

И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 203 с.

3. Фигаро, Б.И. Теория электропривода / Б.И. Фигаро, Л.Б. Павлячик. – М.: Техноперспектива, 2007. – 88 с.

4. Гридин, В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным / В.М. Гридин // Электричество. – 2012. – № 5. – С. 40-44.

5. Прищепов, М.А. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным и построение их естественных механических и электромеханических характеристик / М.А. Прищепов, Е.М. Прищепова, Д.М. Иванов // Агропанорама, 2016. – № 5 (117). – С.20-32.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 24.11.2016

УДК 621.9. 048.6

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТНЫХ ПРОЦЕССОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВАННЕ

**Н.К. Толочко,**

*профессор каф. технологии металлов БГАТУ, докт. ф.-м. наук, профессор*

**В.С. Корко,**

*доцент каф. электротехнологий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**А.Н. Челединов,**

*аспирант каф. технологии металлов БГАТУ*

*Экспериментально исследованы особенности развития кавитации в ультразвуковой ванне. Рассмотрено влияние пространственной неоднородности, активности кавитации на эффективность очистных процессов.*

*Ключевые слова: кавитация, ультразвуковая ванна, загрязнение, очистка*

*The peculiarities of cavitation development in ultrasonic bath are investigated experimentally. The effect of spatial irregularity of cavitation activity on the cleaning process efficiency is considered.*

*Keywords: cavitation, ultrasonic bath, contamination, cleaning.*

### Введение

В аграрной индустрии важная роль отводится процессам очистки поверхности деталей сельхозтехники и плодоовощных продуктов от различных видов загрязнений. В последние годы получили распространение очистные процессы, основанные на использовании ультразвука [1-3]. Для их реализации широко применяются ультразвуковые (УЗ) моечные ванны. Эффективность очистки в УЗ ваннах определяется активностью кавитации  $a_k$ , которая, в свою очередь, зависит от особенностей распространения УЗ волн в объеме жидкости, заполняющей ванну. На практике учет этих особенностей позволяет оптимизировать условия реализации очистных процессов. Особенно важно учитывать распределение  $a_k$  по объему жидкости, которое, как правило, является неоднородным.

Цель данной работы – экспериментально исследовать особенности проявления неоднородностей в распределении  $a_k$  по объему жидкости в УЗ ванне и оценить степень влияния этих неоднородностей на равномерность удаления загрязнений с поверхности очищаемых предметов. До сих пор эти вопросы были изучены недостаточно.

### Основная часть

Эксперименты проводились на ультразвуковой установке УЗУ-0,25 (потребляемая мощность генератора – 450 Вт, выходная – 250 Вт, рабочая частота – 18 кГц). Размеры полости ванны (длина – 22 см, ширина – 17 см, глубина – 16 см, объем – 4,5 л). Ванна была снабжена тремя пьезоэлектрическими преобразователями (УЗ излучателями), встроенными в ее донной части. Ванну заполняли водой до некоторого фиксированного уровня  $H_0$ .

### Особенности развития кавитации

Значения  $a_k$  оценивали по звуковому давлению в кавитирующей воде, измеряемому с помощью кавитометра – индикатора кавитационной активности ИСА-4Д (производство БГУИР, г. Минск). Он состоит из электронного блока и выносного измерительного щупа – датчика (широкополосного гидрофона) с волноводом. Действие прибора основано на анализе и обработке спектра кавитационного шума, воспринимаемого щупом. Используемый щуп в силу особенностей своей конструкции характеризовался сравнительно малой локализацией области измерений. Кавитометр измерял полную активность кавитации, т.е. активность и пуль-

сирующих и захлопывающихся кавитационных пузырьков. 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 вертикально ориентированный щуп перемещали по объему воды в ванне, устанавливая его над разными местами дна ванны (над излучателями, между излучателями и над свободными от излучателей участками) и на разном расстоянии  $H$  от излучателей (от дна ванны). Измерениями охватывался практически весь объем воды в ванне. Точки, соответствующие положению концевой части щупа, распределялись горизонтальными слоями с интервалом 1 см, при этом нижний слой находился на расстоянии 3 мм от излучателей (от дна ванны). В пределах каждого слоя эти точки располагались взаимно-пересекающимися рядами с интервалом 2 см.

Проведены две серии экспериментов по исследованию характера распределения  $a_k$  по объему воды в ванне. В первой серии ванна не была загружена. В этом случае изменения в объемном распределении  $a_k$  были обусловлены только лишь затуханием распространяющихся УЗ волн в результате их поглощения водой. Во второй серии ванну загружали яблоками, которые служили в качестве модельных объектов, рассеивающих УЗ волны. Соответственно, в этом случае изменения в объемном распределении  $a_k$  были связаны с затуханием УЗ волн в результате не только их поглощения водой, но и рассеяния яблоками.

На рис. 1 и 2 представлены типичные результаты экспериментов по исследованию распределения  $a_k$  по объему воды в незагруженной ванне при  $H_0 = 13$  см. В целом  $a_k$  распределяется по объему весьма неравномерно. Наибольшие значения  $a_k$  наблюдаются вблизи излучателей. С удалением от излучателей по горизонтали  $a_k$  уменьшается сравнительно слабо: различие в значениях  $a_k$  вблизи излучателей и у стенок ванны составляет около 20 % (рис. 1). Гораздо более сильное уменьшение  $a_k$  происходит с удалением от излучателей по вертикали: различие в значениях  $a_k$  вблизи излучателей и у водной поверхности доходит приблизительно до 2 раз (рис. 2, кривая 1).

На рис. 2 обращает на себя внимание волнообразная форма кривой 1, свидетельствующая о наличии периодического изменения значений  $a_k$  по высоте столба воды в ванне в соответствии с чередованием областей разрежения и сжатия вдоль направления распространения УЗ волны, следующих друг за другом через полуволновые периоды.

Для сравнения на рис. 2 представлены типичные результаты аналогичных экспериментов по исследованию распределения  $a_k$  вдоль вертикального направления в загруженной ванне (кривая 2) при  $H_0 = 14$  см. Ванну почти полностью загружали яблоками размером 4-5 см, располагая их в полости ванны 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 проведе-

нии измерений  $a_k$  щуп помещали в воду в зазорах между яблоками.

В целом, и в загруженной и в незагруженной ванне зависимости  $a_k(H)$  имеют подобный характер: 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. 3. 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 щуп 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 в отсутствие яблока.

Результаты измерений представлены в табл. 1., там же даны отношения значений  $a_k$  в точках Б и А

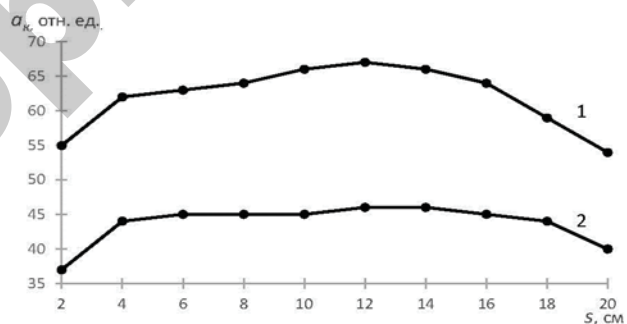


Рисунок 1. Изменение  $a_k$  вдоль продольного направления незагруженной ванны над излучателями (1 и 2) на расстоянии 3 мм (1) и 12 см (2) от них

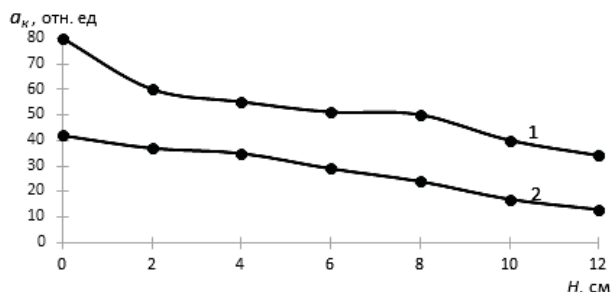


Рисунок 2. Изменение  $a_k$  вдоль вертикального направления незагруженной (1) и загруженной (2) ванны над точкой ее дна, лежащей между тремя излучателями

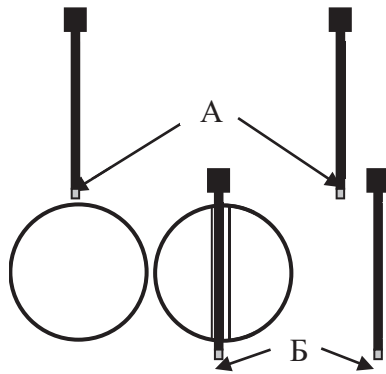


Рисунок 3. Схема измерений  $a_k$  в окрестности одиночного яблока

**Таблица 1. Результаты измерения  $a_k$  (отн. ед.) в окрестности одиночного яблока (рис. 3)**

Условия измерений	Точка измерения		$a_{kB}/a_{kA}$
	А	Б	
Наличие яблока	26	34	1,31
Отсутствие яблока	43	47	1,09

( $a_{kB}/a_{kA}$ ), показывающие, во сколько раз активность кавитации в точке Б больше, чем в точке А.

Анализ полученных результатов показывает, что значения  $a_k$  в окрестности 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.

#### Эффективность очистных процессов

Неоднородности распределения  $a_k$  по объему воды в УЗ ванне являются причиной неравномерного удаления загрязнений с поверхности различных

предметов, подтверждением чему являются представленные ниже в качестве примеров результаты ряда экспериментов по УЗ очистке типовых деталей сельхозтехники и яблок:

#### 1. Очистка зубчатой рейки от масляно-грунтовых загрязнений.

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 равномерным по толщине слоем модельное загрязнение в виде смеси глины (3 ч.) и нигрола (1 ч.). В процессе УЗ очистки рейку периодически (через 5 мин.) извлекали из ванны и фотографировали очищаемую поверхность (рис. 4). Как показали результаты эксперимента, загрязнение удалялось в первую очередь с нижнего конца рейки, расположенного вблизи излучателя (на рис. 4 этот конец находится слева), а затем со временем очищенная область распространялась вверх по всей длине рейки.

#### 2. Очистка крышки топливного насоса от масляно-грунтовых загрязнений.

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 части 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 приготовленный трафарет (рис. 5). 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. Во время очистки крышку время от времени извлекали и визуально контролировали наличие загрязнений, фиксируя длительность УЗ обработки, максимальное значение которой составляло 5 мин.

Результаты очистки крышки представлены в табл. 2. Загрязнение удаляется быстрее с поверхности, обращенной вниз, т.е. в сторону излучателей, чем

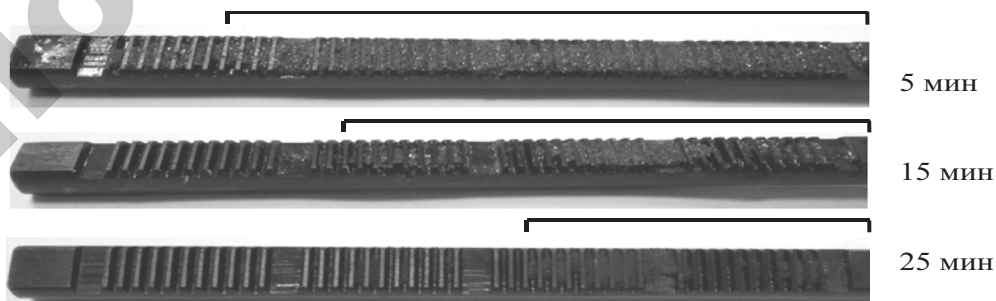


Рисунок 4. Поверхность зубчатой рейки спустя разные периоды (минуты) УЗ очистки (левый конец рейки обращен к излучателю; скобками указаны участки с остаточным загрязнением)



Рисунок 5. Крышка топливного насоса (участки нанесенного загрязнения обозначены белыми заштрихованными кружками)

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.

### 3. 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. 6. 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).

### 4. Очистка яблок от микробных загрязнений [4].

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.



Рисунок 6. Поверхность яблок в области углубления у плодоножки после очистки в разных условиях: обычная мойка с хаотическим перемещением, когда плодоножка попеременно обращается то вниз, то вверх (а); УЗ очистка в неподвижном состоянии, когда плодоножка постоянно обращена вверх (б) или вниз (в)

**Таблица 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)

### Заключение

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, в экспериментах по УЗ очистке наблюдается неравномерное удаление загрязнений с поверхности очищаемых предметов. 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 повышением 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 при этом не решается полностью проблема обеспечения равномерной очистки и, кроме того, усложняется конструкция ванн, что ведет к уве-

личению их стоимости. Более эффективно использовать специальные приспособления, обеспечивающие повышение равномерности очистки в объемно-неоднородном УЗ поле путем регулируемого изменения расположения очищаемых предметов в объеме воды в ванне.

Полученные экспериментальные данные по влиянию неоднородностей в распределении  $a_k$  по объему жидкости в УЗ ванне на равномерность удаления загрязнений с поверхности очищаемых предметов могут быть использованы при выборе оптимальных условий реализации очистных процессов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев [и др.]. – Бийск: Алтайский гос. технич. ун-т, 2010. – 203 с.
2. Илюхин, А.В. Методы ультразвуковой очистки деталей в условиях основного и ремонтного производства / А.В. Илюхин, А.М. Колбасин, П.А. Цепкин // Наукоедение. – 2013. – №3. – С. 1-5.
3. Инновационные технологии переработки плодовоовощной продукции = Advances in Fruit Processing Technologies / ред.: С. Родригес, Ф.А.Н. Фернадес; пер. Ю.Г. Базарнова. – Санкт-Петербург: Профессия, 2014. – 456 с.
4. 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.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 13.05.2016

### Измерители-регуляторы МТ2

*Предназначены для измерения и регулирования температуры (в комплекте с датчиками температуры), а также других неэлектрических величин (давление, уровень, влажность и т.д.)*



*Измерители-регуляторы МТ2 являются универсальными цифровыми программируемыми микропроцессорными устройствами. Они могут быть использованы при создании систем автоматического контроля и регулирования различных параметров технологических процессов в промышленности и сельском хозяйстве.*

#### Основные технические данные

Напряжение питания	230 В ± 10%, 50 Гц
Потребляемая мощность, не более	4 ВА
Масса, не более	0,4 кг
Габаритные размеры	120x96x48 мм
Входной сигнал (измерительный преобразователь)	Термопреобразователь сопротивления: ТСП50П, ТСП100П, ТСМ50М, ТСМ 100М; Термопара типа: «L», «J», «K»; Унифицированный токовый сигнал: 0...5мА, 0...20мА, 4...20мА
Предел основной приведенной погрешности измерения	±0,5 %
Закон регулирования	позиционный, ПИД