

4. Varghese T., Ophir J. // Proc. IEEE Symp. on Ultrasonics. 1997. **44**, No. 1. P. 1128.
5. Rudenko O.V., Sarvazyan A.P., Emelianov S.Y. // J. Acoust. Soc. Am. 1995. **99**, No. 5. P. 2791.
6. Андреев В.Г., Дмитриев В.Н., Пицальников Ю.А. и др. // Акуст. журн. 1997. **43**, № 2. С. 149.
7. Sarvazyan A.P., Rudenko O.V., Swanson S.D. et al. // Ultrasound in Med. and Biol. 1998. **24**, No. 9. P. 1419.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1965.

Поступила в редакцию
10.05.00

УДК 534.222

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В КАВИТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

В. Г. Андреев, Г. А. Романенко

(кафедра акустики)

E-mail: andreev@acs366b.phys.msu.su

Описана экспериментальная установка и методика для определения времени установления стационарной кавитации в жидкости по эволюции спектра кавитационного шума. Приведены временные зависимости амплитуд гармоник как вблизи излучателя, так и за пределами кавитационной области. По виду этих зависимостей оценены характерные времена установления развитой кавитации в воде и трансформаторном масле.

Определение характерных времен установления процесса развитой кавитации в жидкостях имеет принципиальное значение для выбора оптимальных режимов в технологиях, использующих ультразвуковую (УЗ) кавитацию [1, 2]. Особенно это важно в сонохимии при инициировании быстропротекающих химических реакций [3]. Скоростная фотосъемка является наиболее известным методом, использующимся для изучения процесса развития кавитационной области. В работе [4] процесс зарождения и развития кавитации в воде регистрировался с помощью сверхскоростной фотокамеры. Кавитация наблюдалась в фокусе акустического концентратора, работающего на частоте 500 кГц. Было отмечено, что при используемых интенсивностях время образования кавитационной области в фокусе концентратора составляет 15–45 периодов УЗ-колебаний. Аналогичный эксперимент с использованием низкочастотного (15 кГц) излучателя был проведен В.А. Акуличевым [5]. Процесс развития кавитации регистрировался кинокамерой при скорости съемки 200 000 кадров в секунду, что дало возможность детально изучить поведение отдельного пузырька и кавитационной области в целом в течение как одного, так и многих периодов УЗ-колебаний. Количество кавитационных пузырьков, увеличиваясь со временем, приблизительно через 10 периодов достигало насыщения.

Однако подобный метод может использоваться только в прозрачных жидкостях, и, самое главное, с его помощью можно определить только время, требуемое для образования кавитационной области, но не время установления стационарного режима кавитации. Как показали наши измерения, эти времена существенно отличаются. В настоящей работе изучена эволюция спектра кавитационного шума и

по виду зависимостей амплитуд гармоник от времени определено время установления стационарной кавитации.

Возбуждение кавитации производилось при помощи УЗ-генератора. Промышленный УЗ-генератор типа УЗГ3-4 мощностью 4 кВт, работающий на частоте 18 кГц, использовался для питания магнито-стрикционного преобразователя ПМС 15А-18. Магнито-стрикционный преобразователь был снабжен титановым излучателем гантелевидной формы, которая позволяла получить увеличение амплитуды колебаний торца в 1.5–2 раза при сохранении площади излучаемой поверхности. Торцевой излучатель погружался в кювету размерами 400 × 63 × 63 мм, изготовленную из оргстекла. Диаметр входного отверстия кюветы лишь немного превышал диаметр торца излучателя, что способствовало уменьшению захвата воздуха с поверхности жидкости в кавитационном режиме. Кювета заполнялась исследуемой жидкостью — отстоявшейся кипяченой водой или трансформаторным маслом, имеющим повышенную кавитационную прочность по сравнению с водой. Поле акустического давления в кювете измерялось сферическим гидрофоном диаметром 7 мм с резонансной частотой 230 кГц. Размеры гидрофона были малы по сравнению с длиной УЗ-волны ($\lambda = 8.3$ см), следовательно, его присутствие практически не возмущало структуру звукового поля. С другой стороны, он был достаточно большим, чтобы измерять усредненное поле, возникающее при схлопывании сразу многих пузырьков вблизи его поверхности. Высокая собственная резонансная частота гидрофона обеспечила возможность регистрации первых 8–10 гармоник основной частоты УЗ-колебаний с равномерной чувствительностью. Принимаемый гидрофоном сигнал посту-

пал на вход цифрового осциллографа типа Tektronix TDS 520A, память которого позволяла записывать 4 реализации по 50 000 точек. Данные из памяти осциллографа при помощи программы, написанной с использованием LabView, переписывались в память компьютера.

При исследовании кавитационного поля гидрофон располагался по центру кюветы на фиксированном расстоянии от поверхности излучателя. Запись развития колебаний акустического давления в фиксированной точке поля производилась дважды: начиная с момента включения УЗ-генератора и (для сравнения) через 5–7 с после включения генератора. Визуально на экране осциллографа структура сигнала по истечении этого времени практически не менялась, поэтому запись считалась реализацией процесса стационарной кавитации. Максимальная длительность записи процесса определялась техническими характеристиками осциллографа. Полная записанная реализация состояла из 50 000 точек. Скорость горизонтальной развертки осциллографа выбиралась равной 10 мс на деление, что позволяло записать данные во временном интервале, равном 0.1 с. При этом на один период колебаний с частотой 18 кГц приходилось 28 точек, и, таким образом, можно было определить 14 гармоник основной частоты. Измерения с использованием скорости развертки 20 мс на деление позволяли записать реализации вдвое большей длины.

Сразу после включения УЗ-генератора вблизи излучателя возникали многочисленные кавитационные пузырьки. Кавитационная область имела протяженность около 10 см. Далее наблюдались лишь отдельные случайные пузырьки. Гидрофон помещался как непосредственно в кавитационную область (2–4 см от излучателя), так и на расстоянии 10–15 см от ее нижней границы. В первом случае предполагалась более выраженная изменчивость профиля волны за счет многочисленных кавитационных схлопываний вблизи поверхности гидрофона. Во втором случае должен был фиксироваться кавитационный шум всей области в целом.

Излучатель УЗ-колебаний, как и любая колебательная система, имеет конечную добротность, и, следовательно, для установления его колебаний требуется определенное время. Анализ временной зависимости амплитуды давления при включении и выключении УЗ-генератора позволил заключить, что время установления стационарной амплитуды колебаний излучателя составляет примерно 80–85 периодов колебаний. Для нас важно, что это время оказалось значительно меньше характерного времени развития кавитации.

Уже по виду профилей давления, зарегистрированных в разные моменты времени после включения ультразвука, можно было заключить, что для установления процесса стационарной кавитации требуется продолжительное время. В начале развития кавитации волна представляет собой практически гармоническую волну, слегка искаженную за счет

флуктуаций, которые вызваны осцилляциями кавитирующих пузырьков. Сильные схлопывания пузырьков вблизи гидрофона происходят относительно редко, поэтому возмущения профиля волны выражены слабо. С развитием кавитации искажения формы волны становятся существенными, и регистрируемая волна уже больше напоминает последовательность импульсов, следующих с частотой исходной гармонической волны (рис. 1). Каждый такой импульс, приходящийся на фазу сжатия в УЗ-волне, образуется в результате схлопывания кавитационного пузырька вблизи гидрофона. Таким образом, структура волнового профиля достаточно сложна и подвержена флуктуациям за счет процесса схлопывания пузырьков и хаотичности их колебаний. Поэтому по виду волнового профиля довольно сложно определить точные временные интервалы его эволюции. Желательно использовать некие усредненные характеристики для оценки медленной (по сравнению с периодом колебаний) эволюции волны. Но, с другой стороны, усреднение необходимо проводить на временных интервалах, которые должны быть значительно меньше времени установления процесса (в нашем случае это время, соответствующее примерно 50 периодам колебаний). В качестве таких усредненных характеристик мы использовали амплитуды гармоник, вычисленные на интервале конечной длины. С этой целью был применен спектральный анализ полученных реализаций с помощью быстрого преобразования Фурье. В нестационарном режиме кавитации записанная реализация сигнала гидрофона разбивалась на одинаковые промежутки, равные 2^k (k — целое число), в каждом из которых делалось быстрое преобразование Фурье, в результате чего определялся спектр на конкретном временном промежутке. Подобная схема действий была применена и для стационарного режима. Спектр вычислялся на каждом временном промежутке записанной реализации сигнала, а затем проводилось его усреднение по всей реализации.

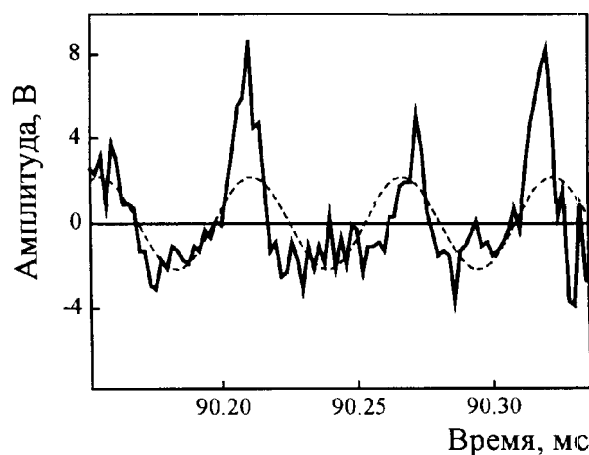


Рис. 1. Профиль давления в воде на расстоянии 4 см от излучателя через 90 мс после включения колебаний. Гармоническое колебание с амплитудой первой гармоники показано пунктиром

Полученные спектры имеют вид, характерный для кавитационного процесса. В спектре ярко выражены гармоники основной частоты (2-я, 3-я и т.д.), присутствует субгармоника и кратные ей частоты. В высокочастотной области спектра наблюдается кавитационный шум, имеющий примерно постоянную спектральную плотность в полосе частот до десятков мегагерц. По мере развития кавитации соотношение спектральных амплитуд изменялось, при этом вид спектра все более соответствовал спектру при стационарной кавитации.

При кавитации в воде амплитуда основной гармоники в начале процесса максимальна (рис. 2, а), по мере развития кавитации постепенно уменьшается до значения, соответствующего стационарной кавитации. Вблизи излучателя время достижения стационарного значения составляет около 40 мс, при этом амплитуда уменьшается только на 25% по сравнению с исходной величиной. Вдали от излучателя, вне кавитационной области, величина амплитуды основной гармоники уменьшается почти в четыре раза, а время установления стационарного значения составляет 70 мс. Амплитуды гармоник (рис. 2, б), а

также субгармоники вначале быстро растут, а затем медленно уменьшаются до значений, соответствующих стационарной кавитации. Характерное время установления стационарных значений гармоник составляет 40–50 мс. Отметим, что амплитуды гармоник внутри кавитационной области сравнительно мало отличаются (на 30–60%) от соответствующих стационарных значений, в то время как вне кавитационной области это отличие весьма существенно (200–300%).

В трансформаторном масле вблизи излучателя амплитуда основной гармоники растет по мере развития кавитации, а амплитуды высших гармоник и субгармоник уменьшаются и выходят на стационарный уровень.

Проанализируем полученные результаты. В процессе развития кавитации акустический импеданс среды уменьшается, поскольку одновременно уменьшаются плотность и скорость звука. Это в свою очередь приводит к уменьшению эффективности излучения ультразвука. Указанный эффект фиксируется вдали от кавитационной области. Вблизи поверхности излучателя, на расстояниях меньших длины

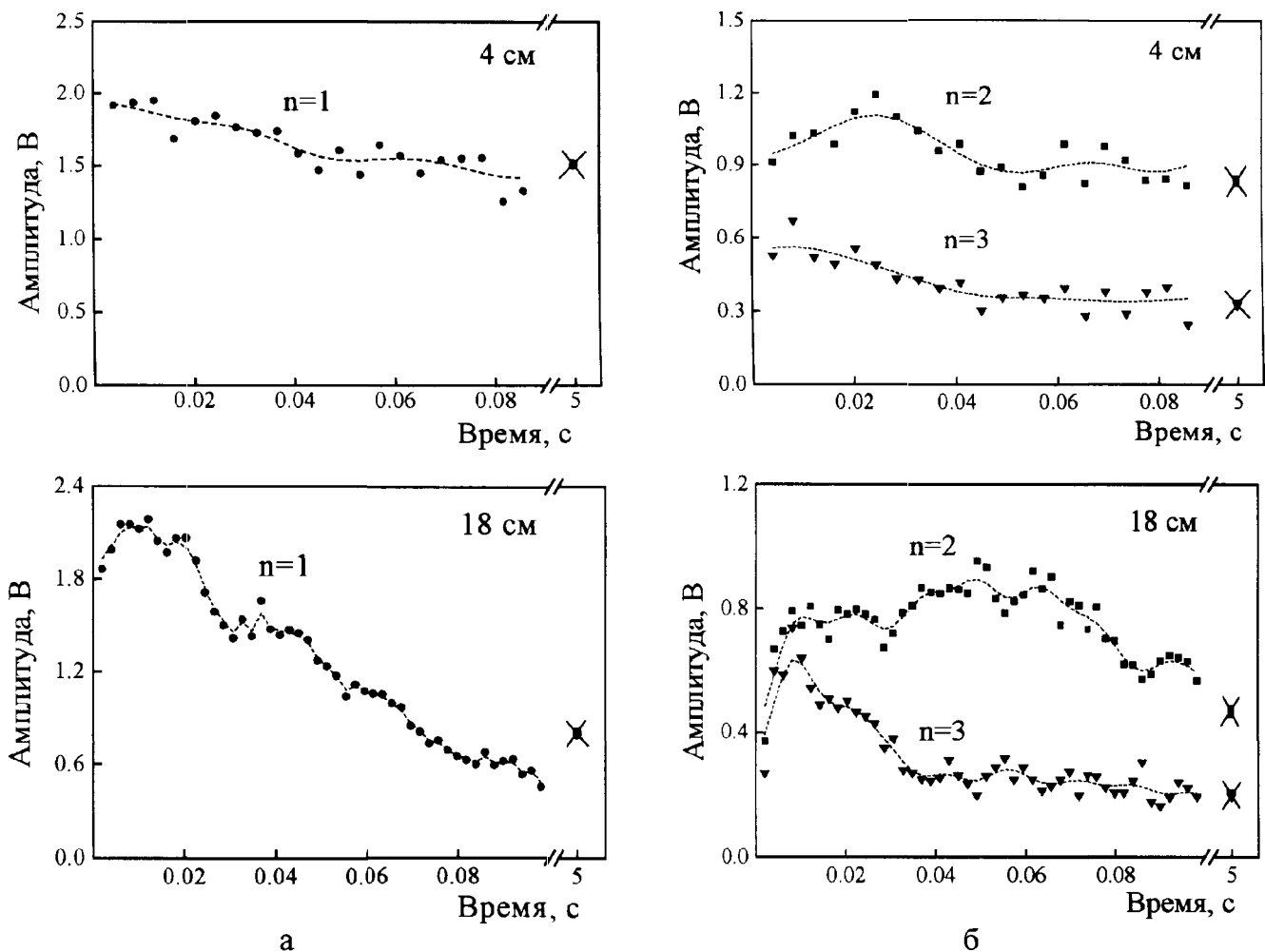


Рис. 2. Зависимость амплитуды первой гармоники (а), второй и третьей гармоник (б) от времени в воде на расстояниях 4 и 18 см от поверхности излучателя. Крестиком отмечены значения амплитуд гармоник в режиме стационарной кавитации

УЗ-волны, движение частиц среды непосредственно связано с движением его поверхности. Вследствие этого вблизи излучателя поле устанавливается достаточно быстро. Вдали от излучателя амплитуда гармоник зависит от колебаний всей пузырьковой области, число же пузырьков растет по мере развития кавитационного процесса. Поэтому амплитуды гармоник сначала растут, а затем стабилизируются, что соответствует динамике числа кавитационных пузырьков. Такое объяснение механизма явления, однако, не совсем согласуется с результатами, полученными в трансформаторном масле. Для правильной трактовки явления планируется провести дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

Работа выполнена при поддержке программы

«Университеты России» (грант 1-5286) и РФФИ (грант 00-02-17055).

Литература

1. *Bvennen C.E.* Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford: Oxford University Press, 1995.
2. *Mettin R., Luther S., Ohl C.-D., Lauterborn W.* // Ultrasonics Sonochemistry. 1999. No. 6. P. 25.
3. Химия и ультразвук / Под ред. Т. Мейсона. М.: Мир, 1993.
4. *Сиротюк М.Г.* // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. С. 167.
5. *Акуличев В.А.* // Акуст. журн. 1968. 14, № 3. С. 337.

Поступила в редакцию
17.05.00

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.515.2

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОГО ЯДРА В ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНАХ

Е. П. Анисимова, Л. И. Милехин, А. А. Сперанская

(кафедра физики моря и вод суши)

E-mail: psiwc47@phys.msu.su

Методом лабораторного моделирования исследован механизм формирования теплового ядра тропического урагана. Выявлены особенности динамической и термической структуры в центральной области вихревой системы, обуславливающие одну из существенных характеристик этого природного явления.

В динамике и энергетике атмосферных интенсивных конвективных вихрей (ИКВ), ярким представителем которых являются тропические циклоны, особую роль играет приводный пограничный слой атмосферы. В этом слое происходит преобразование внутренней и потенциальной энергии воздушных масс в кинетическую, приводящее к возникновению экстремальных ветров. Существующая в приводном слое тропического циклона конвергенция теплового влажного воздуха создает постоянный приток водяного пара в центр вихревой системы. Выделение скрытой теплоты испарения при конденсации приводит к тому, что практически на всех уровнях в центре циклона температура существенно выше, чем в окружающей атмосфере, т. е. возникает центральное теплое ядро, которое является одной из существенных характеристик зрелого урагана.

В настоящей работе приводятся результаты исследований структуры поля температуры и влажности в воздушных ИКВ методом физического моделирования. Экспериментальная установка [1] представляла собой усовершенствованную вихревую камеру Фитцджеральда [2], в которой подстилающей поверхностью служила нагретая вода. Создаваемые в лабораторных условиях влажные модельные вихри по ряду термогидродинамических критериев подоб-

ны нижней тропосфере центральной области тропического циклона [3].

Температура воздуха в вихрях измерялась с помощью медно-константановой термопары (будем называть ее сухой). Диаметр чувствительного спая термопары составлял 0.25–0.30 мм. Второй спай сухой термопары был помещен в термостат, где с точностью 0.1°C поддерживалась постоянная температура. Влажность измерялась психрометрическим методом [4]. Аналогом смоченного термометра в психрометрическом методе служила термопара, окруженная проволочной петлей диаметром 2 мм, на которой силами поверхностного натяжения удерживалась пленка воды. Второй спай смоченной термопары помещался в тот же термостат, что и сухая. Сухая и смоченная термопара располагались на расстоянии 2–3 мм друг от друга и были соединены с самописцем. Минипсихрометр на термопарах работал без аспирации. Сравнительная калибровка показала, что расхождение показаний минипсихрометра без аспирации с показаниями психрометра Асмана не превышало 2%. Для надежного определения положения термопар в горизонтальной плоскости относительно центра вихря синхронно с записью их сигналов осуществлялась фотосъемка поперечного сечения вихря, в котором велись измерения. Поперечные сечения