



СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПИСАНИЮ ДИНАМИКИ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ И КАВИТАЦИОННОГО ОБЛАКА (по материалам докторской диссертации)

Маргулис Игорь Мильевич

генеральный директор ООО «ТГА» (Технологии Гидроакустические), г. Москва

В докладе проведен анализ существующих моделей динамики кавитационного пузырька и облака кавитационных пузырьков. Показано, что данные модели требуют существенной корректировки, поскольку в соответствии с ними кавитационный пузырек в кавитационном облаке должен был бы слишком сильно сжиматься и слишком медленно двигаться поступательно, что противоречит известным экспериментальным результатам. Для уточнения существующей модели предложено дополнительно учитывать следующие три фактора: неравновесность процессов испарения и конденсации пара в пузырьке; неидеальность парогазовой смеси внутри пузырька; поступательное движение кавитационного пузырька.

Для их учета предложена новая система дифференциальных уравнений.

1) Учет неравновесности процессов испарения и конденсации пара в кавитационном пузырьке показал, что при медленном расширении пузырька теплообмен успевает происходить, температура парогазовой смеси равна температуре жидкости, окружающей пузырек, давление пара практически равно насыщенному, а давление газа изменяется по изотермическому закону. При быстром сжатии ни теплообмен, ни процессы испарения и конденсации происходят не успевают, поэтому давление и газа, и пара внутри пузырька подчиняется адиабатическому закону для неидеального газа. Поскольку в момент наибольшего расширения пузырек наполнен в основном паром, то именно пар, а не газ, как считалось ранее, оказывает основное демпфирующее влияние при сжатии пузырька. Этот результат позволил объяснить уменьшение в ~ 100 раз интенсивности свечения «одиночного» пузырька (single cavitation bubble) при увеличении



температуры воды с 4 до 25 0С. Более корректный учет парциального давления пара снижает в несколько раз температуру и давление парогазовой смеси в пузырьке при его сжатии.

2) На основе новой системы уравнений проведен анализ влияния радиального движения пузырька на его поступательное движение. Показано, что известное описание поступательного движения пузырька с помощью средней за период колебаний силы (Бьеркнеса) некорректно, поскольку радиус, a , следовательно, и присоединенная масса пузырька изменяются во времени, а в общем случае среднее от отношения не равно отношению средних. Правильным является непосредственное определение зависимости перемещения пузырька от времени, или, при неизменной звуковой частоте f , его средней скорости $\langle u \rangle$ от времени согласно предложенным уравнениям. Показано, что при быстром сжатии нелинейно колеблющегося пузырька происходит эффективная «перекачка» части энергии его радиального движения в энергию поступательного движения, и в момент наибольшего сжатия его поступательная скорость u достигает сотен м/с. Также обнаружено, что видимое нам плавное поступательное движение нелинейно колеблющихся пузырьков есть на самом деле последовательность «скачков», которые совершаются при каждом быстром сжатии и последующем быстром расширении, а в остальное время пузырьки практически неподвижны.

Учет влияния радиального движения пузырька на его поступательное движение позволил объяснить следующие известные экспериментальные данные:

– наличие поступательного движения кавитационного пузырька в поле бегущей гармонической волны даже малой амплитуды, хотя средняя за период колебаний поступательная сила (сила Бьеркнеса) равна нулю. При этом рассчитанные величины u в поле бегущей гармонической волны высокой амплитуды оказалась равны единицам м/с, что соответствует экспериментам, хотя и превышает амплитуду колебательной скорости жидкости в 104 – 105 раз;

– рассчитанные поступательные перемещения пузырьков, образованных при лазерном пробое воды, (laser cavitation bubble) вблизи твердой стенки соответствуют данным экспериментов, полученным с помощью сверхвысокоскоростной киносъемки.

3) На основе новой системы уравнений проведен анализ влияния поступательного движения кавитационного пузырька на его радиальное движение. Показано, что эффективная «перекачка» части энергии радиального движения в энергию его поступательного движения сильно



демпфирует сжатие и в несколько раз уменьшает температуру и давление в момент максимального сжатия кавитационного пузырька.

Этот результат позволяет объяснить причину различия в механизмах сонолюминесценции (свечения) «обычных» пузырьков, движущихся в кавитационном облаке (multi bubble cavitation) и «одиночного» пузырька, неподвижно колеблющегося в пучности стоячей волны (single bubble cavitation). «Одиночный» пузырек излучает свет в момент наибольшего сжатия, когда парагазовая смесь в нем разогревается до 10 000 К и более, и его свечение имеет тепловую природу. «Обычные» же пузырьки в кавитационном облаке движутся поступательно и не могут сжиматься настолько сильно, чтобы сильно нагреть парагазовую смесь, соответственно, наблюдается слабое свечение, имеющее электрическую природу. Для объяснения механизма возникновения электрических разрядов внутри пузырьков нами ранее была предложена теория локальной электризации кавитационных пузырьков при их деформации и расщеплении.

4) Предложена уточненная модель динамики кавитационных пузырьков в кавитационном облаке. Показано, что рассчитанные средние за период колебаний поступательные скорости пузырьков соответствуют данным экспериментов. На основе ее предложена новая модель для расчета интегральных параметров кавитационного облака. Согласно ей, концентрация пузырьков в каждый момент времени определяется двумя противоположными процессами – увеличением их количества (из-за дробления пузырьков) и уменьшением их количества (из-за их коагуляции). Поэтому при включении акустического поля вначале наблюдается резкий рост количества пузырьков, а через некоторое время (обычно - несколько периодов колебаний) устанавливается равновесная концентрация. Результаты расчета параметров динамики кавитационного облака (равновесная концентрация пузырьков, их максимальный радиус, средняя поступательная скорость, время установления равновесной концентрации) соответствуют экспериментам.

5) Таким образом, предложены новые модели динамики единичного кавитационного пузырька и облака кавитационных пузырьков в поле акустической волны произвольной временной формы, удовлетворительно описывающие известные экспериментальные данные. Эти модели позволяют предсказывать степень кавитационного воздействия в зависимости от параметров акустического поля (амплитуда, частота, длительность) и от параметров жидкости (плотность, вязкость, поверхностное натяжение, температура, исходная концентрация кавитационных зародышей).