

03

© 1990 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ

Н. И. Жаров

Рассматриваются результаты изучения условий развития изолированных кавитационных пузырьков различной физической природы: газовых, паровых и совмещенных газовых и паровых пузырьков. На основании данных скоростной киносъемки определены основные фазы и периоды развития пузырьков. Установлено, что в отличие от ранее высказываемой гипотезы о многоцикличности образования и схлопывания пузырьков в действительности имеет место одноцикличный процесс их роста и схлопывания.

В настоящее время установлено, что кавитация представляет собой гидродинамический процесс, связанный с возникновением, развитием и схлопыванием парогазовых пузырьков при определенном понижении давления в жидкости. Изучение условий развития таких пузырьков имеет важное значение для раскрытия физической сущности явления кавитации. Экспериментальные и теоретические исследования, выполненные в этом направлении [1-10], пока еще не полностью отражают рассматриваемые процессы. Трудность экспериментального решения поставленных задач заключается в том, что процесс кавитации является весьма быстротечным и характеризуется возникновением бесчисленного множества пузырьков, образующих общую парогазовую каверну, размеры которой несоизмеримо велики с размерами отдельных, входящих в нее пузырьков. В связи с этим практически не представляется возможным выделить из каверны какой-либо отдельный пузырек и проследить за ходом его развития от момента возникновения до схлопывания. Попытка выявления некоторых характеристик процесса кавитации по результатам скоростных киносъемок общих каверн позволила получить ряд полезных сведений [3, 6, 7], однако характеристики условий развития отдельных пузырьков остаются не полностью раскрытыми и изученными, несмотря на применение новейших средств исследования — лазерной техники [9, 10].

Экспериментальные данные, отражающие процесс развития парогазовых пузырьков в гидродинамической установке, приведены на кинограммах скоростной киносъемки в [1]. Эти материалы представляют огромный научный интерес, однако и они содержат много неясных вопросов, в том числе и у авторов [1, с. 170], которые указывают: «... не совсем ясно, что зафиксировано на таких фотографиях: одна каверна с неровной поверхностью или облако отдельных мелких пузырьков». На основании указанных кинограмм было установлено, что видимые невооруженным глазом пузырьки претерпевают многократное развитие с неполным схлопыванием, причем каждый последующий цикл сопровождается уменьшением диаметра и времени существования пузырька. Число таких циклов роста и схлопывания пузырька может изменяться от двух до шести раз и более (рис. 1) [1].

В целях дальнейшего изучения рассматриваемого явления во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева выполнен ряд опытов, в которых с помощью скоростной киносъемки представилось возможным выявить особенности развития изолированных газовых, паровых, а также примыкающих друг к другу (совмещенных) газовых и паровых пузырьков. Опыты проводились в специальной камере,

где создавались условия для получения изолированных пузырьков различной физической природы при постоянном и переменном полях давления в жидкости. В настоящей работе рассмотрены результаты опытов, выполненных в поле постоянного давления, которое было ниже атмосферного.

Возникновение и развитие газового (воздушного) пузырька представлено на кинограмме рис. 2, а, где в каждой вертикальной колонке дана непрерывная последовательность кадров, а между колонками дан разрыв. Например, в первой колонке приведены снимки с первого кадра по шестой, во второй — с 19-го по 24-й, и т. д. Это позволяет визуально проследить за развитием пузырька в пределах всей видимой высоты кадра, ограничиваемой на фотографии горизонтальными темными полосами.

Газовый пузырек виден в нижней части кадра 1, несколько правее вертикальной оси кадра. Пузырек имеет размер маленькой точки, расположенной над вертикальным воздухоподводящим каналом с наружным диаметром 0.5 мм.

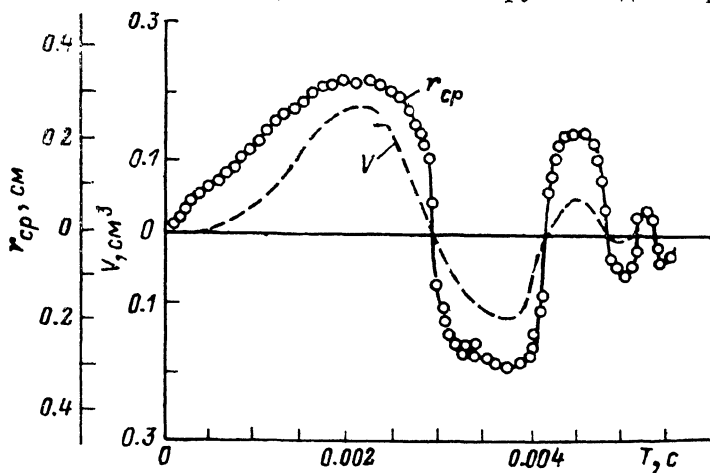


Рис. 1. Процесс развития и повторного образования кавитационного пузырька по данным [1].

В кадре 2 и последующих кадрах до 115-го этот пузырек виден вместе с двумя другими пузырьками, развившимися ранее и уже поднявшимися к верхней рамке кадра. Рост зародившегося в кадре 1 пузырька заметно прослеживается при переходе от кадра к кадру и особенно от одной из первых пяти колонок к другой. В этих колонках пузырек имеет сферическую или близкую к ней форму и еще соединяется с воздухоподводящим каналом. При увеличении диаметра пузырька проявляется тенденция к его деформации. Это происходит примерно в тот период (кадры 55—78), когда архимедова сила оказывается больше силы поверхностного натяжения и пузырек отрывается от стенок воздухоподводящего канала. Отрыв пузырька и последующее его всплытие вызывает сравнительно быстрое изменение его формы. За короткий период времени сферический пузырек превращается в сфероид (кадры 163 и далее), который в дальнейшем устойчиво сохраняет свою форму и размеры в пределах кадра, что свидетельствует об отсутствии заметного влияния процессов газовой диффузии.

Возникновение и развитие последующих (на этой кинограмме) газовых пузырьков происходит на кадрах 235 и далее. Картина роста двух последовательно развивающихся пузырьков здесь аналогична предыдущему. Однако характерным фактором развития этих пузырьков является то, что при явном их взаимодействии и тесном контакте (кадры 325—385) эти два пузырька не объединяются в один общий пузырек, а продолжают сосуществовать изолированно друг от друга (кадры 397—420), превращаясь в сфероиды.

Процесс развития парового пузырька показан на кинограмме рис. 2, б, представляющей непрерывную последовательность кадров от 1-го до 145-го. Данная кинограмма получена при одинаковых условиях с кинограммой рис. 2, а и отличается от нее только физической природой исследуемого пузырька.

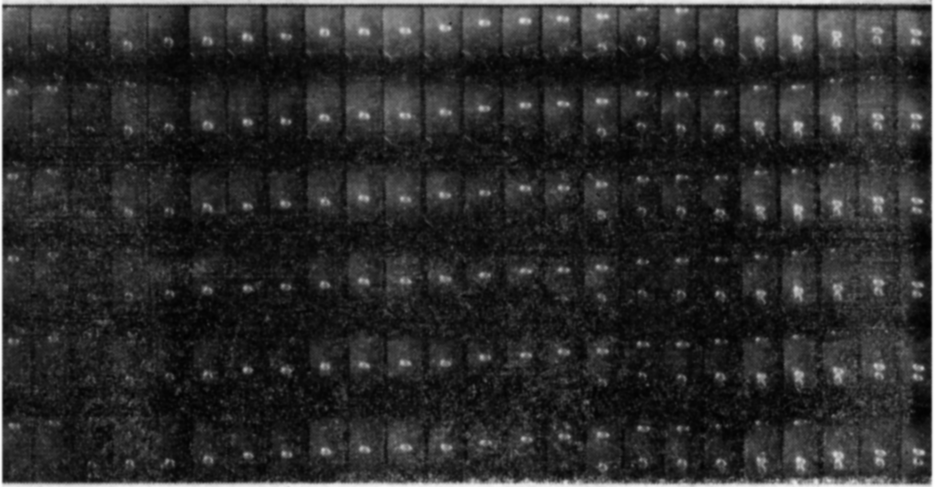
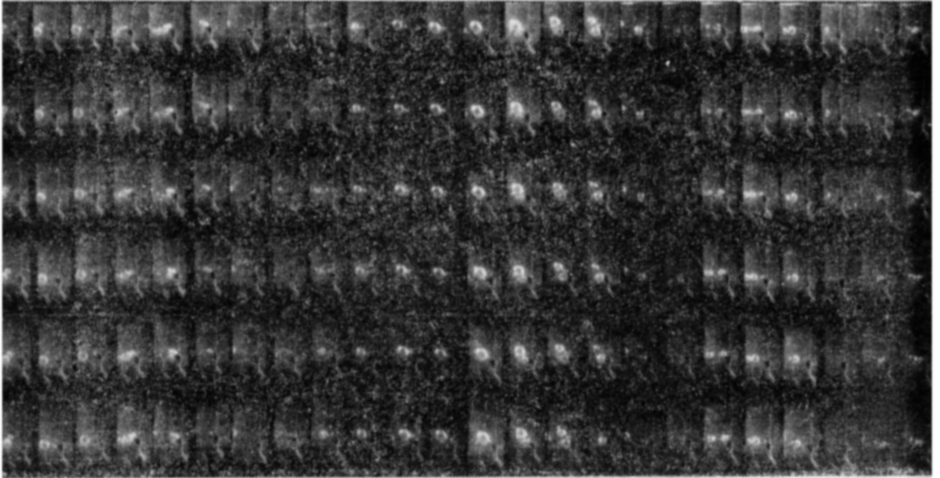
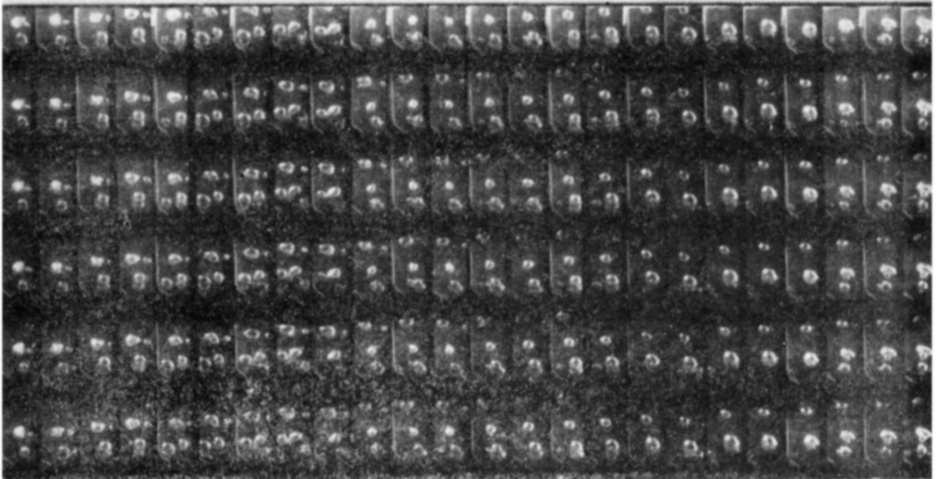
a*б**в*

Рис. 2. Кинограммы процессов развития газового (*a*), парового (*б*) и парогазового (*в*) пузырьков в поле постоянного давления жидкости.

Паровой пузырек создавался специальным устройством в пределах всей ширины кадра в отличие от газового пузырька, создаваемого в одной заданной точке. Одновременно могло создаваться несколько паровых пузырьков различных размеров. В кадре 1 зафиксировано два сферических паровых пузырька разных диаметров, соприкасающихся между собой и находящихся в разных стадиях развития.

Верхний пузырек (малого диаметра) при переходе от кадра к кадру постепенно уменьшается в размерах (кадры 1—13) и, не объединяясь с нижним, полностью исчезает (схлопывается) в кадрах 12 и 13. На последующих кадрах в зоне исчезновения верхнего пузырька, как видно, никакого повторного возникновения и развития этого же пузырька не происходит.

Нижний пузырек (большого диаметра) находится в стадии роста, продолжающегося примерно до кадра 14, после чего начинаются уменьшение его диаметра и полное схлопывание (кадры 15—30). В кадрах 31 и далее также не наблю-

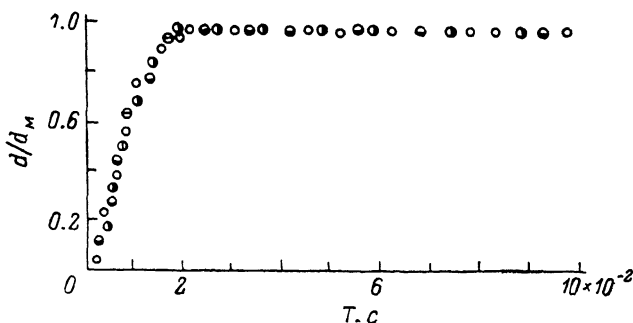


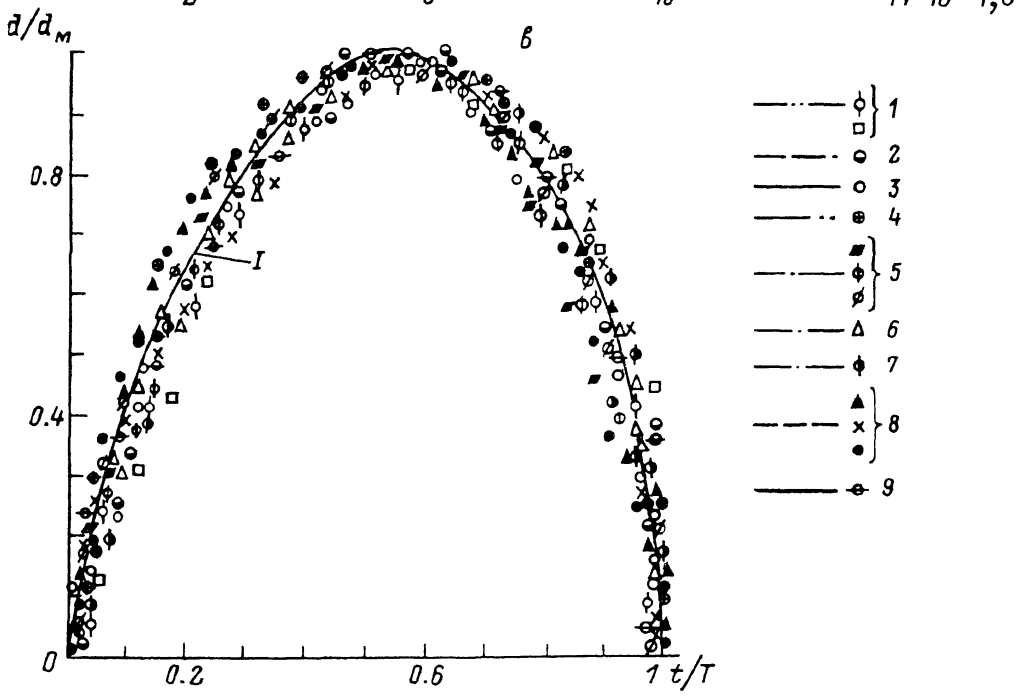
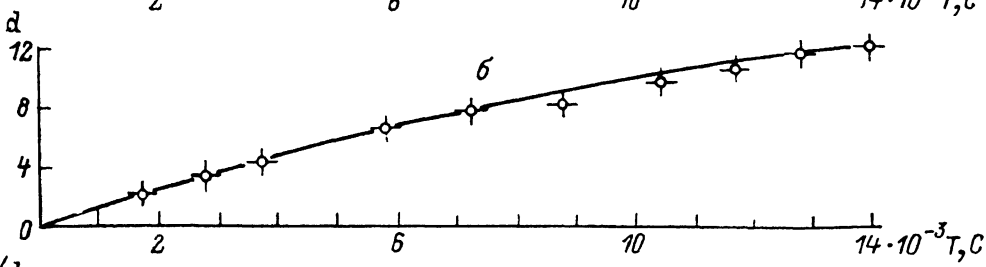
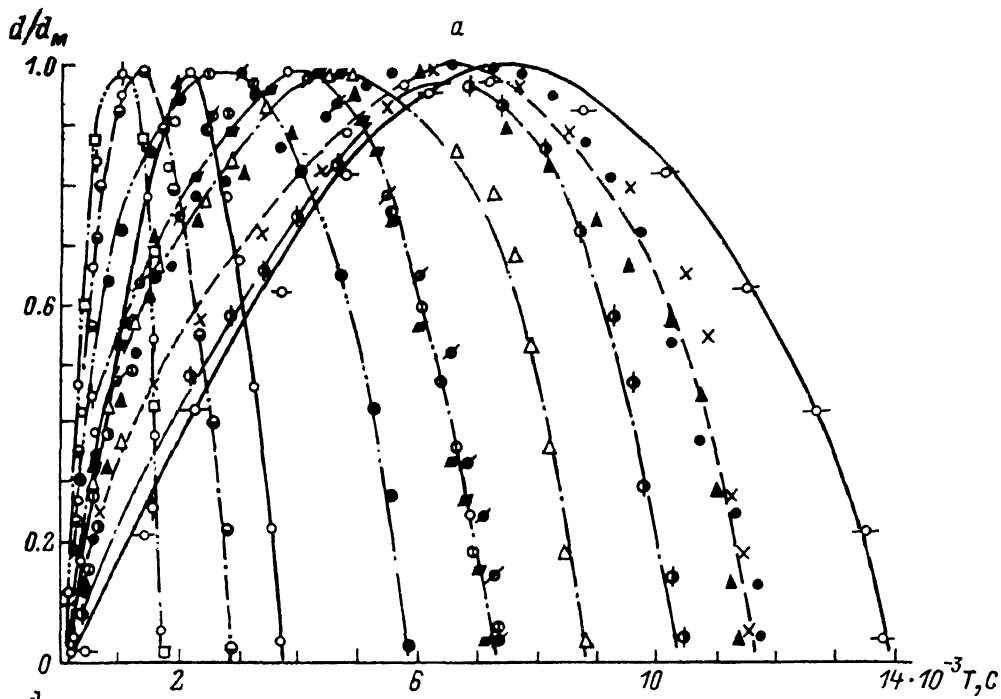
Рис. 3. Процесс развития газовых пузырьков.

дается повторного возникновения никаких новых пузырьков в зоне схлопнувшегося пузырька. Характерной особенностью процесса развития рассмотренного схлопнувшегося пузырька является то, что в течение определенного периода времени этот паровой пузырек внешне почти не изменялся в размерах (кадры 7—18) или изменялся очень незначительно, оставаясь устойчивым при данном диаметре сферы.

В кадрах 11 и 12, справа от рассмотренного пузырька, зафиксировано зарождение нового пузырька. Рост этого пузырька происходит до кадра 25, после чего наблюдаются уменьшение его размеров и окончательное схлопывание (кадры 33—38).

Появление очередного парового пузырька видно в кадре 41, в нижней левой его части. Этот пузырек растет до кадра 75, а затем постепенно уменьшается в размерах и схлопывается (кадры 101, 102). В пределах основного периода своего существования пузырек сохраняет близкую к сферической форму. На стадии схлопывания (кадры 92—95) эта форма изменяется. Взаимодействие соприкасающихся пузырьков происходит без последующего объединения этих пузырьков (кадры 80—95).

Имея в виду, что в реальных условиях в зоне кавитации происходит развитие не только изолированных газовых и паровых пузырьков, но и совместно развивающихся таких пузырьков, мы сочли полезным и совершенно необходимым изучить процесс их совместного развития. Кинограмма развития этих пузырьков приведена на рис. 2, в, где в кадре 1 зафиксированы три пузырька: самый маленький в виде белой точки и справа от него два более крупных, верхний из которых имеет форму, близкую к овалу, а нижний почти сферический. В кадре 2 самый маленький пузырек становится еще меньше, а в кадрах 3—6 он исчезает совсем, что свидетельствует о его паровом происхождении. Верхний пузырек также уменьшается в размерах и одновременно разъединяется на два отдельных пузырька (кадры 3—7). Эти два пузырька в дальнейший период наблюдения процесса (кадры 12—78) претерпевают изменения только в форме, причем пузырек большего диаметра превращается в устойчивый сфероид (кадры 68—90). Пузырек малого диаметра имеет форму сферы, сохраняющуюся



до момента выхода этого пузырька за верхнюю рамку кадров (74—84). Оба рассмотренных пузырька являются изолированными газовыми пузырьками, однако в зафиксированный начальный период их развития (кадр 1) они примыкали к паровому пузырьку, который в пределах последующих 15 кадров полностью конденсировался.

Нижний пузырек в кадре 1 (третий из указанных выше) также является газовым. В пределах первых 10 кадров этот пузырек почти не изменяется в размерах, имеет сферическую форму и находится в состоянии отрыва от воздухоподводящего канала. В кадрах 11—24 под этим пузырьком в непосредственном контакте с ним происходит рост парового пузырька, который по мере развития охватывает почти всю нижнюю половину рассматриваемого газового пузырька. Совместное развитие двух плотно прижатых друг к другу газового и парового пузырьков (кадры 13—30) не вызывает, однако, их объединения. В этот период паровой пузырек достигает максимальных размеров, а затем уменьшается в объеме и полностью схлопывается (кадры 32—35). Газовый же пузырек, освободившись от парового пузырька, при этом практически сохраняет свою сферическую форму и первоначальный размер (ср. кадры 3—10). Аналогичные процессы развития примыкающих паровых и газовых пузырьков можно наблюдать и на последующих кадрах.

Рассмотренные кинограммы показывают, что процессы развития газовых и паровых пузырьков в поле постоянного давления жидкости являются совершенно различными, а процесс развития совмещенных, т. е. примыкающих, паровых и газовых пузырьков характеризуется особенностями развития каждого из этих пузырьков в соответствии с их физической природой без каких-либо дополнительных новых явлений, фиксируемых визуально.

Результаты обработки опытных данных, частично представленные на рис. 3 и 4, показывают следующее. Процесс развития пузырьков в жидкости в общем случае включает три стадии (фазы): роста, равновесия, деформации. Стадия роста пузырьков характеризуется постепенным увеличением их объема и диаметра d , а также сохранением формы, близкой к сферической. При этом общий период роста газовых и паровых пузырьков при прочих равных условиях является различным. Так, при давлении в жидкости равном 3 кПа продолжительность роста газовых пузырьков с максимальным диаметром $d_m = 6-7$ мм равна $t_{p.g} = 2 \times 10^{-2}$ с (рис. 2, а, кадры 2—74, 218—290 и рис. 3). Продолжительность роста паровых пузырьков примерно такого же диаметра равна $t_{p.п} = 3 \times 10^{-3}$ с (рис. 2, б, кадры 46—76 и рис. 4, а при $d_m = 7$ мм). Совершенно очевидно, что скорость роста пузырьков существенно зависит от давления в жидкости, снижение которого способствует ускорению роста.

Стадия равновесия или равновесного состояния пузырьков является кратковременной и соответствует моменту, когда пузырьки достигают максимального диаметра (объема). Продолжительность этой стадии составляет менее 1×10^{-4} с.

Стадия деформации является той стадией процесса развития пузырьков, которая определяет принципиальное различие между газовыми и паровыми пузырьками.

Газовые пузырьки в этой стадии развития деформируются сначала из сферы в сфероиду, а затем и в другие формы, практически сохраняя свой максимальный объем (рис. 2, а, кадры 75—415, 291—415). Изменение формы при постоянном давлении, однако, не приводит к внезапному или постепенному исчезновению или росту газовых пузырьков в жидкости, что указывает на слабое влияние диффузии. Разрушение же этих пузырьков происходит лишь на поверхности жидкости после их всплытия.

Деформация паровых пузырьков сопровождается быстрым уменьшением их диаметра и объема при сохранении формы, близкой к сферической. В ре-

Рис. 4. Процесс развития паровых пузырьков.

а — период роста и схлопывания пузырьков разных размеров, б — полный период существования («жизни») пузырьков в зависимости от их максимального диаметра, в — относительный период роста и схлопывания пузырьков. d , мм: 1 — 1-2, 2 — 3, 3 — 4, 4 — 6, 5 — 7, 6 — 8, 7 — 9, 8 — 10, 9 — 12.
I — кривая среднесарифметических значений.

зультате непрерывного сокращения размеров паровые пузырьки на завершающем этапе полностью схлопываются без последующего возрождения. Многочисленные опыты, выполненные специально для проверки этого вывода, показали, что процесс развития паровых пузырьков является одноциклическим. Возможность многократного возрождения и развития одного и того же пузырька в опытах не подтвердилась.

Продолжительность стадии деформации паровых пузырьков или период их схлопывания зависит от диаметра пузырьков.

На рис. 4, а показано развитие во времени ряда паровых пузырьков диаметром 1.0—12 мм. Все пузырьки, как видно, имеют примерно симметричные восходящие и нисходящие ветви, соответствующие периодам роста и схлопывания. Время роста и схлопывания возрастает с увеличением диаметра пузырьков. Анализ опытных данных показал, что период схлопывания пузырьков, оказывающий существенное влияние на характеристики кавитационного воздействия, является более быстротечным, чем период роста. Величина относительной продолжительности периода роста $\tau_{р.н} = t_{р.н}/T \approx 0.55$, а периода схлопывания $\tau_{с.н} = t_{с.н}/T \approx 0.45$, где T — полное время развития («жизни») пузырька, $t_{р.н}$ — период его роста, $t_{с.н}$ — период схлопывания.

Сопоставление полученных данных с данными [1] (рис. 1) показало их удовлетворительное сходство. Так, время «жизни» пузырьков диаметром 3.5 мм по [1] равно 3×10^{-3} с. По нашим данным (рис. 4, а, б) время «жизни» пузырьков диаметром (3—4) мм изменяется от 2.8×10^{-3} до 3.7×10^{-3} с. Пузырьки меньшего диаметра развиваются, согласно рис. 1, более быстротечно, чем согласно рис. 4, а, б.

Периоды роста и схлопывания пузырьков, как видно из рис. 1, не остаются постоянными. При изменении их диаметра от 1 до 3.5 мм относительный период роста возрастает от 0.5 до 0.7, а период схлопывания снижается от 0.5 до 0.3. По данным рис. 4, в эти периоды постоянны и равны 0.55 и 0.45. С нашей точки зрения, указанная в [1] тенденция возрастания разности между относительными периодами роста и схлопывания при неограниченном увеличении размеров пузырьков не должна иметь места.

Список литературы

- [1] Кнэпп Р., Дейли Д., Хэммит Ф. Кавитация. М.: Мир, 1974. 687 с.
- [2] Перник А. Д. Проблемы кавитации. Л.: Судостроение, 1966. 440 с.
- [3] Шальнев К. К. // Тр. координационных совещаний по гидротехнике. Л., 1963. Вып. VII. С. 143—167.
- [4] Козырев С. П. Гидроабразивный износ металла при кавитации. М., Машиностроение, 1974. 240 с.
- [5] Левковский Ю. Л. Структура кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1978. 215 с.
- [6] Чистяков А. М. Исследования гидротурбинных блоков ГЭС. Л.: Энергия, 1972. 180 с.
- [7] Жаров Н. И., Чистяков А. М., Кудряшов Г. В. и др. // Матер. конф. и совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия, 1978. Вып. 120. С. 144—149.
- [8] Егоров И. Т., Садовников Ю. М., Исаев И. И., Басин М. А. Искусственная кавитация. Л.: Судостроение, 1971. 284 с.
- [9] Дрейден Г. В., Островский Ю. И., Этинберг М. И. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 11. С. 669.
- [10] Дрейден Г. В., Островский Ю. И., Этинберг М. И. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 11. С. 2337—2344.

Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева
Ленинград

Поступило в Редакцию
11 ноября 1988 г.
В окончательной редакции
17 апреля 1989 г.