

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИИ ДЛЯ НЕОДНОРОДНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ

**Введение.** Ультразвуковые колебания широко используются для интенсификации физико-химических процессов в жидкостях, например при диспергировании суспензий наночастиц [1]. Общеизвестно, что ключевым фактором при этом является кавитация – явление образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа под действием переменного давления ультразвуковой частоты [2].

Датчики кавитации волноводного типа в настоящее время наиболее распространены и обладают наибольшим потенциалом. Для работы в неоднородных ультразвуковых полях они должны обладать высокой чувствительностью и хорошо улавливать изменения кавитационного поля в объеме жидкости [3].

**Методика и установка.** Общий вид использованной установки представлен на рисунке 1. Рабочая емкость представляет собой ультразвуковую ванну (1), ко дну которой прикреплен пьезокерамический излучатель. В емкость опускается датчик кавитации (2), положение которого изменяется при помощи позиционирующего устройства (3). Датчик при помощи пьезопреобразователей преобразует энергию механических колебаний в электрический сигнал, поступающий на анализатор спектра (5) и кавитометр (4), который из всего спектра сигнала выделяет составляющие, обусловленные пульсацией и захлопыванием кавитационных пузырей. Данные с кавитометра поступают на компьютер (6), где в специальной программе в реальном времени можно наблюдать за изменениями показаний датчика. Постоянство температуры в реакторе обеспечивалось при помощи термостата (7).



Рисунок 1 – Установка для исследования датчиков

Ультразвуковая волна, распространяясь от дна ванны (которое является излучателем), отражается от границы раздела жидкость-газ и в результате наложения падающей и отраженной волн наблюдается стоячая волна. Так как в реальной системе происходит потери энергии и отсутствует полное отражение волны, то мы не можем наблюдать идеальную стоячую волну. Будет наблюдаться режим смешанных волн, поскольку всегда присутствует перенос энергии к местам поглощения и излучения. Несмотря на это в установке можно наблюдать чередующие минимумы и максимумы интенсивности. Доказано, что в областях с более высокой интенсивностью ультразвуковой волны захлопывание кавитационных пузырей происходит активнее.

Методика исследований будет заключаться в следующем. Датчик фиксируется у границы раздела жидкость-газ и опускается каждую секунду на 2 мм пока не достигнет дна. Это позволит получить картину распределения кавитационного поля в реакторе. Дальше изменяется один из параметров конструкции датчика и опыт повторяется. Мы знаем, что реальное распределение кавитационного поля в ванне представляет собой чередующиеся минимумы и максимумы, расположенные на расстоянии половины длины волны излучателя. Изменяя различные параметры конструкции датчиков, мы сможем оценить, как влияют эти параметры на способность датчика выявлять описанные неравномерности кавитационного поля (под этим мы будем понимать разрешающую способность датчика).

**Результаты и обсуждение.** Выбор оптимального диаметра волновода является одной из важнейших задач при оптимизации конструкции датчиков. Теоретически увеличение диаметра волновода ведет к возрастанию чувствительности датчика. Это происходит потому, что вблизи большего волновода пульсирует и захлопывается большее количество кавитационных пузырьков. Следовательно, на датчик попадает большее количество ударных волн. С другой стороны, массивный волновод, внесенный в ультразвуковое поле может привести к его искажению. Для проверки данного предположения был сконструирован датчик кавитации со сменными волноводами, которые крепились к основной части при помощи резьбового соединения. Упрощенная модель такого датчика представлена на рис. 2.

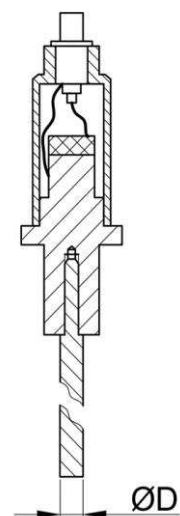


Рисунок 2 –  
Схема датчика со  
сменными  
волноводами

Зависимости активности кавитации от глубины погружения датчика для различных диаметров волновода представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3 тонкий волновод (2 мм) обеспечивает наилучшую разрешающую способность при наименьшей чувствительности, что полностью соответствует теоретическому предположению.

Датчик с таким волноводом отчетливо

выделил максимумы на уровне 13 и 35 мм, а также минимум на уровне 22 мм, чего не смог сделать датчик с волноводами диаметром 5 и 10 мм. Однако массивный волновод обеспечивает значительно большую чувствительность (более чем в 2 раза). Тем не менее можно порекомендовать использовать волновод с меньшим диаметром (2-4 мм), так как искажение ультразвукового поля в этом случае минимальны. Потерю в чувствительности можно компенсировать, например, использованием более толстого пьезопреобразователя.

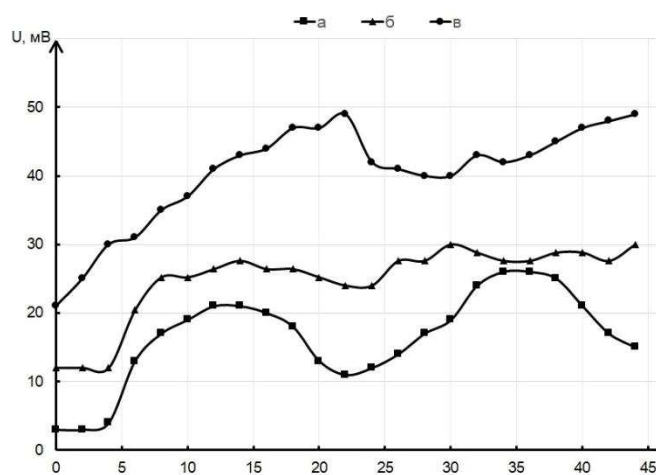


Рисунок 3 – Распределение кавитационного поля, снятое датчиком с диаметром волновода:  
а – 2 мм; б – 5 мм; в – 10 мм

Вторым важным аспектом в оптимизации конструкции волноводных датчиков является исключение влияния боковой поверхности волновода на результирующий сигнал. Датчик воспринимает механические колебания не только торцом волновода, но и его боковой поверхностью. Поэтому результирующий сигнал получается «размазанным» по объему ультразвуковой ванны (особенно при глубоком погружении датчика в жидкость). Конечно, вклад боковой поверхности на результирующий сигнал меньше чем вклад торца, но для увеличения разрешающей способности требуется избавиться от этой составляющей. Одним из способов решения данной проблемы является экранирование волновода. Для этого применялись термоусадочные резиновые трубки. Было предложено два способа экранирования. Первый заключается в плотном припаивании резиновой трубки к волноводу с помощью фена. Слой резины активно поглощает колебания, созданные кавитацией, поэтому вклад боковой поверхности уменьшается. Второй способ экранирования заключается в присутствии воздушной прослойки между металлическим волноводом и резиновым экраном.

Как видно из рис. 4 использование плотно прилегающего экрана ведет к потере чувствительности более чем в 6 раз по сравнению с неэкранированным датчиком, что ведет к нецелесообразности использования такого экрана.

Неэкранированный волновод обеспечивает наибольшую

чувствительность, однако недостаточно хорошо выделяет экстремумы кавитационного поля. Использование экрана с воздушной прослойкой между волноводом и экраном позволяет значительно увеличить разрешающую способность датчика, потеря чувствительности составляет около 30%. И использование такой конструкции наиболее оптимально, так как она совмещает в себе высокую разрешающую способность и достаточную чувствительность.

**Заключение.** На основе проведенных опытов можно дать следующие рекомендации по оптимизации конструкции датчиков

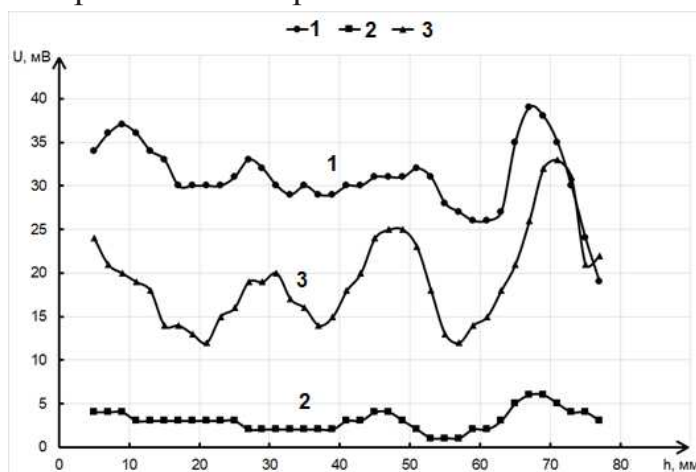


Рисунок 4 – Распределение кавитационного поля, снятое датчиком с различными видами экранирования: 1 – без экрана, 2 – припаянный экран; 3 – с воздушным зазором

кавитации для работы в неоднородных ультразвуковых полях. Использование волновода диаметром 2-4 мм позволяет существенно повысить разрешающую способность датчиков за счет минимальных искажений исходного ультразвукового поля. Для компенсации уменьшения чувствительности можно использовать более толстые пьезопреобразователи. Экранирование боковой поверхности волновода резиновым экраном с воздушным зазором между волноводом позволяет существенно повысить разрешающую способность, потеря чувствительности при этом относительно невысока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. – М.: Химия, 1983. – 192 С.
2. В.О. Абрамов и др. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении, под общ. ред. О. В. Абрамова и В. М. Приходько. Москва. Русавиа. 2006. 687 стр.
3. Daniel Sarno, Mark Hodnett, Lian Wang, Bajram Zeqiri. An objective comparison of commercially-available cavitation meters. *Ultrasonics Sonochemistry*. 34 (2017), P.354 – 364.