свидетельствуют результаты специально выполненных экспериментов, в ходе которых барабан каркасной конструкции, изготовленный из тонкой проволоки, устанавливали в полость УЗ ванны, заполненную водой, и приводили во вращение со скоростью 5–10 оборотов в минуту [321]. При этом загруженные в него яблоки совершали вращательные движения относительно оси барабана. Одновременно они вращались относительно собственных осей (за счет контактов друг с другом и с элементами конструкции барабана). Кроме того, они могли хаотично перемещаться в небольших пределах относительно друг друга. В результате яблоки в процессе УЗ очистки

время от времени оказывались то в нижней, то в верхней части объема воды, а также ориентировались разными участками поверхности в сторону излучателей. Благодаря этому достигалась равномерная очистка всей поверхности каждого яблока.

### **10.3. Ультразвуковые моечно-очистные МММ системы**

В последние годы получило развитие УЗ моечно-очистное оборудование нового типа – так называемые МММ (Multi-frequency, Multimode, Modulated – многочастотные, многомодовые, модулированные) системы [327].

Традиционные УЗ преобразователи осциллируют на некоторой одной фиксированной частоте или смеси фиксированных частот. Этот обычный режим колебаний может иметь место, когда один или несколько осевых, боковых или любых иных пространственных размеров преобразователя периодически изменяются по величине в соответствии с некоторой простой синусоидальной функцией. Традиционные УЗ источники, используемые в промышленности, воспринимают на входе колебательный электрический сигнал и формируют на выходе сигнал в виде периодического механического сжатия/расширения, пропорционального по амплитуде входному сигналу. При этом колебания осуществляются на одной постоянной рабочей частоте или в пределах узкой полосы частот, окружающих центральную рабочую частоту.

В противоположность этому УЗ МММ система генерирует механические колебания в очень широком диапазоне частот [327]. Эти колебания могут подвергаться управляемому частотному, фазовому и амплитудному модулированию. Благодаря этому предотвращается появление стационарных или стоячих волн, типичных для традиционных УЗ систем, работающих на одной частоте.

МММ УЗ системы обеспечивают однородное распределение УЗ энергии по всему объему моющей жидкости и, как следствие, равномерную очистку поверхности.

В работе [328] использовали тестовые образцы алюминиевой фольги, которые подвергались кавитационной обработке в ванне УЗ МММ установки. Об однородности УЗ поля в заполняющей ванну жидкости свидетельствовало равномерное распределение следов кавитационного воздействия по всей поверхности фольги.

## **11. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

### **11.1. Ремонт и техническое обслуживание сельскохозяйственной техники**

Моечно-очистная обработка является одной из важнейших составных частей ремонтно-обслуживающего производства. Качество очистки деталей определяется степенью полноты удаления всех загрязнений с поверхности деталей. Качественно выполненная очистка позволяет выявить реальное техническое состояние деталей, установить степень их пригодности для восстановления и назначить способ устранения дефектов. В связи с усложнением конструкции сельскохозяйственной техники, повышением точности изготовления ее деталей возрастают требования к качеству очистки. Вместе с тем увеличивается трудоемкость очистки деталей при ремонте, которая на сегодняшний день доходит до 10 % от общей трудоемкости ремонта [100]. Поэтому приобретает особую важность выбор рациональных технологий моечно-очистной обработки. Среди них наиболее перспективными являются кавитационные технологии, которые наиболее полно отвечают специфическим требованиям небольших сервисных центров АПК [329]. Для очистки деталей, имеющих открытые протяженные поверхности, эффективно использовать технологии гидрокавитационной очистки. Однако они оказываются недостаточными для удаления загрязнений с труднодоступных участков поверхностей: углублений, отверстий, каналов и т. п. Для удаления загрязнений с таких участков используются технологии акустико-кавитационной очистки. УЗ очистка может использоваться в ремонтно-обслуживающем производстве для удаления не только эксплуатационных загрязнений, но и технологических загрязнений: притирочных паст, шаржированных частиц.

Важным направлением повышения эффективности кавитационных моечно-очистных процессов является разработка методических принципов подбора рациональных параметров этих процессов с учетом особенностей очищаемых поверхностей и используемого для очистки оборудования.

В работе [330] предложена методика назначения технологических режимов гидродинамической кавитационной очистки с аэрированием (там же приведен алгоритм реализации предложенной методики и пример расчета). Разработанную методику рекомендовано использовать при проектировании и совершенствовании технологии гидродинамической кавитационной очистки с целью определения энергоэффективных и ресурсосберегающих технологических режимов осуществления процесса очистки.

В работе [331] предложена методика выбора оборудования и математических моделей технологического процесса УЗ очистки деталей с учетом влияния масштабных факторов режимов проведения очистных работ. В технологическом процессе основным показателем качества является степень очистки, которая определяется в два этапа: первому этапу очистки соответствует удаление 80 % загрязнения за 20 % времени технологического цикла очистки, а второму этапу – удаление оставшегося загрязнения в течение оставшегося времени. Экспериментальный анализ технологического процесса показал, что очистка на первом этапе слабо зависит от масштабных факторов, в то время как на втором этапе необходим учет масштабных факторов. Заданная степень очистки определяется оптимальным временем реализации процесса и амплитудой колебаний УЗ излучателя и зависит от выбранного критерия оптимизации, отражающего затраты на реализацию технологического процесса.

Перспективным направлением совершенствования кавитационных моечно-очистных технологий является их автоматизация. В работе [137] в качестве основных направлений автоматизации УЗ очистки предложено автоматическое поддержание заданных параметров технологического процесса обработки и автоматическое отображение этих параметров в реальном времени, что предполагает обеспечение работы УЗ моечно-очистного оборудования по специально заданной программе или в интерактивном режиме, в том числе при управлении процессом от внешнего персонального компьютера.

В работе [331] рассмотрены вопросы автоматизации технологического процесса УЗ очистки деталей в производственных условиях. Схема автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) УЗ очистки показана на рис. 11.1.



Рис. 11.1. Схема АСУТП УЗ очистки

На АСУТП определяются параметры качества очистки и интенсивность УЗ воздействия с учетом свойств используемых моющих жидкостей. АСУТП реализует функции повышения эффективности технологического процесса с учетом требований УЗ очистки, определяет взаимодействие элементов процесса; осуществляет сбор и систематизацию информации процесса; минимизирует отклонения технологических параметров от оптимальных значений. Главной задачей АСУТП является достижение наилучшего результата при оптимальной продолжительности очистки. Увеличение времени УЗ воздействия на очищаемую деталь может привести к эрозионному разрушению детали (после того, как с ее поверхности будет удалено загрязнение), а его уменьшение – к неполной очистке. Оптимальная продолжительность очистки определяется выбором структуры элементов технологического процесса и соответствия их функциональных возможностей тем параметрам, которые необходимы для получения максимального эффекта очистки.

Одним из возможных технологических подходов к эффективному использованию УЗ моечно-очистного оборудования является включение его в состав передвижной лаборатории-мастерской, служащей для технического обслуживания и ремонта автотранспортной техники (рис. 11.2) [332]. Такая лаборатория-мастерская оснащена комплексом специальных устройств, благодаря чему с ее помощью можно устранять различные неисправности машин непосредственно в полевых условиях.

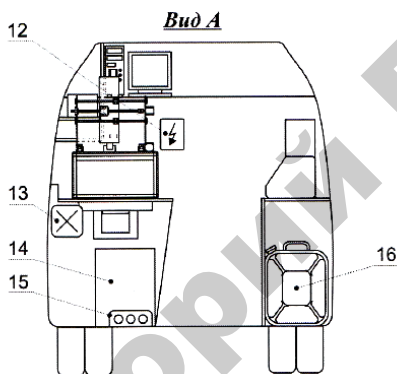
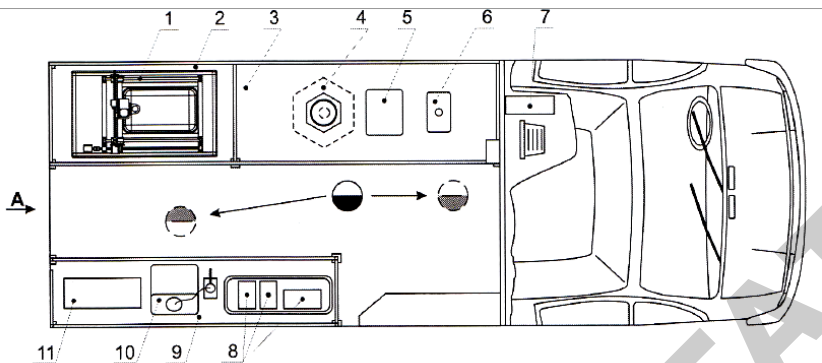
## 11.2. Хранение и переработка плодоовощных продуктов

Плодоовощные продукты перед их использованием в пищу в свежем виде, перед переработкой, а также перед отправкой на хранение подвергают моечно-очистной обработке, в процессе которой с их поверхности удаляются различные загрязнения: пыль и остатки почвы, микроорганизмы, остатки пестицидов и насекомых [333–337]. Моечно-очистная обработка продуктов проводится, прежде всего, в санитарно-гигиенических целях. При этом основное значение имеет дезинфекция, в результате которой происходит обеззараживание микроорганизмов, вызывающих микробиологическую порчу продуктов.

Известно большое разнообразие химических дезинфицирующих средств, применяемых для обработки продуктов. Среди них особенно большое распространение получили жидкие дезинфицирующие средства. Так, для снижения потерь от физиологических и микробиологических заболеваний при длительном хранении плоды яблок перед закладкой на хранение обрабатываются комплексным препаратом, представляющим собой водный раствор диметилсульфоксида (10 %) и аскорбиновой кислоты (1 %) [333]. Также для дезинфекции используют средства физической обработки: ультрафиолетовое, ионизирующее, электромагнитное СВЧ облучение и др. Они более безопасны для потребителя в отличие от химических средств, остаточные количества которых могут попадать на поверхность продуктов и проникать внутрь их [333]. Нередко химические и физические средства дезинфекции продуктов применяют совместно. Например, для увеличения срока хранения свежих яблок, предназначенных для космического питания, предложен способ их обработки, включающий мойку в проточной питьевой воде, последовательную выдержку в растворах перманганата калия и лимонной кислоты, ультрафиолетовое облучение и последующую поштучную упаковку в асептических условиях [334].

Перспективным способом обработки плодоовощных продуктов является УЗ моечно-очистная обработка, обеспечивающая значительный дезинфицирующий эффект. Однако до сих пор она не получила применения в промышленных масштабах, что объясняется рядом причин [85].





*Рис. 11.2.* Планировка размещения комплекса высокоэффективного оборудования для разборки и очистки в передвижной ультразвуковой лаборатории-мастерской на базе автомобиля-фургона «Газель»:

- 1 – установка пространственной очистки средне- и крупногабаритных деталей;
- 2 – слесарная секция верстака; 3 – рабочий стол; 4 – установка для УЗ очистки от загрязнений с сильной адгезией к поверхности на базе цилиндрического излучателя;
- 5 – установка УЗ размочки и предварительной очистки на базе пьезокерамической ванны; 6 – высокоамплитудная УЗ колебательная система для очистки и разборки;
- 7 – персональный компьютер; 8 – стеллаж для измерительного оборудования; 9 – верстак; 10 – стенд диагностики дизельных форсунок;
- 11 – стенд диагностики инжекторов; 12 – электрощит;
- 13 – приточная и вытяжная вентиляции;
- 14 – УЗ генераторы; 15 – разъемы для подключения к электросети;
- 16 – канистры с моющими растворами

Во-первых, дезинфицирующее влияние ультразвука проявляется неодинаково в отношении разных видов продуктов и особенности этого влияния изучены пока недостаточно (систематические

исследования в области УЗ обработки плодоовощных продуктов начали проводиться сравнительно недавно – в последние 15 лет). Во-вторых, производство УЗ моечно-очистного оборудования для пищевой индустрии еще не получило широкого развития и поэтому это оборудование не дошло в полной мере до всех потенциальных потребителей. В-третьих, имеются определенные трудности в адаптации УЗ технологий к существующим линиям производства продуктов питания, в частности, сказывается приверженность производителей продуктов питания традиционным технологиям.

Таким образом, необходимо продолжение исследований и разработок эффективных УЗ моечно-очистных технологий для решения различных проблем в пищевой индустрии, связанных с конкретными плодоовощными продуктами и производственными линиями.

На сегодняшний день экспериментально подтверждена эффективность УЗ дезинфицирующей обработки многих видов плодоовощных продуктов, включая яблоки, сливы, морковь, огурцы, трюфели, помидоры черри, перец, капусту, лук, салат, шпинат, петрушку, мяту, клубнику, землянику и др. [85]. Ультразвук способен оказывать эффективное воздействие на продукты как в отдельности (когда кавитация развивается в чистой воде без использования каких-либо химических средств), так и в комбинации с разнообразными химическими дезинфицирующими средствами, такими как органические кислоты, подкисленный хлорид натрия, этанол, диоксид хлора и надуксусная кислота и др. [85]. Такая комбинированная обработка дает синергетический эффект, поскольку ультразвук способствует более активному действию химических средств.

Важнейшее достоинство УЗ моечно-очистной обработки плодоовощных продуктов состоит в том, что она расширяет возможности на пути перехода к зеленым технологиям в пищевой индустрии, поскольку позволяет существенно сократить использование химических дезинфицирующих средств либо полностью отказаться от них. Вместе с тем она имеет определенные преимущества перед другими средствами физической обработки, поскольку предполагает, наряду с кавитацией, использование очистных эффектов обычных моечных процессов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы технологии производства и ремонта автомобилей. Конспект лекций / Сыктывкарский лесной институт – фил-л ГОУВПО «Санкт-Петербург. гос. лес. акад.» [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/2069495/>. – Дата доступа: 5.12.2016.

2. Иванов, В.П. Ремонт машин. Технология, оборудование, организация: учебник / В.П. Иванов. – Новополюцк: УО «ПГУ», 2006. – 468 с.

3. Попов, А.С. Технология наружной очистки сельскохозяйственной техники с обоснованием параметров и режимов работы установки кавитационного действия: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / А.С. Попов. – Рязань, 2001. – С. 19.

4. Борычев, С.Н. Технологии и установка для очистки деталей сельскохозяйственных машин при постановке на хранение / С.Н. Борычев, А.В. Шемякин, В.П. Горбунов, П.С. Сеницин // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 124(10). – С. 1–16.

5. Ясенков, Е.П. Основы проектирования и эксплуатации технологического оборудования: учеб. пособие / Е.П. Ясенков, Л.А. Парфенова. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2005. – 140 с.

6. Тараканова, Н.М. Технология и устройство для очистки сельскохозяйственных машин с использованием абразивно-кавитационной струи: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Н.М. Тараканова. – Рязань, 2011. – 152 с.

7. Планковский, С.И. Анализ существующих методов очистки поверхности лопаток турбин в газотурбинных двигателях / С.И. Планковский, И.И. Головин, Ф.Ф. Сиренко // Авиационно-космическая техника. – 2013 – № 6 (103). – С. 8–14.

8. Тарасов, В.К. Научное обоснование и совершенствование аппаратов для мойки овощей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / В.К. Тарасов. – Москва, 2008. – 26 с.

9. Очистка двигателя и его деталей при ремонте / В. В. Мирутко [и др.] // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: матер. Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. / Минск : БГАТУ, 2014. – Ч. 1. – С. 285–289.

10. Приходько, В.М. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография / В.М. Приходько, И.А. Медеяев, Д.С. Фатюхин. – М.: МАДИ, 2015. – 264 с.

11. Илюхин, А.В. Методы ультразвуковой очистки деталей в условиях основного и ремонтного производства / А.В. Илюхин, А.М. Колбасин, П.А. Цепкин // Институт Государственного управления, права и инновационных технологий (ИГУПИТ). Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – № 3. <http://naukovedenie.ru>

12. Борщ, В.В. Особенности технологии ультразвуковой очистки газовой топливной аппаратуры при ремонте: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В.В. Борщ. – М., 2006. – 24 с.

13. Мачалкин, Ю.Н. Исследование и обоснование технологического процесса очистки деталей дизельной топливной аппаратуры моющими растворами в ультразвуковом поле (на примере распылителей форсунок): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Ю.Н. Мачалкин. – М., 2003. – 24 с.

14. Автоматизация технологических процессов мойки и очистки машин, агрегатов // [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://studopedia.org/8-16386.html>. – Дата доступа : 05.04.2017.

15. Технология производства комплектующих систем газотеплоснабжения и воздухообмена : учеб. пособие / В.В. Масловский [и др.]; под общ. ред. В.В. Масловского. – Харьков: ХНАГХ, 2008. – 252 с.

16. Юдаков, Е.Г. Разработка технологии и оборудования для ультразвуковой очистки корпусных деталей автотракторных двигателей: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.08 / Е.Г. Юдаков. – М., 2013. – 19 с.

17. Михасенок, О.Я. Очистка пресс-форм /О.Я. Михасенок // Полимерные материалы. – 2005. – Вып. 3. – С. 20–13.

18. Панов, А.П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей /А.П. Панов. – М.: Машиностроение, 1984. – 88 с.

19. Тарасов, В.К. Анализ оснований адаптации адгезионных теорий и концепций к процессу мойки овощей на мясоперерабатывающих предприятиях / В.К. Тарасов //«Всё о мясе». – 2006. – № 4. – С. 37–38.

20. Хранение и технология сельскохозяйственных продуктов / Л.А. Трисвятский [и др.]; под ред. Л.А. Трисвятского. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1991. – 415 с.

21. Современные проблемы при проведении экспертизы плодовой продукции / Я.С. Томашева [и др.] // Оценка качества и безопасность потребительских товаров. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. – Вып. 5: Матер. V научно-практ. конф. студентов. – С. 56–59.

22. Гореньков, Э.С. Технология консервирования: учеб. пособие / Э.С. Гореньков, А.Н. Горенькова, Г.Г. Усачев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 384 с.

23. Рындяев, В.И. Совершенствование конструкций машин для мойки плодоовощной продукции / В.И. Рындяев, А.И. Посторонко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 5/6. – С. 28–30.

24. Александров, Ю.А. Основы производства безопасной и экологически чистой животноводческой продукции: учеб. пособие / Ю.А. Александров. – Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2008. – 277 с.

25. Курьянова, Н.Х. Микробиология продуктов растительного происхождения: учеб. пособие / Н.Х. Курьянова. – Димитровград: Техн. ин-т фил. «Ульяновская ГСХА», 2008. – 93 с.

26. Рыкова, Л.И. Основы микробиологического контроля консервного производства / Л.И. Рыкова, М.И. Черняева. – М.: Пищевая промышленность, 1967. – 404 с.

27. Митрохин, М.А. Разработка элементов технологии хранения яблок в регулируемой атмосфере: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.07; 05.18.01 / М.А. Митрохин. – Мичуринск, 2002. – 116 с.

28. Григорьева, Р.З. Безопасность продовольственного сырья и продуктов питания: учеб. пособие / Р.З. Григорьева. – Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2004. – 86 с.

29. Шаулина, Л.П. Контроль качества и безопасности пищевых продуктов и продовольственного сырья: учеб. пособие / Л.П. Шаулина, Л.Н. Корсун. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. – 111 с.

30. Донченко, Л.В. Безопасность пищевой продукции / Л.В. Донченко, В.Д. Надыкта – М., 2001. – 528 с.

31. Кобелева, О.В. Пестициды в продуктах питания, произведенных на территории Хабаровского района / О.В. Кобелева // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. – Том 4. – № 3. – С. 1–8.

32. Никифорова, Т.Е. Безопасность продовольственного сырья и продуктов питания: учеб. пособие / Т.Е. Никифорова. – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. хим.-технол. ун-т». 2007. – 132 с.

33. Литвинов, С.С. Энциклопедия овощеводства (термины, понятия, определения) / С.С. Литвинов. – М.: ГНУ ВНИИО, 2014. – 812 с.

34. Афанасиков, Ю.И. Проектирование моечно-очистного оборудования авторемонтных предприятий / Ю.И. Афанасиков. – М.: Транспорт, 1987. – 174 с.

35. Шевченко, А.И. Справочник слесаря по ремонту тракторов / А.И. Шевченко, П.И. Сафронов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1989. – 512 с.

36. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. ГОСТ 9.402-2004.

37. Применение ультразвука в промышленности. (Болгаро-советское издание). Под ред. А.И. Маркова. – М., «Машиностроение», 1975. – 240 с.

38. Воронцов, А.И. Практикум по лесной энтомологии: учеб. пособие / А.И. Воронцов, Е.Г. Мозолевская. – М.: Высш. школа, 1978. – 293 с.

39. Практикум по энтомологии: учеб. пособие / В.В. Гриценко [и др.]; под ред. проф. Ю.А. Захваткина и проф. Н.Н. Третьякова. – М.: Книжный дом «Либроком» / URSS, 2013. – 296 с.

40. Кудряшова, Л.Ю. Особенности биологии американского трипса *Echinothripsamericanus* Morganb и методы борьбы с ним в оранжереях Северо-Запада РФ: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.07 / Л.Ю. Кудряшова. – Санкт-Петербург, 2015. – 147 с.

41. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.

42. Технология материалов и изделий электронной техники: лабораторный практикум / Г.Д. Кротова, В.Ю. Дубровин, В.А. Титов, Т.Г. Шикова; ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2007. – 156 с.

43. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. ГОСТ 9.402-2004.

44. Методы и оборудование для диагностики ИМС // MMSE. Твердотельная электроника [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: [http://msse.umi.ru/metody\\_i\\_oborudovanie](http://msse.umi.ru/metody_i_oborudovanie). – Дата доступа: 5.12.2016.

45. Иванов, Б.И. Очистка металлических поверхностей пожаро-безопасными составами / Б.И. Иванов. – М.: Машиностроение, 1979. – 183 с.

46. Богатков, Л.Г. Защита химического оборудования неметаллическими покрытиями / Л.Г. Богатков [и др.]. – М.: Химия, 1989. – 188 с.

47. Методика оценки чистоты поверхности металла экспресс-методом // [Электронный ресурс] – 2014. – Режим доступа: <http://metallopraktik.ru/novosti/metodika-otsenki-chistoty-i-poverhnosti-metalla-ekspress-metodom>. – Дата доступа: 5.12.2016.

48. Горбунов, А.В. Метод оперативного контроля загрязненности поверхности / А.В. Горбунов // Моделирование и развитие процессов ОМД. Сб. науч. тр. Магнитогорск. – МГТУ, 2000. – С. 62–68.

49. Buakham, R. Kinetics of the reduction of pesticide residues in vegetables by ultrasonic cleaning / R. Buakham, S. Songsermpong, C. Eamchotchawalit // *As. J. Food Ag-Ind.* – 2012. – №5 (05). – P. 364–373.

50. Whangchai, K. The effects of ultrasonic irradiation in combination with ozone on the reduction of residual ethion of tangerine (*Citrus reticulata* Blanco cv. Sai Nam Pung) fruit after harvest / K. Whangchai [et al] // *Agricultural Sciences.* – 2013. – Vol.4. – № 5 B. – P. 7–11.

51. Liang, Y. Effects of home preparation on organophosphorus pesticide residues in raw cucumber / Y. Liang [et al] // *Food Chemistry.* – 2012. – № 133. – P. 636–640.

52. Kruve, A. Pesticide residues in commercially available oranges and evaluation of potential washing methods / A. Kruve, A. Lamos, K. Jekaterina, K. Herodes // *Proc. of the Estonian Academy of Science (Chemistry).* – 2007. – № 56. – P.134–141.

53. Lozowicka, B. Removal of 16 pesticide residues from strawberries by washing with tap and ozone water, ultrasonic cleaning and boiling / B. Lozowicka, M. Jankowska, I. Hrynko, P. Kaczynski. // *Environ Monit Assess.* – 2016. – № 188:51. – 19 pp.

54. Кудрин, А.И. Основы расчета нестандартизованного оборудования для технического обслуживания и текущего ремонта автомобилей: учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 168 с.

55. Прейс, М.В. Проблемы организации и обеспечения качества услуг автомоечных комплексов / М.В. Прейс // *Изв. ТулГУ. Технические науки.* – 2013. – Вып. 6. – Ч. 1. – С. 15–25.

56. Грилихес, С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С.Я. Грилихес. Под ред. П.М. Вячеславова. – Л.: Машиностроение, 1983. – 101 с.

57. Оверченко, Г.И. Современные технологии технического обслуживания автомобилей: учеб. пособие / Г.И. Оверченко, Ю.Н. Ефремов, Ж.К. Кубашева. – Уральск: Западно-Казахстан. аграрно-тех. ун-т, 2015. – 156 с.

58. Урецкий, Е.А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий: монография / Е.А. Урецкий. – Брест, 2007. – 396 с.

59. Лучкин, А.Г. Очистка поверхности подложек для нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами / А.Г. Лучкин, Г.С. Лучкин // Вестник КГТУ. – 2012. – № 15. – С. 208–210.

60. Каика, В.В. Обзор и анализ конструкций стрелочных обмоток роторов асинхронных двигателей и технологии их изготовления / В.В. Каика, В.Ю. Чуванков. // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С. 171–182.

61. Джерихов, В.Б. Автомобильные эксплуатационные материалы. Ч. IV. Специальные технические жидкости: учеб. пособие. / В.Б. Джерихов. – СПб.: СПбГАСУ., 2010. – 92 с.

62. Захаров, Ю.А. Предварительная подготовка поверхности деталей машин к гальваническому осаждению покрытий / Ю.А. Захаров, Г.А. Мусатов // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 2. – [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/46539>. – Дата доступа: 5.12.2016.

63. Вейко, В.П. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / В.П. Вейко, В.Н. Смирнов, А.М. Чирков, Е.А. Шахно. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 103 с.

64. Шулаев, В.М. Вакуумное обезжиривание поверхностей титановых пластин / В.М. Шулаев [и др.] // Металлургия. – 2012. – Вып. 3. – С. 156–160.

65. Гальванические ванны // – [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.galsar.ru/ob/van/>. – Дата доступа: 5.12.2016.

66. Ванны электрохимического обезжиривания // – [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://plastunit.ru/products/galvanicheskie-vanny/plastikovye-galvanicheskie-vanny/>. – Дата доступа: 5.12.2016.



67. Перминов, Е. В. Инновационные технологии на рынке синтетических моющих средств / Е. В. Перминов, А. В. Лис // Научные труды Бел. гос. эконом. ун-та: сб. / редкол.: В.Н. Шимов (пред.) [и др.]. – Минск: БГЭУ, 2010. – С. 317–322.

68. Лиханов, В.А. Технические жидкости: учеб. пособие / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин. – Киров: Вятская ГСХА, 2005. – 43 с.

69. Эльдарханов, Х.Ю. Техническое обслуживание и ремонт транспортных средств: учеб. пособие / Х.Ю. Эльдарханов, Э. Х. Эльдарханов. – Пятигорск: ИЦ ИСИТ, 2014. – 48 с.

70. Химические способы очистки металлов и их сплавов от продуктов коррозии. Метод. указания к самостоятельной работе студентов. – М.: МИИТ, 2006. – 16 с.

71. Новиков, Т.И. Совершенствование технологии очистки деталей машин и оборудования. Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03. – М., 1990. – 32 с.

72. Сливов, А.Ф. Совершенствование технологии наружной очистки сельскохозяйственной техники: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03. – М.: Моск. ин-т инж. с.-х. производства, 1992. – 17 с.

73. Плюров, Р.А. Технология наружной очистки сельскохозяйственной техники с разработкой устройства акустико-кавитационного действия. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03. – Рязань, 2004. – 20 с.

74. Моечные машины с откидной крышкой // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://rusdorf.ru/catalog/struynye-mochnye-mashiny/98-mochnye-mashiny-s-otkidnoy-kryshkoy.html>. – Дата доступа: 5.12.2016.

75. Моечные машины с выдвижной платформой // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://rusdorf.ru/catalog/struynye-mochnye-mashiny/101-mochnye-mashiny-s-vydvizhnoy-platformoy.html>. – Дата доступа: 5.12.2016.

76. Шнековые моечные машины // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://rusdorf.ru/catalog/struynye-mochnye-mashiny/104-shnekovye-mochnye-mashiny.html>. – Дата доступа: 5.12.2016.

77. Туннельные мойки деталей // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://rusdorf.ru/catalog/struynye-mochnye-mashiny/100-tunnelnye-moyki-detaley.html>. – Дата доступа: 5.12.2016.

78. Моечные машины карусельного типа // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://rusdorf.ru/catalog/struynye-mochnye-mashiny/102-mochnye-mashiny-karuselnogo-tipa.html>. – Дата доступа: 5.12.2016.

79. Установки REIN серия RDS // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://moypadetaley.ru/katalog/ustanovki-rein-seriya-rds.html>. – Дата доступа: 5.12.2016.

80. Карагодин, В.И. Ремонт автомобилей и двигателей: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В.И. Карагодин, Н.Н. Митрохин. – М.: изд. Центр «Академия», 2013. – 496 с.

81. Технология и оборудование авторемонтного производства: учеб. пособ. / А.Д. Цой. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2007. – 114 с.

82. Мирутко, В.В. Моечно-очистные работы при технической эксплуатации сельскохозяйственной техники / В.В. Мирутко [и др.] // Докл. Междунар. науч.-практ. конф. «Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК»: в 2 ч. – Минск: БГАТУ, 2009. – Ч. 1. – С. 57–60.

83. Шемякина, Е. Ю. Технология очистки сельскохозяйственных машин с обоснованием параметров и режимов работы моечной установки с воздушным экраном. Автореф. дис. канд. ... тех. наук: 05.20.03. Рязань, 2009. – 21 с.

84. Мойка грузовика щетками // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.avtoespresso.by>. – Дата доступа: 5.12.2016.

85. Bilek, S.E. Decontamination efficiency of high power ultrasound in the fruit and vegetable industry, a review / S.E. Bilek, F. Turantas. // *Int. J. Food Microbiology*. – 2013. – № 166. – P. 155–162.

86. Дегтяревич, И.И. Организация переработки сельскохозяйственной продукции и агросервисного обслуживания. Курс лекций: учеб.-метод. пособие / И.И. Дегтяревич, В.А. Карпов. – Гродно: ГГАУ, 2010. – 296 с.

87. Buck, J.W. Recent trends in microbiological safety of fruits and vegetables. *Online.Plant Health Progress* / J.W. Buck, R.R. Walcott, L.R. Beuchat // [Электронный ресурс]. – 2003. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1094/ PHP-2003-0121-01-RV>. – Дата доступа: 5.12.2016.

88. Olaimat, A.N. Factors influencing the microbial safety of fresh produce: a review / A.N. Olaimat, R.A. Holley // *Food Microbiology*. – 2012. – № 32 (1). – P. 1–19.

89. Кобелева, О.В. Пестициды в продуктах питания, произведенных на территории Хабаровского района / О.В. Кобелева // *Ученые заметки ТОГУ*. – 2013. – Том 4. – № 3. – С. 1–8.

90. Машины для мойки овощей, фруктов и зелени // [Электронный ресурс]. – 2003. – Режим доступа: [http://titanfood.com/index.php?route=product/category&path=57\\_100](http://titanfood.com/index.php?route=product/category&path=57_100). – Дата доступа: 5.12.2016.

91. Щеточно-моечная машина Т1-КУМ-3 <http://konservnoe.ru>

92. Машина моечная барабанная А9-КМ-2 // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: [http://prodmarshservis.ru/a9\\_km2.html](http://prodmarshservis.ru/a9_km2.html). – Дата доступа: 5.12.2016.

93. Машины для мойки овощей и фруктов фирмы Nilma // <http://www.prosoundplus.by/prod/pererabotka-ovoschei/moika/mashiny-dlya-moiki-ovoschei-i-fruktov/> [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.prosoundplus.by/prod/pererabotka-ovoschei/moika/mashiny-dlya-moiki-ovoschei-i-fruktov>. – Дата доступа: 5.12.2016.

94. Машина барботажная для замачивания и первичной мойки овощей // <http://www.prosoundplus.by/prod/pererabotka-ovoschei/moika/mashiny-dlya-moiki-ovoschei-i-fruktov/> [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.oborud.info/product/jump.php?18589&c=1264>. – Дата доступа: 5.12.2016.

95. Пачурин, Г.В. Технология очистки поверхности листового проката автомобильных низкоуглеродистых сталей / Г.В. Пачурин, А.А. Филиппов, С.И. Чиненков // *Журнал Автомобильных Инженеров*. – 2012. – №4 (75). – С. 27–29.

96. Барон, Ю.М. Технология конструкционных материалов: учеб. / Ю.М. Барон. – СПб.: Издательский дом «Питер», 2014. – 512 с.

97. Полянский, С.Н. Подготовка поверхности для нанесения антикоррозионных покрытий на металлоконструкции и детали механизмов из углеродистых сталей / С.Н. Полянский, С.В. Бутаков, В.А. Александров, Л.Ю. Лазарева // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 4. – [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.scince-education.ru/118-14372>. – Дата доступа: 5.11.2016.

98. Ристер, М. Струйная обработка поверхности сухим льдом / М. Ристер // Промышленная окраска. – 2013. – №3. – С. 36–38.

99. Маньков, В.В. Совершенствование технологии финишной обработки поверхностей деталей сложной формы // Молодежь и наука. – 2015. – № 4. – С. 52–55.

100. Ванн Мао. Повышение эффективности и качества очистки поверхности деталей от эксплуатационных загрязнений за счет применения вибрационной обработки в технологии авторемонтных производств. Дис. ... канд. тех. наук: 05.02.08. – Ростов-на-Дону, 2003. – 180 с.

101. Бармашов, И. Эффективная очистка плазмой изделий электронной промышленности / И. Бармашов // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 2 – С. 42–44.

102. Михасенок, О.Я. Очистка пресс-форм / О.Я. Михасенок // Полимерные материалы. – 2005. – Вып. 3. – С. 20–13.

103. Термическая очистка поверхности // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://prof-kras.ru/poryadok-predostavleniya-uslugi-i-tehn/> termicheskaya-ochistka-poverhnosti. – Дата доступа: 5.11.2016.

104. Установка для обработки сельскохозяйственных культур / Просп. ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии с IX Моск. Междунар. салона инноваций и инвестиций. – 2009. – 2 с.

105. Отчет о НИР по теме: «Совершенствование технологий и средств термической обработки сельскохозяйственного сырья и продукции в электромагнитном поле». – Белгород: БГСХА, 2013. – 49 с.

106. Современные технологии хранения и переработки плодово-овощной продукции: науч. аналит. обзор. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 172 с.

107. Чиж, Т.В. Радиационная обработка как технологический прием в целях повышения уровня продовольственной безопасности / Т.В. Чиж, Г.В. Козьмин, Л.П. Полякова, Т.В. Мельникова // Вестник РАЕН. – 2011. – №4. – С. 44–49.

108. Способ подготовки к хранению яблок свежих специального назначения: пат. 2322009 РФ / О.И. Квасенков. – 2008.

109. Химическая обработка и окуривание овощей, фруктов, бахчевых и корнеплодов // [Электронный ресурс] – 2014. – Режим доступа: <http://zarip-ovosch.ru/himicheskaya-obrabotka-i-okurivanie>. – Дата доступа: 29.12. 2016.

110. Шиманович, С.Л. Экологически безопасные озонные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности / С.Л. Шиманович [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер.аграр. навук. – 2006. – №3. – С. 117–123.

111. Коркишко, О.А. Современная технология хранения растительных продуктов в пищевой продукции / О.А. Коркишко [и др.] // Фундам. исслед. Тех. науки. – 2014. – №5. – С. 481–484.

112. Абеленцев, В.И. Влияние послеуборочной обработки биопрепаратами на хранение яблок / В.И. Абеленцев [и др.] // Плодоводство и виноградарство Юга России. – 2010. – № 4 (3). – С. 105–109.

113. Задворнова, Т.А. Влияние обработки яблок биопрепаратами на физиолого-биохимические изменения при холодильном хранении плодов / Т.А. Задворнова [и др.] // Науч. журнал НИУ ИТМО. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств. – 2011. – Вып. 2. – С. 1–6.

114. Николаева, Л.А. Санитарно-эпидемиологическая экспертиза пищевых продуктов: учебно-методическое пособие / Л.А. Николаева, Е.В. Ненахова; ГБОУ ВПО ИГМУ Минздрава России. – Иркутск: ИГМУ, 2014. – 90 с.

115. Технология консервирования плодов и овощей: уч.- практ. пособие / Н.Г. Щеглов. – М.: Дашков и К: Палеотип, 2002. – 380 с.

116. Технология консервирования плодов и овощей и контроль качества продукции : учеб. для СПО / А.Ф. Загибалов, А.С. Зверькова, А.А. Титова. – М.: Агропромиздат, 1992. – 352 с.

117. Zabik, M.J. Reduction of azinphos-methyl, chlorpyrifos, esfenvalerate, and methomyl residues in processed apples / M.J. Zabik [et al] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2000. – № 48. – P. 4199–4203.

118. Soliman, K.M. Changes in concentration of pesticide residues in potatoes during washing and home preparation / K.M. Soliman // Food and Chemical Toxicology. – 2001. – № 39. – 887–891.

119. Chavarri, M.J. The decrease in pesticides in fruit and vegetables during commercial processing / M.J. Chavarri, A. Herrera, A. Arino // International Journal of Food Science and Technologies. – 2005. – № 40. – P. 205–211.

120. Radwan, M.A. Residual behaviour of profenofos on some field-grown vegetables and its removal using various washing solutions and household processing / M.A. Radwan, M.M. Abu-Elamayem, M.H. Shiboob, A. Abdel-Aal // Food and Chemical Toxicology. – 2005. – № 43. – P. 553–557.

121. Randhawa, M.A. Field incurred chlorpyrifos and 3, 5, 6-trichloro-2-pyridinol residues in fresh and processed vegetables / M.A. Randhawa, F.M. Anjum, A., M.S. Randhawa // Food Chemistry. – 2007. – № 103. – P. 1016–1023.

122. Zhang, Z.Y. Effects of home preparation on pesticide residues in cabbage / Z.Y. Zhang, X.J. Liu, X.Y. Hong // Food Control. – 2007. – № 18. – P. 1484–1487.

123. Ling, Y. The effects of washing and cooking on chlorpyrifos and its toxic metabolites in vegetables / Y. Ling [et al] // Food Control. – 2011. – № 22. – P. 54–58.

124. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав. ред. И.П. Голямина. – М.: Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с.

125. Сиротюк, М.Г. Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк; отв. ред. В.А. Акуличев, Л.Р. Гаврилов – М.: Наука, 2008. – 271 с.

126. Розенберг, Л.Д. Кавитационная область / Л.Д. Розенберг // В кн.: Мощные ультразвуковые поля; под ред Л. .Розенберга. – М.: Наука, 1968. – С. 221-266.

127. Ланин, В.Л. Физические эффекты ультразвука в жидких средах и их применение в технике / В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 2. – С. 10-15.

128. Голых, Р.Н. Повышение эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в гетерогенных системах с несущей высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой. Дис. ... канд. тех. наук: 05.17.08. Бийск, 2014. – 188 с.

129. Червяков, В.М. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах: монография / В.М. Червяков, В.Ф. Юдаев. – М.: Машиностроение, 2007. – 128 с.

130. Агранат, Б.Л. Ультразвуковая очистка / Б.Л. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский. – В кн. Физические основы ультразвуковой технологии. Физика и техника мощного ультразвука. М.: Наука, 1970. – Т. 3. – С. 165–252.

131. Агранат, Б.Л. Ультразвуковая технология: учеб. пособ / Б.Л. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский. – М.: Металлургия, 1974. – 504 с.

132. Курносов, Н.Е. К вопросу гидрокавитационной интенсификации процесса очистки изделий машиностроения / Н.Е. Курносов, К.В. Лебединский // Изв. ТулГУ. Тех. науки. – 2012. – Вып. 1. – С. 147–156.

133. Мусина, Г.Н. Физико-химические процессы кавитационного воздействия в жидких средах / Г.Н. Мусина // Наука и мир. – 2014. – № 11 (15). – Том. II. – С. 19–22.

134. Медведев, А. Ультразвуковая очистка. Теория и практика / А. Медведев // [Электронный ресурс] – 2009. – Режим доступа: [www.rosteplo.ru](http://www.rosteplo.ru). – Дата доступа: 27.10. 2016.

135. Федоров, А.А. Разработка технологии и оборудования для промывки трубопроводов гидро- и топливных систем самолета с использованием ультразвука / А.А. Федоров, Н.В. Кабанов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15. – № 4 (4). – С. 880–885.

136. Тараканова, Н.М. Технология и устройство для очистки сельскохозяйственных машин с использованием абразивно-кавитационной струи. Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03. – Рязань, 2011. – 20 с.

137. Фатюхин, Д.С. Наукоёмкие ультразвуковые технологии очистки изделий машиностроения / Д.С. Фатюхин // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2011. – № 2. – С. 9–13.

138. Фатюхин, Д.С. Ультразвуковые технологии повышения эксплуатационных свойств изделий транспортного машиностроения. Автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 05.02.08. – М.: 2014. – 39 с.

139. Илюхин, А.В. Экспериментальное исследование процессов ультразвуковой очистки деталей / А.В. Илюхин, В.И. Марсов, А.М. Колбасин, П.А. Цепкин // Автоматизация и управление в технических системах. – 2013. – №3 (5). – С. 17–21.

140. Толочко, Н.К. Кинетические закономерности ультразвуковой очистки деталей машин от загрязнений / Н.К. Толочко, А.Н. Челединов // Вестник машиностроения. – 2018. – № 6. – С. 69–73.

141. Кольцова, И.С. Ослабление ультразвуковых волн в эмульсиях / И.С. Кольцова, И.Г. Михайлов, Б. Сабуров // Акустический журнал. – 1973. – № 5. – С. 713–719.

142. Кольцова, И.С. Затухание ультразвуковых волн во взвешях в широком диапазоне концентраций / И.С. Кольцова, И.Г. Михайлов // Акустический журнал. – 1997. – Т. XIX. – № 3. – С. 362–366.

143. Шутилов, В.А. Основы физики ультразвука: уч. пособ. / В.А. Шутилов. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280 с.

144. Антушева, Т.И. Некоторые особенности влияния ультразвука на микроорганизмы / Т.И. Антушева // Электрон. период. издание ЮФУ «Живые и биокосные системы». – 2013. – № 4. – 17 с. – [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://www.jbks.ru/archive/issue-4/article-11>. – Дата доступа: 27.10.2016.

145. Акопян, Б.В. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / Б.В. Акопян, Ю.А. Ершов. Под ред. С.И. Щукина. – М.: МГТУ им. Баумана, 2005. – 223 с.

146. Валентас, К.Дж. Пищевая инженерия. Справочник с примерами расчетов. / К.Дж. Валентас, Э. Ротштейн, Р.П. Сингх. Пер. с англ. под общ. науч. ред. А. Л. Ишевского. – СПб.: Профессия, 2004. – 848 с.

147. Sarkka-Tirkkonen, M. Overview on different sterilization techniques for baby food / M. Sarkka-Tirkkonen [et al] // Ruralia Institute, University of Helsinki. – 2010. – 25 pp.

148. Грязнева, Т.Н. Влияние физических, химических и биологических факторов на микроорганизмы. Лекция / Т.Н. Грязнева. – М.: ФГОУ ВПО МГАВМиБ. – 2011.

149. Инновационные технологии переработки плодоовощной продукции / ред.: С. Родригес, Ф. А. Н. Фернадес; пер. Ю. Г. Базарнова. – СПб.: Профессия, 2014. – 456 с.

150. Zhou, L.Z. Inactivation of yeast cells by ultrasound disinfection and related influences / L.Z. Zhou, B. Li, L. Li, X.M. Zhang // J. of South China University of Technology. – 2007. – № 35. – P. 121–125.

151. Zhou, B. Investigation on factors influencing ultrasound-assisted surface decontamination of fresh and fresh-cut vegetables. PhD Diss. Urbana, Illinois, USA, 2010. – 200 pp.

152. Wong K.Y.K. Ultrasound as a sole or synergistic disinfectant in drinking water. PhD Diss. Worcester, MA: Worcester Polytechnic Institute, 2002.

153. Ugarte-Romero E. Inactivation of *Shigella boydii* 18 IDPH and *Listeria monocytogenes* Scott A with power ultrasound at different acoustic energy densities and temperatures / E. Ugarte-Romero, H. Feng, S.E. Martin // J. Food Sci. – 2007. – № 72. – P. 103–107.

154. Seymour, J. Ultrasound decontamination of minimally processed fruits and vegetables / J. Seymour [et al] // Int. J. Food Science and Technology. – 2002. – Is. 5. – P. 547–557.



155. Sagong, H.G. Combined effect of ultrasound and organic acids to reduce *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium* and *Listeria monocytogenes* on organic fresh lettuce / H.G. Sagong [et al] // Int. J. Food Microbiology. – 2011. – № 145 (1). – P. 287–292.

156. Cao, S. Effect of ultrasound treatment on fruit decay and quality maintenance in strawberry after harvest / S. Cao [et al] // Food Control. – 2010. – № 21. – P. 529–532.

157. Carstensen, E.L. Lysis of cells in *Elodea* leaves by pulsed and continuous wave sound / E.L. Carstensen [et al] // Ultrasound Medicine Biol. – 1990. – № 16. – P. 167–174.

158. Tsaka, S.C. Chromosomal breaks and aberrations observed after applying ultrasound to *Drosophila subobscura* / S.C. Tsaka // Genetica. – 1982. – № 60. – P. 77–80.

159. Влияние факторов окружающей среды на развитие и выживаемость яиц и личинок гельминтов // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: [http://medportal.com/gigiena-sanepidkontrol\\_733/vliyanie-faktorov-okrujayushey-sredyi-53033.html](http://medportal.com/gigiena-sanepidkontrol_733/vliyanie-faktorov-okrujayushey-sredyi-53033.html). – Дата доступа: 27.10.2016.

160. Масалкова, Ю.Ю. Особенности воздействия ультразвука на яйца *Toxocara canis* (Werner, 1782) / Ю.Ю. Масалкова // Рос. паразитологический ж. – 2014. – №1. – С. 52–56.

161. Мунтян, В. А. Перспективы использования гидродинамических излучателей для создания акустических и ультразвуковых колебаний в процессах мойки шерсти / В. А. Мунтян // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2009. – № 44. – С. 103–110.

162. Промтов, М.А. Методы и устройства для комплексной кавитационной обработки / Ультразвуковая техника - ИНЛАБ // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://utinlab.ru/articles/metody-i-ustrojstva-dlya-kompleksnoj-kavitacionnoj-obrabotki>. – Дата доступа: 27.10.2016.

163. Сухарьков, О.В. Оптимизация параметров прямого гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления / О. В. Сухарьков // Акустичний вісник. – 2008. – Том 11. – № 4. – С. 54–63.

164. Сухарьков, О.В. Влияние гидростатического давления на энергетические характеристики прямого гидродинамического

излучателя / О. В. Сухарьков // Научные работы ОНАЗ им. О.С. Попова. – 2009. – № 1. – С. 70–77.

165. Сухарьков, О.В. Энергетические характеристики затопленной кольцевой струйной пластинки при наличии развитой кавитации / О. В. Сухарьков // Акустичний вісник. – 2010. – Том 13. – №2. – С. 45–52.

166. Форсунка инструмента для подводной очистки / А.Е. Исайко, В.С. Кузин, И.Д. Шевченко. Патент 2222463 РФ. 2002.

167. Устройство для подводной очистки поверхностей / А.А. Ватутин. Пат. 2139222 РФ. 1999.

168. Кавитационная форсунка / С.В. Тюлевин. Пат. 2575033 РФ. 2016.

169. Карева, Н.А. Исследование кавитационной технологии промывки длинномерных цилиндров шасси самолетов / Н.А. Карева // Изв. Самарск. науч. центра РАН. – 2011. – Т. 13. – № 4 (3). – С. 1071–1072.

170. Роторный гидродинамический излучатель акустических колебаний в жидкой среде / В.М. Варламов, Ф.Г. Шаяхметов. А.с. 1296233. 1973.

171. Громаковский, Д.Г. Разработка низкочастотных кавитационных устройств для мойки поверхности деталей машин и приборов / Д.Г. Громаковский, А.П. Бураков, Н.А. Карева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – №1(3). – С. 562–565.

172. Способ гидрокавитационной очистки деталей и устройство для его осуществления / В.П. Родионов. Пат. РФ 2414 308. 2006.

173. Высокочастотная форсунка / Громаковский Д.Г. [и др.]. Пат. РФ 2555489. 2012.

174. Способ и устройства для кавитационной мойки деталей при производстве и техническом обслуживании машин / Самарский гос. тех. ун-т. 4 с. // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: [ntcnad.samgtu.ru/sites/ntcnad.samgtu.ru/files/6.pdf](http://ntcnad.samgtu.ru/sites/ntcnad.samgtu.ru/files/6.pdf). – Дата доступа: 22.12.2016.

175. Курносов, Н.Е. Экспериментальные исследования гидродинамической кавитационной очистки поверхностей деталей от масляных загрязнений / Н.Е. Курносов, К.В. Лебединский // Изв. высш. учеб. заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 2 (22). – С. 117–125.

176. Сухарьков, О.В. Очистка прецизионных деталей двигателей внутреннего сгорания с помощью гидродинамических излучателей / О.В. Сухарьков, А.М. Теплечук, А.О. Сухарьков // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 1999. – Вып. 3(9). – С. 73–76.

177. Способ инициирования кавитирующей струи жидкости / А.К. Казеннов [и др.]. Пат. 2060344 РФ. 1996.

178. Устройство для обработки погруженных в жидкость поверхностей / А.И. Харламов. Пат. 2152331 РФ. 2000.

179. Способ создания кавитирующей струи жидкости / Харламов А.И., Стунжас П.А., Гуськина Р.И. Пат. 2155104 РФ. 2000.

180. Способ создания кавитации в струе жидкости / А.И. Харламов, П.А. Стунжас, А.Я. Кондрашев, А.В. Фомин. Пат. 2155105 РФ. 2000.

181. Способ создания кавитирующей струи жидкости / Качанов И.В., Недбальский В.К., Шаталов И.М., Филипчик Я.В. Пат. 14239 РФ, 2011.

182. Способ создания кавитирующих струй для обработки погруженных в жидкость поверхностей / А.И. Харламов, Б. Виджаяратхна, В.Б. Мустафин. Пат. 2271300 РФ. 20

183. 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. – 203 с.

184. Хмелёв, В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве: науч. монография / В.Н. Хмелёв, О.В. Попова. – Барнаул: изд. АлтГТУ, 1997. – 160 с.

185. Ультразвук, маленькая энциклопедия // [Электронный ресурс] – 2014. – Режим доступа: <http://www.uzo.matrixplus.ru/applicationultrasound1.htm>. – Дата доступа: 22.9.2016.

186. Электрохимико-механические установки, ультразвуковые установки // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: [http://www.elektropsets.ru/oborudovanie\\_elektrotekhnologicheskikh\\_ustanovok\\_elektromekhanicheskije\\_ustanovki\\_ultrazvukovye\\_ustanovki.php](http://www.elektropsets.ru/oborudovanie_elektrotekhnologicheskikh_ustanovok_elektromekhanicheskije_ustanovki_ultrazvukovye_ustanovki.php). – Дата доступа: 22.9.2016.

187. Ультразвуковое оборудование для очистки: ультразвуковые ванны и погружные излучатели / ООО «НПП"Ультра-Фильтр» // [Электронный ресурс] – 2014. – Режим доступа: [http://ultra-filter.ru/equipment\\_ultra/vanny.php](http://ultra-filter.ru/equipment_ultra/vanny.php). – Дата доступа: 22.9.2016.

188. Попов, Л.М. Физико-химические методы обработки: Компьютерный текст лекций / Л.М. Попов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2006. – 97 с.

189. Ультразвуковые ванны КС и МКС // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: [http://www.ab-engine.ru/guyson\\_bath.html](http://www.ab-engine.ru/guyson_bath.html). – Дата доступа: 22.9.2016.

190. FinnSonic Optima - специальные УЗВ мойки // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://rusdorf.ru/catalog/ultrazvukovye-vanny/94-finnsonic-w-specialnye-uz-moyki.html>. – Дата доступа: 22.9.2016.

191. Бронин, Ф.А. Погружной преобразователь: устройство и применение / Ф.А. Бронин // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://www.b6403.narod.ru/pp.html>. – Дата доступа: 22.9.2016.

192. Ультразвуковые излучатели // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://www.ultra-piezo.com/russian-ultrasonic/205.html>. – Дата доступа: 22.9.2016.

193. Ультразвуковой излучатель погружного типа // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://www.ultra-piezo.com/russian-ultrasonic/204.html>. – Дата доступа: 22.9.2016.

194. Ультразвуковые технологии и аппараты / Лаборатория акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института; ООО «Центр ультразвуковых технологий» // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://old.u-sonic.ru>. – Дата доступа: 22.9.2016.

195. Ультразвуковые технологии и оборудование / ООО «Александра-Плюс» // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://alexplus.ru/%D0%9C%D0%9E-289.html>. – Дата доступа: 22.9.2016.

196. Минченя, В.Т. Перспективы использования гибких ультразвуковых волноводных систем в медицине и технике / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко // Приборы и методы измерений. – Минск: БНТУ, 2010. – № 1. – С. 6–16.

197. Способ ультразвуковой очистки внутренней поверхности труб / В.И. Бир, Б.Н. Поддубный, Р.Ф. Резников. А.с. СССР 1147459. 1974.

198. Ультразвук и ультразвуковые технологии / ООО «ТД «РЭЛТЕК» // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://reltec.biz/catalog/item/37>. – Дата доступа: 22.9.2016.

199. Электрохимико-механические установки, ультразвуковые установки (УЗУ) // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: [http://www.elektrospets.ru/oborudovanie\\_elektrotekhnologicheskikh\\_ustanovok\\_elektromekhanicheskie\\_ustanovki\\_ultrazvukovye\\_ustanovki.php](http://www.elektrospets.ru/oborudovanie_elektrotekhnologicheskikh_ustanovok_elektromekhanicheskie_ustanovki_ultrazvukovye_ustanovki.php). – Дата доступа: 22.9.2016.

200. Ультразвуковой противонакипной аппарат ЗЕВСОНИК // <http://www.spicom.ru/zevsonic.htm> ООО «ЗЕВС-ТРУБОПРОВОД»

201. Оборудование для очистки трубопроводов // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://novochem.ru/products/proizvodimye-produkty/antirzhavin/oborudovanie-dlya-ochistki-truboprovodov>. – Дата доступа: 22.9.2016.

202. Садыков Т.С. Методы очистки внутренних полостей трубопроводов (МОВПТ) / Т.С. Садыков, С.В. Горячев // Молодежный научный форум: Технические и математические науки: электр. сб. ст. по материалам XXXIV студ. междунар. заочной науч.-практ. конф. – М.: «МЦНО». – 2016. – 5(34) // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: [https://nauchforum.ru/archive/MNF\\_tech/5\(34\).pdf](https://nauchforum.ru/archive/MNF_tech/5(34).pdf). – Дата доступа: 22.9.2016.

203. Способ ультразвуковой очистки деталей / Я.Я. Вальц. Пат. 2429920 РФ. 2011.

204. Тараканова, Н.М. Технология и устройство для очистки сельскохозяйственных машин с использованием абразивно-кавитационной струи. Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03. – Рязань, 2011. – 20 с.

205. Устройство для очистки транспортных средств / Н.М. Тараканова, М.Б. Латышенок, М.Ю. Костенко, Е.М. Астахова. Патент на полезную модель РФ № 79079. 2008.

206. Устройство для очистки транспортных средств / В.Н. Ретюньских, М.Б. Латышенок. А.с. СССР № 8664. 1998.

207. Астахова, Е.М. Повышение эффективности подготовки сельскохозяйственной техники к хранению средствами машинно-технологических станций с разработкой методики оценки качества. Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03. – Рязань, 2007. – 23 с.

208. Асаев, А.С. Разработка метода финишной обработки деталей машин свободным абразивом с применением эффекта присоединенной кавитации. Дис. ... канд. тех. наук: 05.02.07. – М., 2016. – 131 с.

209. Борычев, С.Н. Технологии и установка для очистки деталей сельскохозяйственных машин при постановке на хранение / С.Н. Борычев, А.В. Шемякин, В.П. Горбунов, П.С. Синицин // Науч. ж. КубГАУ. – 2016. – №124(10). – С. 1-16.

210. Шемякин, А.В. Совершенствование организации работ, связанных с хранением сельскохозяйственных машин в условиях малых и фермерских хозяйств. Автореф. дис. ... д-ра. тех. наук: 05.20.03. – Мичуринск, 2014. – 39 с.

211. Курносов, Н.Е. Экспериментальные исследования гидродинамической кавитационной очистки поверхностей деталей от масляных загрязнений / Н.Е. Курносов, К. В. Лебединский // Изв. высш. учеб. заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 2 (22). – С. 117–125.

212. Лебедев, Н.М. Использование ультразвуковой очистки на предприятиях электродной промышленности. Доклад на конференции ассоциации «Электрод», г. Череповец, июнь 2003 г. / Н.М. Лебедев, Т.И. Жирнова, Г.М. Нечаев, О.В. Воронин // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://alexplus.ru>. – Дата доступа: 22.9.2016.

213. Лебедев, Н.М. Оборудование для ультразвуковой очистки поверхности металлов / Н.М. Лебедев, Т.Н. Жирнова, О.А. Филичев, А.Л. Штакельберг // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 3 (237). – С. 84–87.

214. Лебедев, Н.М. Интенсификация процессов очистки металлических поверхностей с применением ультразвука / Н.М. Лебедев [и др.] // Металлургическая и горно-добывающая промышленность. Днепропетровск, 2003. № 3 // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://alexplus.ru>. – Дата доступа: 22.9.2016.

215. Установка ультразвуковой мойки для автотехобслуживания, авиации и промышленности «УЗУМИ-15». Паспорт и инструкция по применению ТРИМ.152973.002 ПС // [Электронный ресурс] – 2016. –

Режим доступа: [http://www.trima.ru/autoservice/pdf/pas\\_uzumi15\\_ap.pdf](http://www.trima.ru/autoservice/pdf/pas_uzumi15_ap.pdf).  
– Дата доступа: 22.9.2016.

216. Сухарьков, О.В. Очистка прецизионных деталей двигателей внутреннего сгорания с помощью гидродинамических излучателей / О.В. Сухарьков, А.М. Теплечук, А.О. Сухарьков. // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 1999. – Вып. 3(9). – С. 73–76.

217. НПО «Ультразвуковые системы» // [Электронный ресурс] – 2008. – Режим доступа: <http://www.ultrasyst.eu/index.php/example-cleaning.html>. – Дата доступа: 22.9.2016.

218. Ультразвуковые технологии и аппараты / Лаборатория акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института; ООО «Центр ультразвуковых технологий» // [Электронный ресурс] – 2008. – Режим доступа: <http://old.u-sonic.ru>. – Дата доступа: 22.9.2016.

219. Методы очистки от накипи // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://www.zevs-irp.ru/ru/methods>. – Дата доступа: 22.9.2016.

220. Способ удаления окалины с поверхности нагретого металла / В.В. Пилипенко, И.К. Манько, В.А. Дрозд, В.А. Задонцев. А.с. 621416. 1978.

221. Бодяко, А.А. Ультразвуковая очистка поршневых и уплотнительных колец с применением прогрессивных экологических решений / А.А. Бодяко, Л.Ф. Короткевич // Электронный научно-технический журнал, окт. 2007 г. 4 с. // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://www.bru.mogilev.by>. – Дата доступа: 22.9.2016.

222. Комплексы гидрокавитационной очистки // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://www.jet2008.narod.ru/HTMLs/cleaning.html>. – Дата доступа: 22.9.2016.

223. Оборудование для очистки трубопроводов // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://novochem.ru/products>. – Дата доступа: 22.9.2016.

224. Комаров, А.А. Оценка возможностей гидрокавитационного комплекса // Технические науки: теоретический и прикладной взгляд / А.А. Комаров // Сб. ст. Междунар. научно-практ. конф. 1 окт. 2014г. – Уфа: АЭТЕРНА, 2014. – С. 39-43.

225. Ицко, Э.Ф. Удаление лакокрасочных покрытий / Э.Ф. Ицко. – Л.: Химия, 1991. – 96 с.

226. Gogate, P.R. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology / P.R. Gogate, A.M. Kabadi // Biochem. Eng. J. – 2009. – № 44 (1). – P. 60–72.

227. De Sao Jose, J.F.B. [et al.] Decontamination by ultrasound application in fresh fruits and vegetables / J.F.B. de Sao Jose [et al.] // Food Control. – 2014. – № 45. – P. 36–50.

228. Scouten, A.J. Combined effects of chemical, heat and ultrasound treatments to kill *Salmonella* and *Escherichia coli* 0157:H7 on alfalfa seeds / A.J. Scouten, L.R. Beuchat // J. Appl. Microbiology. – 2002. – № 92 (4). – P. 668–674.

229. Ciccolini, L., Taillandier P., Wilhem A. M, Delmas H., Strehaiano P. Low frequency thermo-ultra-sonication of *Saccharomyces cerevisiae* suspensions: Effect of temperature and of ultrasonic power / L. Ciccolini [et al.] // Chemical Engineering J. – 1997. – № 65. – P. 145–149.

230. Cruz, R.M.S. Effect of heat and thermosonication treatments on watercress (*Nasturtium officinale*) vitamin C degradation kinetics / R.M.S. Cruz, M.C. Vieira, C.L.M. Silva // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2008. – № 9. – P. 483–188.

231. Ye, S.Y. Optimization of process parameters for the inactivation of *Lactobacillus sporogenes* in tomato paste with ultrasound and <sup>60</sup>Co-γ irradiation using response surface methodology / S.Y. Ye, Y.X. Qiu, X.L. Song, S.C. Luo // Radiation Physics and Chemistry. – 2009. – 78. – P. 227–233.

232. Behrsing, J. Efficacy of chlorine for inactivation of *Escherichia coli* on vegetables / J. Behrsing, S. Winkler, P. Franz, R. Premier // Postharvest Biology and Technology. – 2000. – № 19. – P.187–192.

233. Beuchat, L.R. Lethality of chlorine, chlorine dioxide, and a commercial fruit and vegetable sanitizer to vegetative cells and spores of *Bacillus cereus* and spores of *Bacillus thuringiensis* / L.R. Beuchat [et al.] // J. Food Protection. – 2004. – № 67. – P. 1702–1708.

234. Hua, G. Comparison of disinfection by product formation from chlorine and alternative disinfectants / G. Hua, D.A. Reckhow // Water Research. – 2007. – № 41. – P.1667–1678.

235. Al-Zenki, S. 2012. Microbial safety and sanitation of fruits and fruit products / S. Al-Zenki, H. Al-Omirah, J.S. Sidhu. In: Sinha, N., Sidhu, J., Barta, J., Wu, J., Cano, P. (Eds.), Handbook of Fruit and Fruit Processing. – Wiley-Blackwell, USA. – P. 339–340.



236. Akbas, M.Y. Effectiveness of organic acids, ozonated water and chlorine dippings on microbial reduction and storage quality of fresh-cut iceberg lettuce / M.Y. Akbas, H. Olmez // *J. Science of Food and Agriculture*. – 2007. – №87(14). – P. 2609–2616.

237. Ukuku, D.O. Effect of cell surface charge and hydrophobicity on attachment of 16 *Salmonella* serovars to cantaloupe rind and decontamination with sanitizers / D.O. Ukuku, W.F. Fett // *J. Food Protection*. – 2006. – № 69 (8). – P. 1835–1843.

238. Gil, M.I. Fresh-cut product sanitation and wash water disinfection: problems and solutions / M.I. Gil, M.V. Selma, F. Lopez-Galvez, A. Allende // *Int. J. Food Microbiology*. – 2009. – № 134. – P. 37–45.

239. Olmez, H. Potential alternative disinfection methods for organic fresh-cut industry for minimizing water consumption and environmental impact / H. Olmez, U. Kretschmar // *LWT-Food Science and Technology*. – 2009. – № 42. – P. 686–693.

240. Cho, S.D. Changes in the residual chlorine content of fresh-cut lettuce during storage / S.D. Cho [et al] // *J. Korean Society for Applied Biological Chemistry*. – 2010. – № 53 (3). – P. 337–341.

241. Huang, T.S. Decontamination efficacy of combined chlorine dioxide with ultrasonication on apples and lettuce / T.S. Huang [et al] // *J. Food Science*. – 2006. – 71(4). – P. 134–139.

242. Chen, Z. Combined effects of aqueous chlorine dioxide and ultrasonic treatments on postharvest storage quality of plum fruit (*Prunus salicina* L.) / Z. Chen, C. Zhu // *Postharvest Biology and Technology*. – 2011. – 61(2-3). – P. 117–123.

243. Kim, J.G. Use of ozone to inactivate microorganisms on lettuce / J.G. Kim, A.E. Yousef, G.W. Chism // *J. Food Safety*. – 1999. – № 19. – P. 17–34.

244. Sagong, H.G. Combined effect of ultrasound and organic acids to reduce *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium* and *Listeria monocytogenes* on organic fresh lettuce / H.G. Sagong [et al] // *Int. J. Food Microbiology*. – 2011. – № 145 (1). – P. 287–292.

245. Yang, Z. Combination of salicylic acid and ultrasound to control postharvest blue mould caused by *Penicillium expansum* in peach fruit / Z. Yang, S. Cao, Y. Cai, Y. Zheng // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2011. – № 12 (3). – P. 310–314.

246. Ferrante, S. Combined use of ultrasound and natural antimicrobials to inactivate *Listeria monocytogenes* in orange juice / S. Ferrante, S. Guerrero, M. Alzamora // *J. Food Protection*. – 2007. – № 70. – P. 1850–1856.

247. Guerrero, S. Response of *Saccharomyces cerevisiae* to the combine action of ultrasound and low weight chitosan / S. Guerrero, M. Tognon, S.M. Alzamora // *Food Control*. – 2005. – № 16. – P. 131–139.

248. Burgos, J. Effect of ultrasonic waves on the heat resistance of *Bacillus cereus* and *Bacillus licheniformis* spores / J. Burgos, J.A. Ordycez, F. Sala // *Appl. Microbiology*. – 1972. – № 24 (3). – P.497–498.

249. Sagong, H.G. Combined effects of ultrasound and surfactants to reduce *Bacillus cereus* spores on lettuce and carrots / H.G. Sagong [et al] // *Int. J. Food Microbiology*. – 2013. – № 160 (3). – P. 367–372.

250. Elizaquivel, P. Application of propidium monoazide-qPCR to evaluate the ultrasonic inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 in fresh-cut vegetable wash water / P. Elizaquivel, G. Sanchez, M.V. Selma, R. Aznar // *Food Microbiology*. – 2012. – № 30. – P. 316–320.

251. Alexandre, E.M.C. Efficacy of non-thermal technologies and sanitizer solutions on microbial load reduction and quality retention of strawberries / E.M.C. Alexandre, T.R.S. Brandao, C.L.M. Silva // *J. Food Engineering*. – 2012. – № 108. – P. 417–426.

252. Alegria, C. Quality attributes of shredded carrot (*Daucus carota* L. cv.Nantes) as affected by alternative decontamination processes to chlorine / C. Alegria // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2009. – № 10. – P. 61–69.

253. Sao Jose, J.F.B. Effect of ultrasound and commercial sanitizers in removing natural contaminants and *Salmonella enterica* Typhimurium on cherry tomatoes / J.F.B. Sao Jose, M.C.D. Vanetti // *Food Control*. – 2012. – № 24. – P. 95–99.

254. Zhou, B. Ultrasound enhanced sanitizer efficacy in reduction of *Escherichia coli* O157:H7 population on spinach leaves / B. Zhou, H. Feng, Y. Luo // *J. Food Science*. – 2009. – № 74 (6). – P. 308–313.

255. Rivera, C.S. Selection of a decontamination treatment for fresh *Tuber aestivum* and *Tuber melanosporum* truffles packaged in modified atmospheres / C.S. Rivera, M.E. Venturini, R. Oria, D. Blanco // *Food Control*. – 2011. – № 22 (3–4). – P. 626–632.

256. Lin, C.S. K. Evaluation of electrolysed water as an agent for reducing methamidophos and dimethoate concentrations in vegetables / C.S. Lin [et al] // *Int. J. Food Science and Technology*. – 2006. – № 41. – P. 1009–1104.

257. Buakham, R. Kinetics of the reduction of pesticide residues in vegetables by ultrasonic cleaning / R. Buakham, S. Songsermpong, C. Eamchotchawalit // *As. J. Food Ag-Ind.* – 2012. – № 5(05). – P. 364–373.

258. Niemczewski, B. Observations of water cavitation intensity under practical ultrasonic cleaning conditions / B. Niemczewski // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2007. – № 14. – P. 13–18.

259. Mansour, S.A. Monitoring of pesticides and heavy metals in cucumber fruits produced from different farming systems / S.A. Mansour, M.H. Belal, A.A. Abou-Arab, M.F. Gad // *Chemosphere*. – 2009. – № 75. – P. 601–609.

260. Pan, C.P. Determination of 15 organophosphorus pesticides in cucumber, tomato and pepper samples by capillary gas chromatography with gel permeation chromatographic clean-up / C.P. Pan [et al] // *Se Pu*. – 2002. – № 20 (6). – P. 565–568.

261. Zohair, A. Behaviour of some organophosphorus and organochlorine pesticides in potatoes during soaking in different solutions / A. Zohair // *Food and Chemical Toxicology*. – 2001. – № 39 (7). – P. 751–755.

262. Whangchai, K. The effects of ultrasonic irradiation in combination with ozone on the reduction of residual ethion of tangerine (*Citrus reticulata* Blanco cv. Sai Nam Pung) fruit after harvest / K. Whangchai [et al] // *Agricultural Sciences*. – 2013. – Vol. 4. – № 5B. – P. 7–11.

263. Battino, M. Bioactive compounds in berries relevant to human health / M. Battino // *Nutrition Reviews*. – 2009. – № 67. – P. 145–150.

264. McDougall, M.G. Berries and health: a review of the evidence. Food and health innovation / M.G. McDougall, D. Stewart // [Электронный ресурс] – 2012. – Режим доступа: <http://www.northsearegion.eu/files/repository/20131219103705UK-Enclosure53sep12.pdf>. – Дата доступа: 14.9.2016.

265. Fernandes, V.C. Pesticide residues in Portuguese strawberries grown in 2009–2010 using integrated pest management and organic farming / V.C. Fernandes, V.F. Domingues, N. Mateus, C. Delerue-Matos // *Environmental Science & Pollution Research*. – 2012. – № 19. – P. 4184–4192.

266. Wołejko, E. Pesticide residues in berries fruits and juices and the potential risk for consumers / E. Wołejko, B. Łozowicka, P. Kaczyński // *Desalination & Water Treatment*. – 2014. – № 52. – P.19–21.

267. Holland, P.T. Effects of storage and processing on pesticide residues in plant products / P.T. Holland, D. Hamilton, B. Ohlin, M.W. Skidmore // *Pure and Applied Chemistry*. – 1994. – № 66. – P. 335–356.

268. Gabler, F.M. Influence of fumigation with high concentrations of ozone gas on postharvest gray mold and fungicide residues on table grapes / F.M. Gabler, J.L. Smilanick, M.F. Mansour, H. Karaca // *Postharvest Biology and Technology*. – 2010. – № 55. – P. 85–90.

269. Sumikura, M. Ozone micro-bubble disinfection method for wastewater reuse system / M. Sumikura [et al] // *Water Science and Technology*. – 2007. – № 56. – P. 53–61.

270. Takahashi, M. Effect of shrinking microbubble on gas hydrate formation / M. Takahashi // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2003. – № 107. – P. 2171–2173.

271. Amvrazi, E.G. Fate of pesticide residues on raw agricultural crops after postharvest storage and food processing to edible portions. pesticides- formulations, effects, fate / E.G. Amvrazi // [Электронный ресурс] – 2014. – Режим доступа: <http://www.intechopen.com/books/pesticidesformulations-effects-fate/fate-of-pesticide-residues-on-raw-agricultural-crops-after-postharvest-storage-and-food-processing-t>. – Дата доступа: 14.9.2016.

272. Rasmussen, R.R. Distribution of multiple pesticide residues in apple segments after home processing / R.R. Rasmussen, M.E. Poulsen, H.C.B. Hansen // *Food Additives & Contaminants*. – 2003. – № 20. – P. 1044–1063.

273. Hansen, J.D. Ultrasound treatments to control surface pests of fruit / J.D. Hansen // *HortTechnology*. April-June. – 2001. – Vol. 11. – № 2. – P. 186–188.

274. Цыбрый, И.К. Особенности пластической деформации стали 12Х17 под влиянием кавитации / И.К. Цыбрый, И.М. Ермоленко // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. – 2015. – № 1. – С. 138–141.

275. Хачатурян, В.А. Влияние ультразвуковой кавитации на структуру и поверхностную твердость стали / В.А. Хачатурян // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. Электрон. науч. ж.* – 2014. – № 2(2). – 10 с.

276. Ножницкий, Ю.А. Разработка и применение новых методов упрочнения деталей ГТД, основанных на пластическом деформировании поверхностных слоев. (Обзор) / Ю.А. Ножницкий, А.В. Фишгойт, Р.И. Ткаченко, С.В. Теплова // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 2. – С. 8–16.

277. Gao, Y. Ultrasonic Cavitation Peening of Stainless Steel and Nickel Alloy / Y. Gao [et al.] // J. Manuf. Sci. Eng. – 2013. – № 136 (1). – 6 p.

278. Nakagawa, M. Effects of Ultrasonic Cavitation Peening with a Block Type Horn Scanning on Residual Stress of Metal Surface / M. Nakagawa, I. Kudo, H. Muto, Y. Watanabe // Proc. Symp. Ultrasonic Electronics; Tokyo, Japan, 6-8 December, 2010. – 2010. – Vol. 31. – P. 231–232.

279. Николаева, Л.А. Санитарно-эпидемиологическая экспертиза пищевых продуктов : уч.-метод. пособие / Л.А. Николаева, Е.В. Ненахова. ГБОУ ВПО ИГМУ Минздрава России. – Иркутск: ИГМУ, 2014. – 90 с.

280. De Sao Jose, J.F.B. [et al.] Decontamination by ultrasound application in fresh fruits and vegetables / J.F.B. de Sao Jose // Food Control. – 2014. – № 45. – P. 36–50.

281. Soria, A.C. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review / A.C. Soria, M. Villamiel // Trends in Food Science & Technology. – 2010. – № 21 (7). – P. 323–331.

282. Gonzalez-Aguillar, G.A. Biochemical changes of fresh-cut pineapple slices treated with antibrowning agents / G.A. Gonzalez-Aguillar // Int. J. Food Science and Technology. – 2005. – № 40 (4). – P. 377–383.

283. Polydera, A.C. Comparative shelf life study and vitamin C loss in pasteurised and high pressure processed reconstituted orange juice / A.C. Polydera, N.G. Stoforos, P.S. Taoukis // J. of Food Enginee. – 2003. – № 60. – P. 21–29.

284. Lee, H. Effect of power ultrasound on food quality / H. Lee, H. Feng // In H. Feng, G. V. Barbosa-Cobnovas, J. Weiss (Eds.). Ultrasound technologies for food and bioprocessing. New York: Springer, 2011. – P. 559–582.

285. Rawson, A. Effect of thermosonication on bioactive compounds in watermelon juice / A. Rawson [et al.] // Food Research International. – 2011. – № 44 (5). – P. 1168–1173.

286. Ashokkumar M. Modification of food ingredients by ultrasound to improve functionality: A preliminary study on a moc system / M. Ashokkumar [et al] // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2008. – № 9. – P.155–160.

287. Aadil, R.M. Effects of ultrasound treatments on quality of grapefruit juice / R.M. Aadil, X. Zeng, Z. Han, D. Sun // *Food Chemistry*. – 2013. – № 141(3). – P. 3201–3206.

288. Cheng, L.H. Effects of sonication and carbonation on guava juice quality / L.H. Cheng, C.Y. Soh, S.C. Liew, F.F. Teh // *Food Chemistry*. – 2007. – № 104. – P. 1396–1401.

289. Tiwari, B.K. Stability of anthocyanins and ascorbic acid in sonicated strawberry juice during storage / B.K. Tiwari [et al] // *European Food Research Technology*. – 2009. – № 228 (5). – P. 717–724.

290. Nascentes, C.C. A fast ultrasound-assisted extraction of Ca, Mg, Mn and Zn from vegetables / C.C. Nascentes, M. Korn, M.A.Z. Arruda // *Microchemical J*. – 2001. – № 69. – P. 37–43.

291. Fava, J. Structure (micro, ultra, nano), color and mechanical properties of *Vitis labrusca* L. (grape Berry) fruits treated by hydrogen peroxide, UV-C irradiation and ultrasound / J. Fava [et al] // *Food Research International*. – 2011. – № 44(9). P. – 594–595.

292. Gomez-Lopez, V.M. Microbiological and sensor quality of sonicated calcium-added orange juice / V.M. Gomez-Lopez, L. Orsolani, A. Martmez-Yepe, M.S. Tapia // *LWT– Food Science and Technology*. – 2010. – № 4. – P. 808–813.

293. Tiwari, B.K. Effect of sonication on orange juice quality parameters during storage / B.K. Tiwari, C.P. O'Donnell, K. Muthukumarappan, P.J. Cullen // *Int. J. Food Science and Technology*. – 2009. – № 44. – P. 586–595.

294. Wong, E. Osmosonication of blackberry juice: Impact on selected pathogen spoilage microorganisms, and main quality parameters / E. Wong, F. Vaillant, A. Perez // *J. of Food Science*. – 2010. – № 75. – P. 468–174.

295. Alexandre, E.M.C. Efficacy of non-thermal technologies and sanitizer solutions on microbial load reduction and quality retention of strawberries / E.M.C. Alexandre, T.R.S. Brandro, C.L.M. Silva // *J. Food Engineering*. – 2012. – № 108 (3). – 417–426.

296. Tiwari, B.K. Ascorbic acid degradation kinetics of sonicated orange juice during storage and comparison with thermally pasteurised

juice / B.K. Tiwari, C.P. O'Donnell, K. Muthukumarappan, P.J. Cullen // *LWT – Food Science and Technology*. – 2009. – № 42. – P. 700–704.

297. Tiwari, B.K. Effect of ultrasound processing on anthocyanins and color of red grape juice / B.K. Tiwari [et al] // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2010. – №17(3). – P. 598–604.

298. Пожарникова, Е.Н. Сенсорный анализ продовольственных товаров. Курс лекций / Е.Н. Пожарникова, Н.А. Феоктистова, Д.А. Васильев. – Ульяновск, УГСХА, 2008. – 87 с.

299. Tarun, E.I. Flavonoids as effective protectors of urease from ultrasound inactivation in solutions / E.I. Tarun, V.P. Kurchenko, D.I. Metelitsa // *Bioorganism Khimica*. – 2006. – № 32. – P. 391–398.

300. Jang, J.H. Inhibition of polyphenol oxidase and peroxidase activities on fresh-cut appl by simultaneous treatment of ultrasound and ascorbic acid / J.H. Jang, K.D. Moon // *Food Chemistry*. – 2011. – № 124. – P. 444–449.

301. Tiwari, B.K. Modelling colour degradation of orange juice by ozone treatment using response surface methodology / B.K. Tiwari, K. Muthukumarappan, C.P. O'Donnell, P.J. Cullen // *J. of Food Engineering*. – 2008. – № 88. – P. 553–560.

302. Raviyan, P. Ultrasonication for tomato pectinmethylesterase inactivation: El cavitation intensity and temperature on inactivation / P. Raviyan, Z. Zhang, H. Feng // *J. Food Engineering*. – 2005. – № 70. – P. 18

303. Terefe, N.S. The kinetics of inactivation of pectin methylesterase and polygalacturonase in tomato juice by thermosonication / N.S. Terefe // *Food Chemistry*. – 2009. – № 117. – P. 20–27.

304. Kuldiloke, J. Inactivation of lemon pectinesterase by thermosonication / J. Kuldiloke, M. Eshtiaghi, M. Zenker, D. Knorr // *Int. J. Food Engineering*. – 2007. – № 3. – art. 3.

305. Lopez, P. Inactivation of peroxidase, lipoxigenase, and polyphenol oxidase by manothermosonication / P. Lopez [et al] // *J. Agricultural and Food Chemistry*. – 1994. – № 42. – P. 252–256.

306. Cruz, R.M.S. Effect of heat and thermosonication treatments on peroxidase inactivation kinetics in watercress (*Nasturtium officinale*) / R.M.S. Cruz, M.C. Vieira, C.L.M. Silva // *J. Food Engineering*. – 2006. – №72(1). – P. 8–15.

307. Lamikanra, O. Enzymatic effects on flavor and texture of fresh-cut fruits and vegetables / O. Lamikanra. In O. Lamikanra (Ed.), *Fresh*

cut fruits and vegetables: Science, technology and market. Washington DC: Ed. CRC Press, 2002.

308. Руднев, С.Д. Природа прочности растительной ткани с позиций селективной дезинтеграции / С.Д.Руднев, А.В. Грачев, Е.А. Лавринова // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2011. – № 2.

309. Fuente-Blanco, S. Food drying process by power ultrasound / S. Fuente-Blanco [et al] // Ultrasonics Sonochemistry. – 2006. – №44. – P. e523–e527.

310. Tarleton, E.S. The role of field-assisted techniques in solid/liquid separation / E.S. Tarleton // Filtration Separation. – 1992. – № 3. – P. 246–253.

311. Tarleton, E.S. Ultrasonically assisted separation process / E.S. Tarleton, R.J. Wakeman // Ultrasounds in Food Processing. M.J.W. Povey, T.J. Mason (eds). — Glasgow, U.K.: Blackie Academic and Professional, 1998. P. – 193–218.

312. Шорский, И.А. Совершенствование процесса экстрагирования масляных материалов на основе применения электрофизического воздействия. Дисс... канд. тех. наук: 05.18.12. Краснодар, 2016. – 158 с.

313. Смирнов, А.М. Организация процесса мойки деталей в струйных системах камерного типа. Особенности процесса / А.М. Смирнов, А.В. Савельев // [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://docplayer.ru/46628457-Smirnov-a-m-generalnyu-direktor-ooo-ntk-soltek-k-t-n.html>. – Дата доступа: 22.9.2016.

314. Способ ультразвуковой гидродинамической очистки поверхностей изделий. Дьяков, И.Ф., Моисеев, Ю.В. Пат. РФ № 2427 433. 2010.

315. Способ гидродинамической обработки поверхности и устройство для его осуществления. В.И. Ларин. Пат. РФ 2250145.

316. Приходько, В.М. Использование координатной обработки для интенсификации процесса ультразвуковой очистки / В.М. Приходько, А.Е. Шеина, Е.Г. Юдаков // Уч. зап. физ. фак-та Моск. ун-а. – 2014. – № 5. – С. 145340-1-145340-4.

317. Медведев, А. Ультразвуковая очистка. Теория и практика / А. Медведев // Схемотехника. – 2001. – № 9. – С. 36–40.



318. Томаль, В. Ультразвуковая очистка микрорельефных поверхностей оптоэлектронных изделий / В. Томаль, В. Ланин // Фотоника. – 2007. – №4. – С. 35–40.

319. Луговской, А.Ф. Исследование рабочей зоны высокоамплитудного кавитационного ультразвукового привода / А.Ф. Луговской, А.В. Мовчанюк, В.П. Фесич, И.С. Гришко // Вестник КПДУ. – 2008. – Вып. 2. – Ч. 2. – С. 81–84.

320. Толочко, Н.К. Факторы неравномерной очистки деталей машин в ультразвуковых ваннах / Н.К. Толочко, В.С. Корко, А.Н. Челединов, В.Л. Ланин // Вестник машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 82–85.

321. Толочко, Н.К. Особенности развития кавитации и эффективность очистных процессов в ультразвуковой ванне / Н.К. Толочко, В.С. Корко, А.Н. Челединов // Агропанорама. – 2016. – № 6. – С. 30–34.

322. Голых, Р.Н. Повышение эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в гетерогенных системах с несущей высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой: дис... канд. тех. наук: 05.17.08 / Алтайский гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. Барнаул, 2014. – 193 с.

323. Толочко, Н.К. Ультразвуковая очистка поверхности яблок от микробных загрязнений / Н.К. Толочко, В.С. Корко, А.Н. Челединов, З.Е. Егорова // Агропанорама. – 2015. – № 5. – С. 27–29.

324. Серебряков, О.А. Современные способы очистки поверхности изделий / О.А. Серебряков // Мед. портал Rusmed.ru. – [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://www.rusmed.ru>. – Дата доступа: 19.02.16.

325. Агранат, Б.А. Основы физики и техники ультразвука: учеб. пособ. / Б.А. Агранат [и др.] – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

326. Техника мойки изделий в машиностроении / Е.Б. Крутоус, М.И. Некрич. – М.: Машиностроение, 1969. – 240 с.

327. Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing, Food Engineering Series. H. Feng [et al] (eds.). DOI 10.1007/978-1-4419-7472-3\_5. © Springer Science+Business Media. 2011.

328. MMM Basics Presentation // [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://www.novascientific.com.my>. – Дата доступа: 19.02.16.

329. Корнеев, В.М. Совершенствование системы качества при сервисе МТП в АПК / В.М. Корнеев, К.В. Трелина, Н.А. Петрищев // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т.119. – С. 16–22.

330. Лебединский, К.В. Совершенствование технологии гидродинамической кавитационной очистки поверхности деталей от масляных загрязнений. Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.08. Пенза, 2012. – 22 с.

331. Кудряшов, М.Б. Автоматизация технологического процесса ультразвуковой очистки деталей на промышленном предприятии. Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.06. М., 2005. – 20 с.

332. Приходько, В.М. Автоматизированный комплекс ультразвуковой обработки на базе передвижной лаборатории-мастерской / В.М. Приходько, Д.С. Фатюхин, Е.Г. Юдаков // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2014. – № 11. – С. 7–11.

333. Современные технологии хранения пищевых продуктов / Р.З. Григорьева. – Кемерово: Кемеровский технолог. ин-т пищ. пром-сти, 2003. – 104 с.

334. Першакова, Т.В. Способы обеспечения стабильного качества растительного сырья в процессе хранения / Т.В. Першакова [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – № 116 (02). – 2016. – С. 2–13.

335. Оборудование для мойки овощей на страже чистоты // [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: [http://mapp23.ru/o-kompanii/novosti/\\_oborudovanie-dlya-mojki-ovoshhej.html](http://mapp23.ru/o-kompanii/novosti/_oborudovanie-dlya-mojki-ovoshhej.html). – Дата доступа: 19.02.16.

336. Исследование потребительского рынка свежих и сушеных фруктов в России. Проект конкурентоспособности сельского хозяйства и развития предприятий (ACED) // [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: [www.rusia.mfa.md/.../consumer-fresh-and-dried-fruits-in-rusia.pdf](http://www.rusia.mfa.md/.../consumer-fresh-and-dried-fruits-in-rusia.pdf). – Дата доступа: 19.02.16.

337. Федоренко, В.Ф. Технологические процессы и оборудование, применяемые при производстве продуктов питания: науч. анализ. Обзор / В.Ф. Федоренко, Н.П. Мишуков, Л.Ю. Коноваленко, Л.А. Неменушая – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. – 192 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

Научное издание

**Толочко** Николай Константинович,  
**Челединов** Александр Николаевич

КАВИТАЦИОННЫЕ  
МОЕЧНО-ОЧИСТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ  
В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Ответственный за выпуск *М. А. Прищепов*  
Редактор *Г. В. Анисимова*  
Верстка *Е. А. Хмельницкой*  
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 29.10.2018. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 16,50. Уч.-изд. л. 12,90. Тираж 100 экз. Заказ 481.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.