



Москва

Тел./Факс: **8 (800) 100-123-7** (Звонки по России бесплатно);

**+7 (495) 617-19 -45, -46, -47, -48; +7(499) 795-77-86**

E-mail: [svarog@svarog-uv.ru](mailto:svarog@svarog-uv.ru)

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КАВИТАЦИЯ

Ультразвук — упругие звуковые колебания высокой частоты. Обычно ультразвуковым диапазоном считают полосу частот от 20 000 до миллиарда Гц. В жидкостях и твердых телах звуковые колебания могут достигать 1000 ГГц.

Частота сверхвысокочастотных ультразвуковых волн, применяемых в промышленности и биологии, лежит в диапазоне порядка нескольких МГц. Фокусировка таких пучков обычно осуществляется с помощью специальных звуковых линз и зеркал. Ультразвуковой пучок с необходимыми параметрами можно получить с помощью соответствующего преобразователя. Наиболее распространены керамические преобразователи из титанита бария. В тех случаях, когда основное значение имеет мощность ультразвукового пучка, обычно используются механические источники ультразвука.

Излучатели ультразвука можно подразделить на две большие группы. К первой относятся излучатели-генераторы; колебания в них возбуждаются из-за наличия препятствий на пути постоянного потока — струи газа или жидкости. Вторая группа излучателей — электроакустические преобразователи; они преобразуют уже заданные колебания электрического напряжения или тока в механическое колебание твердого тела, которое и излучает в окружающую среду акустические волны.

Ультразвуковая кавитация - возникновение в жидкости, облучаемой ультразвуком, пульсирующих и захлопывающихся пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью. Кавитационные пузырьки в распространяющейся в жидкости ультразвуковой волне возникают и расширяются во время полупериодов разрежения и сжимаются после перехода в область повышенного давления.

В идеальных однородных жидкостях пузырьки могут возникнуть лишь при весьма высоких растягивающих усилиях (отрицательных давлениях), превосходящих прочность жидкости.

Прочность реальных жидкостей довольно низка из-за того, что в них всегда достаточно много зародышей кавитации – микропузырьков газа, пылинок гидрофобных частиц и т. д. Возможно также, что зародыши кавитации непрерывно возникают при прохождении через жидкость космических частиц, а затем снова растворяются. Пузырьки газа с диаметром 10-5 см, по-видимому, могут сколь угодно находиться в воде, если их поверхность стабилизирована органическими загрязнениями, обычно присутствующими в «чистой» воде.

Кроме того, предполагается, что микропузырьки газа, даже не стабилизированные органикой, в принципе, не могут раствориться из-за особенностей структуры воды в межфазном слое жидкость - газ, ограничивающем пузырек.

Порогом кавитации называется интенсивность ультразвука, ниже которой не наблюдаются кавитационные явления. Порог кавитации зависит от параметров, характеризующих как ультразвук, так и саму жидкость.

Для воды и водных растворов пороги кавитации возрастают с увеличением частоты ультразвука и уменьшением времени воздействия.

При расширении пузырьков-зародышей, попадающих в область пониженного давления, в пузырек испаряется жидкость и диффундирует растворенный в жидкости газ. Если температура жидкости значительно ниже точки кипения, то пузырьки растут главным образом в результате диффузии.

При повышении давления в следующую половину периода колебания пузырек сжимается, направление диффузии меняется, и молекулы диффундируют из пузырька в жидкость. Количество продиффундировавшего газа пропорционально площади поверхности пузырька. Эта площадь в стадии сжатия меньше, чем в стадии расширения. Поэтому количество газа, попадающего в пузырек при расширении, несколько больше количества газа, выходящего из пузырька при его сжатии. Поэтому после каждого цикла сжатия-растяжения в пузырьке остается избыток газа.

Накопление газа в пузырьке, обуславливающее рост среднего размера пузырька в поле переменного давления, называется выпрямленной, или направленной, диффузией. Диффузионный механизм обеспечивает сравнительно медленный рост зародышей, и при высокой частоте ультразвука они успевают совершить значительное число пульсаций, прежде чем достигнут резонансных размеров. Амплитуда пульсации пузырька с резонансными размерами (для данной частоты ультразвука) будет максимальной. Пульсирующие в течение многих периодов пузырьки называются стабильными полостями, а само явление, связанное с существованием в жидкости таких пузырьков, - стабильной кавитацией.

Повышение интенсивности ультразвука приводит к нестабильной кавитации: пузырьки довольно быстро (за несколько периодов) достигают резонансного размера, стремительно расширяются, после чего резко захлопываются.

Предполагается, что при захлопывании содержащаяся в пузырьке парогазовая смесь, адиабатически (не успевая обменяться теплом с окружающей средой) сжимается до давления 105 Па (300 атм) и нагревается до температур порядка 8000 - 12000 К. Известно, что уже при 2000 К около 0,01 % молекул  $H_2O$  внутри пузырька диссоциируют на водородные и гидроксильные свободные радикалы. Эти радикалы могут рекомбинировать с образованием электронно-возбужденных состояний молекул  $H_2O^*$ : При переходе молекул  $H_2O^*$  из электронно-возбужденного состояния в основное высвечивается квант света - происходит сонолюминесценция.

Свободные Н и ОН радикалы могут диффундировать в раствор и вступать в реакции с растворителем или растворенными веществами, инициируя радикальные химические процессы.

Захлопывающиеся кавитационные пузырьки порождают в жидкости мощные импульсы давления и ударные волны.

Кавитация в жидкости сопровождается различными явлениями:

- характерным шумом во всем диапазоне частот и сильным акустическим сигналом на частоте, равной половине частоты ультразвука, вызвавшего кавитацию;
- ускорением одних химических реакций и инициированием других;
- интенсивными микропотоками и ударными волнами, способными перемешивать слои жидкости и разрушать поверхности граничащих с кавитирующей жидкостью твердых тел;
- ультразвуковым свечением, а также различными биологическими эффектами.

Вследствие концентрирования энергии в очень малых объемах ультразвук может вызывать такие явления, как разрыв химических связей макромолекул, инициирование химических реакций, эрозию поверхностей твердых тел и свечение. Кавитация в суспензии клеток.

При повышении интенсивности ультразвука до значений, когда в среде возникают механические усилия, сравнимые с прочностью клеточных мембран, начинается процесс разрушения клеток.

Обычно появление значительных механических возмущений в жидкостях связано с возникновением в них стабильных и нестабильных газовых пузырьков, которые могут образоваться в воде и водных средах, если интенсивность ультразвука превышает порог кавитации.

Так, клетки одноклеточной водоросли начинают разрушаться при средней интенсивности, равной 0,2-0,3 Вт/см<sup>2</sup>, при частоте 1 МГц, что соответствует порогу кавитации в водных суспензиях с небольшой концентрацией клеток.

При высоких частотах ультразвукового воздействия на суспензию клеток механизмы разрушения также имеют механическую природу. Пороговая интенсивность ультразвука, вызывающего гибель клеток, зависит как от частоты ультразвука, так и от типа клеток.

Например, порог разрушающего действия ультразвука для клеток одной из популяций элодеи равен 75 мВт/см<sup>2</sup> и находится в области 0,65 МГц, а для двух других популяций элодеи гибельная для клеток минимальная интенсивность равна 180 мВт/см<sup>2</sup> (5 МГц). Ультразвуковая дезинтеграция клеток получила широкое применение в биотехнологии, и биохимических и вирусологических исследованиях для выделения отдельных веществ или фрагментов клеток, а также в лабораторной диагностике для определения механической резистентности клеточных мембран.