

Расчетно-экспериментальное исследование пространственно-временных характеристик кавитационной зоны

Э. М. Агрест^{1,*}, Г. Н. Кузнецов^{2,†}, Н. П. Мельников^{3‡}

¹Университет Джонсон и Уэльс. Шарлотт, Северная Каролина, США

²Научный центр волновых исследований Института общей физики имени А. М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38

³Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ имени Н. И. Лобачевского
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, д. 25/12а.

(Статья поступила 26.07.2017; Подписана в печать 19.09.2017)

На основании анализа данных высокоскоростной киносъемки, спектров кавитационного шума (КШ) и компьютерного моделирования исследованы радиальное и поступательное движение одиночных кавитационных полостей, взаимодействующих с знакопеременным градиентом звукового давления (ЗД) и между собой. Экспериментально и численно изучены динамика кавитационной области, физические причины интенсивных периодических перемещений нестабильных полостей и спектральные характеристики КШ. При заданном статическом давлении развитие зоны кавитации определяется газосодержанием и вязкостью жидкости.

PACS: 43.25.Yw

УДК: 532.528

Ключевые слова: газовая и паровая кавитация, скоростная киносъемка, кавитационные полости, спектры кавитационного шума, влияние характеристик воды.

ВВЕДЕНИЕ

Акустическая кавитация возникает в жидкости при воздействии знакопеременного ЗД с амплитудой, превышающей «порог возникновения кавитации» (ПВК), зависящий от статического давления, характеристик жидкости, пространственной структуры и времени «обработки» жидкости звуковым полем.

Ниже исследуются кавитационные явления в объеме жидкости, расположенной внутри акустического концентратора цилиндрической формы. В этом случае кавитация развивается в свободной жидкости, и разрыв происходит на зародышах, распределенных некоторым образом по размерам и по пространству непосредственно в жидкости — вдали от ограничивающих поверхностей. Контроль за возникновением и развитием кавитации внутри концентратора осуществляется по появлению специфического КШ, визуально и с использованием высокоскоростной киносъемки.

Как известно, характеристики КШ существенно зависят от типа кавитации — газовой или паровой [1]. Газовая кавитация (ГАК) возникает в жидкости с малой кавитационной прочностью (КП) и характеризуется слабыми пульсациями кавитационных полостей и относительным расширением начального радиуса не более чем в 1.5–3 раза. Уравнение движения кавитационной полости в этом случае определяется сжатием или расширением объема газа внутри полости. Паровая кавитация (ПАК) характеризуется значительным расширением полостей и их интенсивным сжати-

ем с высокой скоростью. Как следствие, в среде наблюдается высокая нелинейность, а в воде образуются ударные волны. Ниже по этим признакам — характеристикам КШ — регистрируются ПВК — ГАК или ПАК. Отметим, что такое разделение является в значительной мере условным — ГАК возникает в водном объеме, насыщенном растворенным воздухом. При воздействии ЗД концентрация дисперсной фазы увеличивается, диффузионные и коагуляционные процессы интенсифицируются. Одновременно увеличиваются размеры зародышей — приближаются к критическим, при которых теряется динамическая устойчивость. Но при больших амплитудах ЗД, особенно при высоком статическом давлении, и в газонасыщенной жидкости возникают процессы, характерные для ПАК. И, наоборот, при длительной «обработке» — воздействии ЗД на объем обезгаженной жидкости — из микрзародышей вырастают нестабильные газовые пузырьки, и проявляются свойства, характерные для ГАК.

Отметим, что возникновение и развитие кавитации в звуковом концентраторе хорошо изучено. В частности, установлено, что под действием знакопеременного градиента ЗД пульсирующие газовые зародыши с дорезонансными размерами мигрирует с периферии в зону фокального пятна [2]. При этом в результате градиентной диффузии зародышей происходит их перераспределение по пространству и заметно возрастает концентрация зародышей вблизи и в зоне фокального пятна [3]. Как следствие, зародыши сближаются и на малых расстояниях — несколько (менее 10–15) радиусов, — взаимодействуют и объединяются [4]. Наиболее крупные зародыши интенсивно увеличивают свой размер из-за коагуляции и выпрямленной диффузии [5], а также конвективной диффузии [6]. Это позволяет сформулировать понятие «коагуляционно-диффузионный порог кавитации» [5]. Вне зависимости

*E-mail: eagrest@jwu.edu

†E-mail: skbmortex@mail.ru

‡E-mail: melnikov50@mail.ru

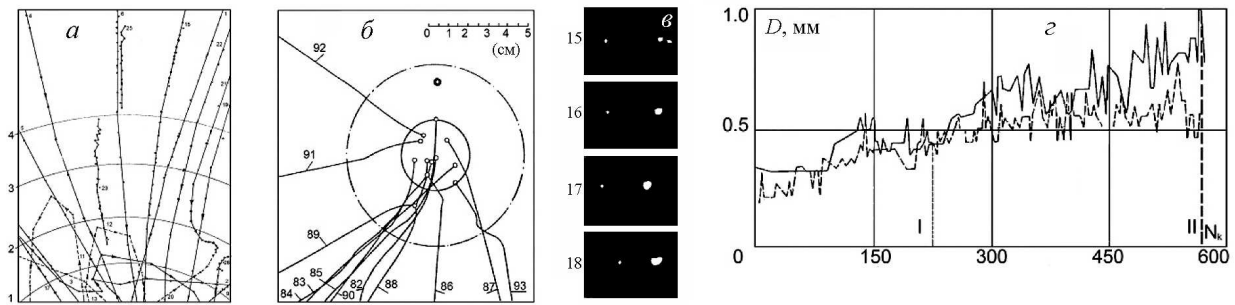


Рис. 1: Результаты обработки кинограмм (а, б, с) и кадр кинограммы (д)

от газосодержания и вязкости воды при достижении пузырьком определенного размера он теряет динамическую устойчивость на резонансных или субрезонансных частотах 7,8, теряется синфазность радиальных пульсаций с ЗД и, как следствие, он с высокой скоростью выбрасывается из фокального пятна [9]. Однако могут формироваться условия, когда потерявший устойчивость кавитационный пузырек не удаляется на периферию, а периодически возвращается в фокальное пятно и вновь выбрасывается [9]. Наблюдаются также ситуации, когда полости стабильно располагаются в некоторой зоне и только пульсируют [9].

1. ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ ПУЗЫРЬКОВ В КАВИТАЦИОННОЙ ЗОНЕ

Ниже дополнительно исследуется пространственно-временная динамика одиночных пузырьков и кавитационной области, образованной в объеме жидкости, расположенном внутри цилиндрического концентратора. Исследования проводились в жидкостях с различным газосодержанием и вязкостью: в чистой воде, глицерине, растворах глицерина в воде, полиметаллсилоксановых маслах. Характеристики кавитационной зоны исследовались с использованием скоростной кино съемки и анализа КШ в различных точках концентратора. В концентраторе в горизонтальной и в вертикальной плоскости формируется неоднородное звуковое поле, которое аппроксимируется косинусоидальной зависимостью с максимумом ЗД в фокальном пятне. Кавитация возбуждалась на резонансной частоте при различных амплитудах ЗД.

Экспериментально установлено, что если жидкость насыщена газом и обогащена газовыми зародышами достаточно больших размеров ($R_0 \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ м), то для статического давления, близкого к атмосферному P_0 , уже при малых амплитудах акустического поля $P_m = (0.5 - 0.8) \times 10^5$ Па почти по всему объему акустического концентратора наблюдается интенсивный рост дисперсной фазы. Образовавшиеся пузырьки видимого размера (радиус $R = 0.05 - 0.1$ мм), пульсируют под действием звукового поля практически синфазно с ЗД и двигаются поступательно в направлении фо-

кального пятна — в зону с максимальным разрежением. Такие перемещения под действием знакопеременного градиента ЗД совершают пузырьки на ранних стадиях развития кавитации и в областях достаточно удаленных от пучности давления. На рис. 1,а приведены результаты обработки одной из кинограмм движения пузырьков в разбавленном глицерине с вязкостью около 50 Па·с на расстоянии 0.02 м от центра фокального пятна. На этом рисунке показаны траектории движения отдельных пузырьков. При сближении пузырьков и увеличении концентрации начинается их взаимодействие и слияние (номера 2 и 3, 20 и 21). Пузырьки 11, 12 и 13 после увеличения размера и потери динамической устойчивости эвакуируются из фокального пятна, а затем, в результате растворения или дробления уменьшаются в размерах и вновь устремляются к центру. Мелкие пузырьки движутся к центру по траекториям, близким к прямолинейным. Средний диаметр эвакуируемых из центра пузырьков колеблется от 0.5 до 0.6 мм, что соответствует или превышает резонансный размер для частоты 6.6 кГц, совпадающей с частотой звукового поля.

Образование кавитационной зоны в дегазированной жидкости имеет другой характер. В качестве дегазированной жидкости использовалась дистиллированная вода, отстаивавшаяся после перемешивания в течение 2–3 суток, в этом случае дисперсная фаза уменьшается как из-за всплывания пузырьков, так и из-за растворения. Аналогичные результаты получены и в насыщенной воздухом жидкости, которая длительное время выдерживалась при избыточном статическом давлении. Для возбуждения кавитации в такой воде (даже при атмосферном давлении) требуется акустическое давление значительно большее, чем в «необжатой» жидкости с богатой дисперсной фазой. Но и в этом случае закономерности поступательного перемещения дорезонансных и зарезонансных зародышей аналогичны изложенным выше. На рис. 1,б наблюдается взаимодействие центрального пузырька с периферийными и показаны траектории движения отдельных пузырьков в ближайшей окрестности фокального пятна. Кружками отмечены точки слияния периферийных пузырьков с центральными пузырьками. Сплошная окружность ограничивает пространство, в котором совер-

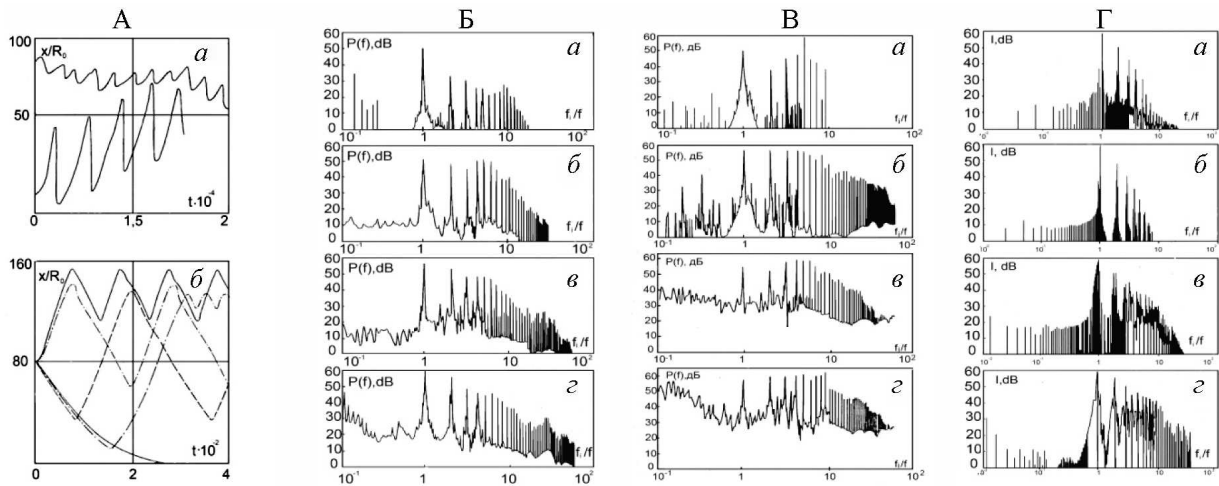


Рис. 2: (А) Крупномасштабные осцилляции полостей: *a* — экспериментальные, *б* — компьютерное моделирование (по горизонтали — время [с], по вертикали — относительное перемещение). (Б, В) Спектрограммы КШ для газосодержания 57% и 16% соответственно для напряжений, подаваемых на концентратор. Б: *a* — 30, *б* — 70, *в* — 130, *г* — 245 В; В: *a* — 106, *б* — 128, *в* — 254, *г* — 406 В. Г: Спектры излучения полости, движущейся поступательно, пульсирующей вблизи основного резонанса. На спектрограммах по горизонтали представлены частоты, нормированные на частоту возбуждения, по вертикали — уровень спектральной плотности

шает беспорядочное движение потерявший динамическую устойчивость центральный пузырек. Штрихпунктирная окружность с радиусом порядка 10 радиусов центрального пузырька ограничивает условную зону взаимодействия центрального пузырька с периферийными. На рис. 1,б представлены отдельные кадры типичной кинограммы, демонстрирующей несколько актов взаимодействия пузырьков между собой. На рис. 1,г показан различный характер увеличения среднего радиуса центрального пузырька в жидкости, богатой дисперсной фазой (сплошная кривая), и в отстоявшейся воде (штриховая кривая). Вертикальные штриховые линии соответствуют моменту потери пузырьком динамической устойчивости на резонансе порядка $2/1$ (линия I) и эвакуации зарезонансного пузырька из фокального пятна (линия II).

На некоторых кадрах наблюдались также крупномасштабные осцилляции пузырьков. Типичные траектории таких пузырьков, совершающих крупномасштабные периодические осцилляции, приведены на рис. 1,а (пузырьки 11, 12, 13), а также на рис. 2,А,а. На рис. 2,В приведены также спектры КШ при различном газосодержании жидкости и для различных напряжений, подаваемых на концентратор. Видно, что спектры представляют собой набор гармонических составляющих, опирающихся на сплошную составляющую и, в некоторых случаях, обрамленных пьедесталами. Наличие пьедесталов говорит о том, что исходный акустический сигнал модулирован. Модуляция сигнала, вероятно, объясняется крупномасштабными периодическими осцилляциями пузырьков. Наблюдаемые в спектрах максимумы для воды с большим газосодержанием при уменьшении газосодержания размываются и, практически, исчезают для воды с газосодержанием менее

15%. При более развитых стадиях кавитации в жидкости с малым газосодержанием наблюдается более высокий уровень сплошной части спектра и увеличивается ширина дискретных компонент.

В целом кинематографические исследования различных стадий развития кавитационной зоны подтвердили результаты теоретического анализа [2–9], в частности, обнаружены большие скорости поступательного перемещения полостей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты высокоскоростной киносъемки хорошо согласуются с теоретическими закономерностями движения дорезонансных и зарезонансных пузырьков. Но обнаружены и новые эффекты — многократные периодические перемещения нестабильной полости из фокального пятна на периферию и обратно, а также стабильное — неподвижное — расположение отдельных полостей, по-видимому, в зонах, где локальные градиенты ЗД стремятся к нулю. Средние скорости поступательного движения оцениваются в пределах от нескольких метров до нескольких десятков метров в секунду. Скорости поступательного перемещения пузырьков в фазе интенсивного сжатия могут достигать нескольких сотен метров [10], т.е. соизмеримы по величине со скоростью радиального сжатия кавитационной полости. Из-за поступательного перемещения полость сплющивается и возникает кумулятивная струя.

При газовой форме кавитации (начальные стадии кавитации в насыщенной воздухом жидкости) в шуме формируются преимущественно дискретные спектры, и сплошная часть спектра возникает только при раз-

витии интенсивной кавитации. При паровой форме кавитации (обезгаженная жидкость, большие амплитуды ЗД) в спектре формируется интенсивная сплошная часть, связанная со случайным характером пульсаций

и моментов сжатия каверн с высокой скоростью.

Обнаруженную модуляцию дискретных составляющих можно объяснить периодической миграцией нестабильных полостей вблизи фокального пятна.

-
- [1] Перник А. Д. Проблемы кавитации. Л.: Судостроение, 1963.
- [2] Агрест Э. М., Кузнецов Г. Н. Акуст. журн. 1972. **18**, № 2. С. 168.
- [3] Агрест Э. М., Кузнецов Г. Н. Акуст. журн. 1974. **20**, № 3. С. 345.
- [4] Кузнецов Г. Н., Шекин И. Е. Акуст. журн. 1972. **18**, № 4. С. 565.
- [5] Кузнецов Г. Н., Шекин И. Е. Акуст. журн. 1975. **21**, № 5. С. 751.
- [6] Kuznetsov G. N., Sinnikov V. M. Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2002. **2**. С. 1031.
- [7] Кузнецов Г. Н. Акустика и ультразвуковая техника. Киев: Техника, 1974. Вып. 11.
- [8] Pyichev V. I., Korets V. L., Melnikov N. P. Ultrasonics. 1989. **27**, N 6. P. 357.
- [9] Агрест Э. М., Корец В. Л. Акуст. журн. 1978. **24**, № 1. С. 1.
- [10] Кузнецов Г. Н., Шекин И. Е. Механика жидкости и газа. 1974. № 4. С. 54.

Calculated and experimental study of spatial and temporal characteristics of a cavitation zone

E. M. Agrest^{1,a}, G. N. Kuznetsov^{2,b}, N. P. Mel'nikov^{3,c}

¹Johnson & Wales University. Charlotte, NC, USA

²Wave Research Center at General Physics Institute. Moscow 119991, Russia

³Scientific Research Radiophysical Institute, Nizhny Novgorod State University. Nizhny Novgorod 603950, Russia E-mail:

^aeagrest@jwu.edu, ^bskbmortex@mail.ru, ^cmelnikov50@mail.ru

The radial and translational motion of single cavitation bubbles interacting with alternating gradients of sound pressure (SP) and among themselves are studied based on analysis of high-speed video data, cavitation noise spectra (CN), and computer modeling. The dynamics of the cavitation field, the physical causes of intense periodic motion for unstable cavities, and the spectral characteristics of CN were studied experimentally and numerically. It was found that, for a given static pressure, development of the cavitation zone is determined by the gas content and viscosity of the fluid.

PACS: 43.25.Yw

Keywords: gas and vapor cavitation, high speed video, cavitation cavity, cavitation noise spectra, the effect of water features.

Received 26 July 2017.

Сведения об авторах

1. Агрест Эммануил Матестович — канд. физ.-мат. наук, профессор; тел.: 980-598-3207. E-mail: eagrest@jwu.edu.
 2. Кузнецов Геннадий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, начальник СКБ «Морские технологии», профессор; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: skbmortex@mail.ru.
 3. Мельников Николай Павлович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: melnikov50@mail.ru.
-