

Кавитация в присутствии слаборастворимых наноразмерных пузырьков в воде

С.И. Кошоридзе¹

¹ *Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

Рассматривается акустическая кавитация в присутствии слаборастворимых нанопузырьков в воде. Исследована зависимость порога кавитации от размера пузырьков и поверхностного натяжения границы газ – вода в рамках теории Толмена. Показано, что линейное приближение для уравнения Рэлея – Плессета для нанопузырьков несправедливо даже в слабом акустическом поле и для расчета кавитации в данном уравнении следует сохранять нелинейные члены.

Ключевые слова: *нанопузырь, порог кавитации, параметр Толмена, уравнение Рэлея – Плессета.*

Введение

Явления кавитации встречаются повсеместно как в природе, так и в промышленности [1–4]. Схлопывание кавитационных пузырьков имеет место при струйной печати, ультразвуковой очистке поверхностей, неинвазивных разрушениях камней в почках с помощью акустических ударных волн, сонохимии, сонолюминесценции, а также при исследованиях геотермальных процессов. Разрушение гидродинамически возникающих кавитационных пузырьков оказывает неблагоприятное воздействие на гидравлические системы, клапаны и лопасти гребных винтов, вызывая износ и эрозию, в то время как образование кавитационных пузырьков может повлиять на характеристики судов на подводных крыльях. В биологии, где температура определяется окружающей средой, метастабильная вода образуется главным образом за счет снижения давления. Схлопывание кавитационных пузырьков создает в папоротниках механизмы, подобные катапульте, и позволяет креветкам оглушать добычу. Наоборот, кавитация создает препятствие при подъеме сока по высоким деревьям, где наблюдается значительное отрицательное давление.

Согласно классической теории нуклеации [5], макроскопический объем абсолютно чистой воды при комнатной температуре должен выдерживать давление в районе от –120 до –160 МПа достаточно длительное время. Однако реальность такова, что добиться абсолютной чистоты жидкостей практически невозможно. Даже применяя современные методы очистки воды, избавиться от микро- и наноразмерных нерастворимых гидрофобных примесей невозможно [6, 7]. Кроме того, влияют стенки контейнеров, дефекты поверхности или щели, в которых ранее находились пузырьки газа, действующие как зародыши кавитации. Эти факторы вызывают существенное понижение порогового кавитационного давления от значений, предсказываемых классической теорией нуклеации.

В настоящей работе рассматривается явление кавитации в воде при присутствии наноразмерных пузырьков, наполненных слаборастворимым в воде газом. Целью нашего исследования является изучение зависимости порога кавитации от размера и поверхностного натяжения на границе газ – вода. Поверхностное натяжение считается зависимым от радиуса кривизны и описывается теорией Толмена [8]. Будет исследовано влияние так называемого параметра (длины) Толмена на явление кавитации и оценена частота звуковой волны, при которой можно ожидать появления акустической кавитации.

Влияние изменяющегося с кривизной поверхностного натяжения на порог кавитации было исследовано ранее в [9]. Но так как долгоживущие объемные нанопузырьки в жидкостях были обнаружены относительно недавно (см. обзорную статью [10]), в [9] рассматривались только микро-размерные пузырьки, для которых эффект Толмена несущественен и зависимость поверхностного натяжения от радиуса обусловлена другими причинами (это главным образом адсорбция поверхностно активных веществ на границе раздела газ – вода и отрицательное давление, вызванное зарядом на поверхности нанопузырька [11]).

Таким образом, можно считать, что влияние наноразмерных пузырьков на кавитацию в литературе не рассматривалось.