

УДК 534.2:532

ДИНАМИКА НЕСФЕРИЧЕСКИХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТИ В ИНТЕНСИВНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

© 2011 г.

А.А. Аганин¹, М.А. Ильгамов²

¹Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН

²Институт механики Уфимского научного центра РАН

aganin@kfti.knc.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Рассматриваются эффекты несферичности при сверхсильном сжатии отдельного пузырька вдали от внешних границ жидкости, при взаимодействии пузырьков и при сильном сжатии пузырьков вблизи поверхности тела. При реализации сверхсильного сжатия отдельного пузырька малая начальная несферичность его формы может привести к большим деформациям пузырька в конце сжатия и к еще большим деформациям радиально сходящихся ударных волн в пузырьке. При взаимодействии пузырьков развитие несферичности формы может приводить к их разрушению. При сильном сжатии пузырьков вблизи поверхности твердого тела на поверхности пузырьков могут формироваться кумулятивные струйки, обладающие большой разрушительной силой. В результате воздействия таких струек поверхность тела подвергается кавитационной эрозии. Наибольшие разрушения возникают в режиме наименее изученного ударного воздействия кавитационного пузырька на тело, когда в жидкости и теле возникают ударные волны.

Ключевые слова: газовый пузырек, сильное сжатие пузырька, несферические ударные волны, кавитационное разрушение, кумулятивная струя.

Введение

Динамика пузырьков в интенсивных акустических полях представляет значительный интерес для приложений. Так, облучение жидкости с пузырьками интенсивным ультразвуком используется в химии для интенсификации химических реакций, в медицине – для дробления камней в почках, в биологии – для очистки жидкости от различных вредных микробов и бактерий. С динамикой пузырьков в сильных акустических полях связаны такие явления, как сонолюминесценция, нейтронная эмиссия, акустические стримеры, кавитационное разрушение. Интенсивные акустические поля характеризуются амплитудами колебаний давления жидкости, сравнимыми со статическим давлением, и значительными градиентами давления. Из-за таких колебаний давления жидкости пузырьки в интенсивном акустическом поле совершают радиальные колебания большой амплитуды (до 10 равновесных радиусов пузырька). Градиенты давления в акустическом поле вызывают пространственные перемещения пузырьков. В результате перемещений пузырьки могут сильно сближаться, покидать одни места акустического поля, скапливаться в других, например в пучностях или узлах. Нелинейные радиальные колебания и пространственные перемещения вызывают деформации пузырьков, так что в интен-

сивных акустических полях пузырьки, как правило, несферические.

Эффекты несферичности пузырька при его сверхсжатии

Сильное сжатие парогазовых пузырьков вдали от внешних границ жидкости сопровождается высокими температурами, давлениями и плотностями в полости пузырьков, высокими давлениями, ударными волнами в окружающей жидкости [1, 2]. Существующая в настоящее время теория сильного сжатия пузырьков сформировалась, главным образом, в результате изучения механизмов явления однопузырьковой сонолюминесценции [1] и производства продуктов термоядерного синтеза (нейтронов и ядер трития) при акустической кавитации дейтерированного ацетона [2]. В ней считается, что в финальной высокоскоростной стадии сжатия в пузырьке формируется ударная волна, сходящаяся к его центру. По мере схождения ее интенсивность возрастает так, что кратковременно в центре пузырька образуется сферическое ядро с очень высокой температурой и плотностью. В этом ядре и возникает свечение в случае сонолюминесценции и испускание нейтронов в случае нейтронной эмиссии. Данная теория основана на предположении о том, что пузырек в процессе сжатия всегда остается сферическим.

Однако в реальности этого не бывает в силу действия силы тяжести, неоднородности поля давления в жидкости, тепловых флуктуаций и т.д.

Исследуется влияние малых начальных возмущений сферичности пузырька на рост амплитуды этих возмущений в ходе сжатия, на распределение давления, плотности и температуры в полости пузырька в финале его сверхсильного сжатия. Показано [3], что малая начальная несферичность пузырька может нарастать к концу сжатия примерно в 400 раз. Еще более несферическими становятся возникающие в пузырьке в финале его сжатия радиально сходящиеся ударные волны [4]. В результате масса экстремально сильно сжатого и нагретого вещества в полости несферического пузырька оказывается меньше, чем в полости сферического. Величина достигаемых в пузырьке максимальных значений давления, плотности и температуры в ходе сжатия уменьшается, а пространственное расположение этих максимумов изменяется.

Влияние несферичности пузырьков при их взаимодействии

Важную роль в динамике двух и более пузырьков, находящихся в интенсивном акустическом поле на расстоянии порядка их радиуса друг от друга, играет гидродинамическое взаимодействие. В результате такого взаимодействия пузырьки могут удаляться друг от друга, приближаться друг к другу, образовывать устойчивые структуры (двумерные стримеры, трехмерные кластеры). Радиальные колебания отдельных пузырьков могут либо усиливаться, либо ослабляться и т.д. В интенсивных акустических полях пространственные перемещения, деформации и взаимодействие пузырьков зачастую взаимосвязаны, так что без учета какого-либо из них можно получить результаты, далекие от действительности.

Показано, что без учета деформируемости пузырьков можно получить неверные сценарии их взаимодействия [5]. В частности, вместо сближения и разрушения пузырьков, при пренебрежении их деформируемостью можно получить сближение и коагуляцию.

Ударное воздействие пузырька при его несферическом сжатии вблизи поверхности тела

Значительное внимание к воздействию на тело пузырьков, схлопывающихся около его поверхности, обусловлено большим разрушительным потенциалом такого воздействия. На прак-

тике такое воздействие приводит к разрушению поверхности тел. Теоретически [6] и экспериментально [7] было показано, что кавитационное разрушение поверхностей тел обусловлено влиянием высокоскоростных струек, образующихся на противоположной к стенке тела части поверхности пузырьков в результате их несферического сжатия. Если пузырек находится близко к телу или непосредственно примыкает к нему, то такие струйки обычно направлены к стенке тела. Струйки воздействуют на тело либо непосредственно, либо через прослойку жидкости между пузырьком и телом. К настоящему времени выполнено много исследований влияния кавитационных пузырьков на тело, но в силу значительной сложности и большой практической важности этого явления его изучение активно продолжается. Сложность данного явления заключается в том, что в общем случае при его исследовании необходимо учитывать взаимодействие между газом в пузырьке, окружающей пузырек жидкостью и телом. При этом формоизменения поверхности пузырька могут быть очень большими (сферический пузырек может превратиться в тор), в жидкости и теле могут возникать ударные волны.

Рассмотрено ударное воздействие струи жидкости в виде цилиндра с плоским концом ортогонально плоской поверхности линейно-упругого тела (полупространства) с параметрами струи, характерными для воздействия кавитационного пузырька.

Показано [8], что при ударе такой струи максимальные напряжения в теле возникают на линии оси симметрии струи на некотором удалении от его поверхности. Если число Маха набегающей струи менее 0.1, то влияние растекания струи вдоль поверхности тела незначительно.

Представляемые результаты получены в лабораториях ВДСС ИММ КазНЦ РАН и МТТ ИМех УНЦ РАН.

Работа выполнена в рамках приоритетной программы фундаментальных исследований РАН и при поддержке РФФИ.

Список литературы

1. Putterman S. J., Weninger K. P. // Annu. Rev. Fluid Mech. 2000. V. 32. P. 445–476.
2. Nigmatulin R.I. et al. // Phys. Fluids. 2005. V. 17, No 10. P. 107106.
3. Аганин А.А., Ильгамов М.А., Нигматулин Р.И., Топорков Д.Ю. // МЖГ. 2010. №1. С. 57–69.
4. Аганин А.А., Халитова Т.Ф., Хисматуллина Н.А. // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15, №1. С. 12–31.
5. Аганин А.А., Давлетшин А.И. // Математичес-

кое моделирование. 2009. Т. 21, №6. С. 89–102.

6. Plesset M.S., Chapman R.B. // J. Fluid Mech. 1971. V. 47. P. 283–290.

7. Lauterborn W., Bolle H. // J. Fluid Mech. 1975. V. 72. P. 391–399.

8. Аганин А.А., Ильгамов М.А., Малахов В.Г. // Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании: Междунар. школа-конф. для студ., асп. и мол. ученых. Математика. Т. 1. Уфа: РИЦ БашГУ, 2009. С. 3–38.

DYNAMICS OF NONSPHERICAL BUBBLES IN LIQUID IN INTENSIVE ACOUSTIC FIELDS

A.A. Aganin, M.A. Ilgamov

Effects of nonsphericity during superstrong compression of a single bubble situated far from external boundaries of a liquid, during bubble interaction, and during strong compression of bubbles in the vicinity of the body surface are considered. In implementation of superstrong compression of a single bubble, small initial nonsphericity of its shape can result in large deformations of the bubble at the end of its compression and in even larger deformations of radially convergent shock waves in the bubble. During bubble interaction, development of nonsphericity of the shape of bubbles can lead to their failure. Strong compression of bubbles in the vicinity of the surface of a rigid body can cause formation of cumulative jets on the bubble surface. These jets have large damaging effect. The impact of such jets on the body surface results in its cavitation erosion. Maximum failure arises in the least studied regime of shock impact of a cavitation bubble on the body surface when shock waves arise in the liquid and the body.

Keywords: gas bubble, strong compression of a bubble, nonspherical shock waves, cavitation failure, cumulative jet.