

# Кумуляция при сжатии кавитационных пузырьков в жидкости<sup>1</sup>

Аганин А.А.\* , Ильгамов М.А.\*\*

\* Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, Казань

\*\* Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

Рассматриваются кумулятивные эффекты при сильном сжатии кавитационных пузырьков в жидкости. Обсуждается зависимость кумуляции от малой начальной несферичности пузырьков в трех случаях. В первом случае сжатие пузырька в жидкости реализуется на большом удалении от ее границ (свободной поверхности, жестких стенок). Во втором случае рассматривается влияние близко расположенной стенки. В третьем случае пузырек сжимается при наличии в его окрестности других пузырьков.

## 1. Введение

Кумулятивные эффекты, обусловленные сильным сжатием кавитационных пузырьков в жидкости, представляют значительный интерес как с теоретической точки зрения, так и для приложений. С кумулятивными эффектами при сжатии пузырьков связаны такие явления, как кавитационное разрушение [1, 2], сонолюминесценция [3], образование алмазов при кавитации бензола [4, 5], производство нейтронов и ядер трития при акустической кавитации дейтерированного ацетона [6]. Эффекты кумуляции при сжатии пузырьков используются в химии для интенсификации химических реакций [7], в медицине для дробления камней в почках [8], в биологии для очистки жидкости от различных вредных микробов и бактерий.

При оценках кумулятивных эффектов при сильном сжатии пузырьков начальная форма пузырьков зачастую принимается чисто сферической. В настоящей работе обсуждается зависимость кумуляции от относительно малой начальной несферичности пузырьков в трех случаях. В первом случае сжатие пузырька в жидкости реализуется на большом удалении от ее границ (свободной поверхности, жестких стенок). Во втором случае рассматривается влияние близко расположенной стенки. В третьем случае пузырек сжимается при наличии в его окрестности других пузырьков.

## 2. Кумуляция при сильном сжатии отдельного пузырька в неограниченном объеме жидкости

Теоретические оценки сильного сжатия парогазовых пузырьков в жидкости вдали от ее разнообразных внешних границ с применением сферически симметричных моделей показывают, что такое сжатие сопровождается высокими температурами, давлениями и плотностями в полости пузырьков. При этом пространственные распределения давления, плотности и температуры оказываются близкими к однородным, за исключением тонкого слоя у поверхности пузырька. Если сжатие усиливать, варьируя какой-либо из параметров задачи, например, увеличивая давление жидкости, то после превышения некоторого порогового значения в финальной высокоскоростной стадии сжатия в пузырьке формируется ударная волна, сходящаяся к его центру. По мере схождения ее интенсивность возрастает. В результате энергия сжатия фокусируется не во всем объеме пузырька, а в его небольшой центральной зоне, где кратковременно образуется сферическое ядро с очень высокими значениями температуры, плотности и давления.

Кумулятивное сжатие сферического кавитационного пузырька иллюстрирует рис. 1. На этом рисунке представлены радиальные профили газодинамических параметров в финальной стадии сжатия и в самом начале следующего за ним расширения при коллапсе кавитационного пузырька в воде (левая колонка) и ацетоне (правая колонка). Радиус пузырька в начале коллапса  $R = 500$  мкм, температура пара и жидкости  $T = 293$  К в случае воды

<sup>1</sup>Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований РАН и при поддержке РФФИ.

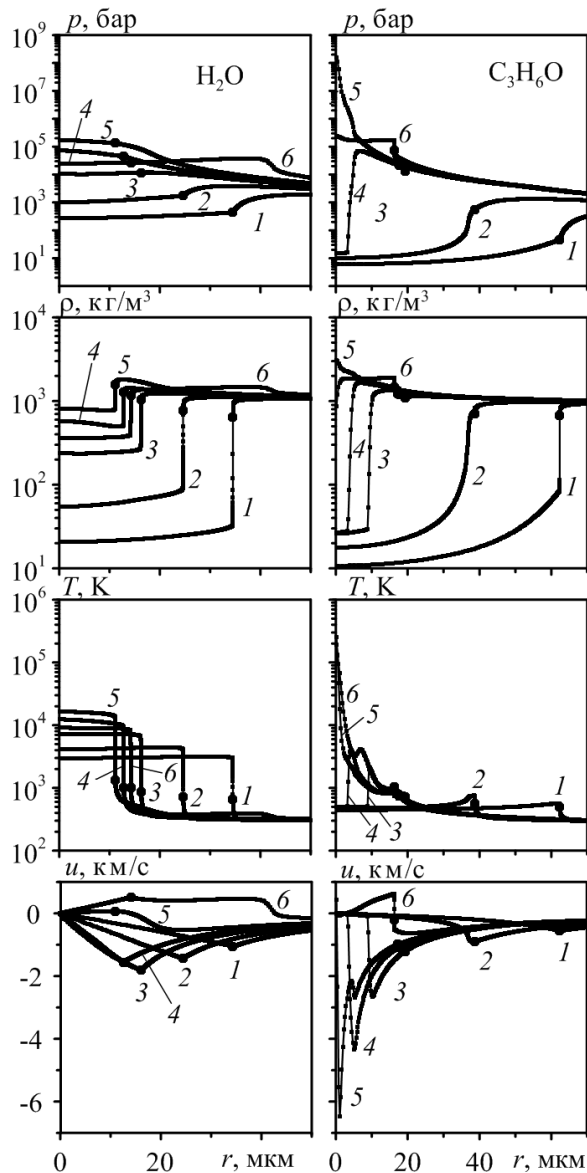


Рис. 1. Профили давления ( $p$ ), плотности ( $\rho$ ), температуры ( $T$ ) и скорости ( $u$ ) в шесть последовательных моментов времени (кривые 1–6) при сжатии чисто сферического кавитационного пузырька в воде ( $H_2O$ ) и ацетоне ( $C_3H_6O$ ). Мелкие символы соответствуют ячейкам расчетной сетки, крупные — границе пузырька

и  $T = 273$  К в случае ацетона, давление жидкости  $p = 15$  бар, давление пара — на линии насыщения. Использовалась математическая модель сферической составляющей движения работы [9]. В этой модели движение пара и жидкости описывается уравнениями газовой динамики. Учитываются нестационарная теплопроводность пара и жидкости, неравновесность испарения-конденсации на межфазной

поверхности. Применяются реалистичные широкодиапазонные уравнения состояния Нигматулина–Болотновой (для воды — из [10]). Решение задачи находится численно методом Годунова на подвижных сетках по методике, используемой в [9], расчеты выполнены Топорковым Д.Ю.

Из рис. 1 следует, что при сжатии кавитационного пузырька в воде радиальные распределения давления, плотности и температуры в финальной стадии сжатия во всем объеме пузырька близки к однородным. Исключение составляет лишь небольшая окрестность поверхности пузырька с неоднородностью температуры и плотности, которая обусловлена теплообменом. Радиальные профили скорости в пузырьке близки к линейным. Все перечисленное свидетельствует о кумуляции энергии сжатия во всем объеме пузырька.

Иная картина наблюдается при сжатии кавитационного пузырька в ацетоне. Здесь в конце сжатия (в промежутке между  $t_2$  и  $t_3$ ) в полости пузырька формируется радиально сходящаяся ударная волна. В результате ее фокусировки в центре пузырька возникает небольшая область, давление, плотность и температура в которой многократно больше, чем в периферийной области пузырька (например, давление больше в 1000 раз). При этом максимум кумуляции имеет место в самом центре пузырька в момент фокусировки там ударной волны.

Следует отметить, что из-за диссипации энергии посредством теплопроводности, потерь энергии на химические реакции, диссоциацию, ионизацию и т.д. степень кумуляции сжатия в центральной области пузырька понижается. Это можно компенсировать повышением давления жидкости, изменением ее свойств. В частности, приведенные на рис. 1 результаты, отличаются, в основном, тем, что в одном случае пузырек сжимается в воде, а в другом — в ацетоне. Расчеты показывают, что полученные для ацетона степени кумуляции можно достигнуть и в воде, но при значительно большем давлении жидкости (более 150 бар).

Рис. 2, 3 иллюстрируют влияние малой начальной несферичности на характер кумуляции в окрестности центра пузырька. На этом рисунке представлено изменение полей давления и температуры в пузырьке (а на рис. 2 и в небольшой области жидкости в окрестности пузырька) в финальной стадии его сжатия. Максимальные значения давления и температуры в пузырьке в моменты  $t_{1-3}$  составляют соответственно  $p_{max} = 0.1 \cdot 10^5$  бар,  $0.36 \cdot 10^5$  бар,  $1.5 \cdot 10^5$  бар и  $T_{max} = 0.3 \cdot 10^4$  К,  $0.8 \cdot 10^4$  К,  $1.6 \cdot 10^4$  К. Максимум давления достигается на оси симметрии на некотором удалении от фронта ударной волны, тогда как максимум темпе-

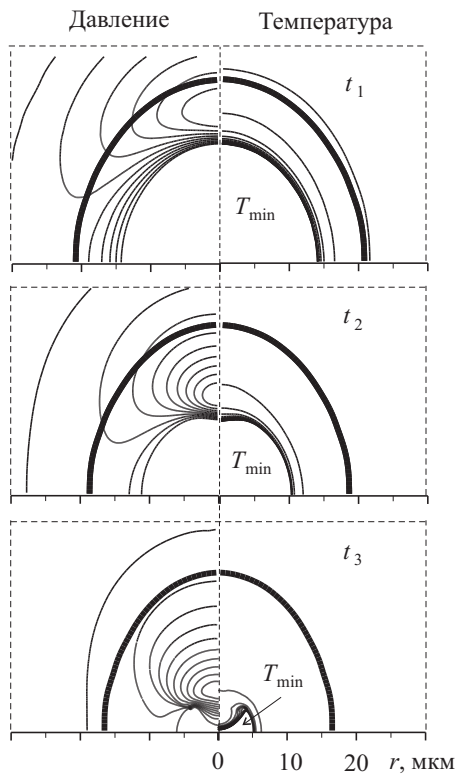


Рис. 2. Изолинии давления и температуры в паре и жидкости в три последовательных момента времени  $t_{1-3}$  в конце сжатия кавитационного пузырька в ацетоне. Внешние жирные кривые – поверхность пузырька. Наиболее близкая к центру пузырька изолиния температуры внутри пузырька соответствует фронту ударной волны. В полости перед фронтом ударной волны вплоть до ее полного смыкания давление и температура при  $t \geq t_1$  сохраняют практически неизменными свои минимальные по объему пузырька значения  $p_{min} = 12$  бар,  $T_{min} = 470$  К

ратуры — непосредственно за ее фронтом. Физическая постановка задачи здесь точно такая же, как и в случае, представленном на рис. 1 для ацетона. Отличие лишь в том, что здесь пузырек имеет малую начальную осесимметричную несферичность. В начале сжатия он является слегка приплюснутым по вертикали (оси симметрии задачи) эллипсоидом вращения. Отношение отклонения от сферической формы вдоль оси симметрии к радиусу сферической формы составляет 0.0033. Из-за начальной несферичности математическая формулировка задачи становится двумерной. Представленные на рис. 2, 3 результаты получены с использованием двумерного обобщения модели, которая применялась при получении приведенных на рис. 1 кривых. Метод численного решения изложен в [11], расчеты

выполнены Халитовой Т.Ф.

Как видно, наличие малой начальной несферичности оказывает существенное влияние на всю финальную стадию кумуляции (фокусировку ударной волны). Рассмотрим более подробно влияние начальной несферичности на процесс смыкания (исчезновения) полости перед фронтом возникающей в пузырьке радиально сходящейся ударной волны. В силу кратковременности процесса смыкания этой полости газодинамические параметры (давление, плотность, температура) в ней в ходе смыкания остаются близкими к однородным по объему и мало меняются со временем. В случае чисто сферического пузырька эта полость чисто сферическая. Ее радиус равен радиусу фронта ударной волны, поэтому по мере схождения ударной волны она смыкается как стягиваемый в точку шар с центром, совпадающим с центром пузырька.

При анализе смыкания подобной полости в случае пузырька с малой начальной несферичностью (рис. 2, 3) следует иметь в виду, что несферичность пузырька к концу сжатия заметно возрастает (рис. 2). При этом, если в начале сжатия пузырек был по оси слегка приплюснутым, то к концу сжатия он уже стал немного вытянутым. На рис. 2, 3 приведен довольно короткий отрезок финальной стадии сжатия пузырька, в котором поверхность пузырька изменяется незначительно. Сходящаяся ударная волна, а вместе с ней и рассматриваемая полость перед ее фронтом, по форме сначала (момент  $t_1$ ) подобна пузырьку. Это естественно, поскольку ударная волна образуется около его поверхности. В ходе радиального схождения во фронте ударной волны (момент  $t_2$ ) в окрестности оси симметрии образуются вмятины, одна — сверху, другая, зеркальное отражение первой, — снизу (вторая вмятина на рис. 2 отсутствует, поскольку на рис. 2, 3 представлены лишь фрагменты расчетной области, расположенные выше плоскости симметрии задачи). Вмятины быстро углубляются (момент  $t_3$ ). Эти вмятины похожи на две осесимметричные соосные струи, движущиеся с большой скоростью навстречу друг к другу. В интервале  $t_3 < t < t_4$  происходит их столкновение в центре пузырька. В момент столкновения рассматриваемая полость, будучи сначала (до  $t_1$ ) близкой к эллипсоидальной, превращается в тороподобное образование (т.е. в осевом сечении полость из односвязной превращается в двусвязную). В результате столкновения в центре пузырька образуется отраженная ударная волна, симметричная относительно плоскости симметрии задачи. Отраженная ударная волна распространяется вверх и вниз, навстречу указанному противоположно направленно-

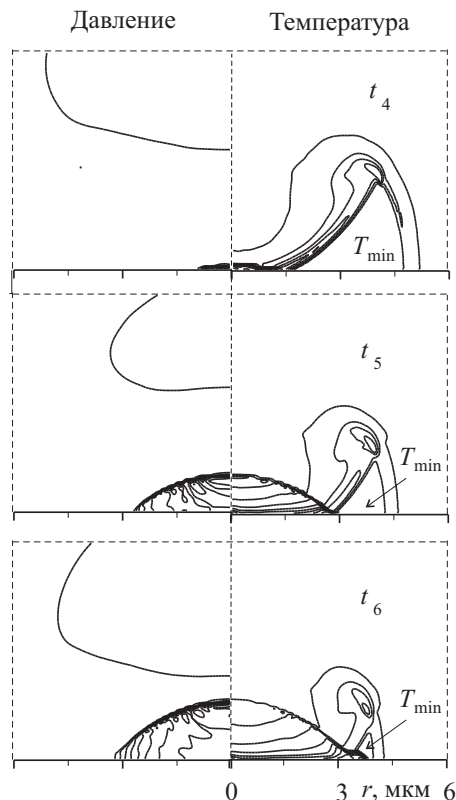


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для трех более поздних последовательных моментов времени  $t_{4-6}$  и в меньшей окрестности центра пузырька. Давление и температура внутри смыкающейся полости перед фронтом ударной здесь остаются прежними:  $p_{min} = 12$  бар,  $T_{min} = 470$  К. Максимальные значения этих параметров в пузырьке в моменты  $t_{4-6}$  составляют соответственно  $p_{max} = 12 \cdot 10^5$  бар,  $18 \cdot 10^5$  бар,  $16 \cdot 10^5$  бар и  $T_{max} = 2.8 \cdot 10^4$  К,  $3.4 \cdot 10^4$  К,  $4 \cdot 10^4$  К

му струеподобному перемещению верхней и нижней частей сходящейся ударной волны. Область за фронтом отраженной ударной волны рассекается плоскостью ее симметрии на две части, подобные шаровым сегментам (моменты  $t_4, t_5$ ). Со временем эта область увеличивается, сначала лишь в результате роста радиуса ее кругового сечения плоскостью симметрии ( $t_4 < t < t_5$ ). Затем, в дополнение к этому, в окрестности острой боковой (кольцевой) кромки этой области возникает радиально расходящееся цилиндрическое струеподобное образование («цилиндрическая струя»). Эта «цилиндрическая струя» со временем становится все более выраженной (момент  $t_6$ ). Вскоре после времени  $t_6$  она сталкивается с движущейся ей навстречу боковой частью фронта сходящейся ударной волны.

В результате схождения распространяющейся

к центральной области пузырька ударной волны, расхождения отраженной ударной волны и их взаимодействия, размеры тороподобного образования, в которое превратилась рассматриваемая полость после возникновения отраженной волны, быстро уменьшаются. При столкновении отмеченной радиально расходящейся цилиндрической «струи» с набегающей ей навстречу боковой частью фронта сходящейся ударной волны данное тороподобное образование разбивается на два более мелкие одинаковые тороподобные образования. Вскоре эти образования исчезают, что и означает завершение процесса смыкания рассматриваемой полости.

Таким образом, относительно небольшая начальная несферичность пузырька при его сильном сжатии может привести к большим деформациям возникающей в пузырьке радиально сходящейся ударной волны. В результате процесс смыкания полости перед фронтом ударной волны, где параметры пара мало меняются по пространству и времени, а вместе с этим и характер кумуляции в центральной области пузырька, оказываются совершенно отличными от того, что имеет место при чисто сферическом сжатии. В частности, вместо схлопывания полости в центре пузырька в результате сферического схождения ударной волны, смыкание подобной полости в рассмотренном несферическом случае происходит, в основном, в результате двух столкновений. Сначала в центре пузырька сталкиваются верхняя и нижняя части фронта ударной волны. Затем цилиндрически расходящаяся боковая острая кромка отраженной ударной волны, превратившись по мере расхождения в цилиндрическое струеподобное образование, сталкивается с боковой поверхностью сходящейся ударной волны. Первое столкновение в некотором смысле подобно столкновению двух движущихся навстречу друг другу одинаковых осесимметричных струй. Второе столкновение напоминает ударное взаимодействие расходящейся цилиндрической струи с цилиндрически сходящейся ударной волной.

Достижимые в ходе рассматриваемой несферической фокусировки максимальные значения давления, плотности и температуры на сетке с характерным линейным размером, близким к размеру ячеек одномерной сетки, используемой при расчете сферической фокусировки (рис. 1), соответственно равны  $p_{max} = 1.8 \cdot 10^7$  бар,  $\rho_{max} = 2500$  кг/м<sup>3</sup>,  $T_{max} = 6 \cdot 10^4$  К. По сравнению со случаем чисто сферического сжатия (рис. 1) эти значения значительно ниже соответствующих максимумов в центре пузырька, но значительно выше тех, что достигаются на его периферии.

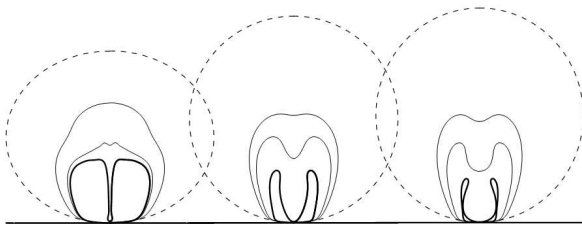


Рис. 4. Изменение формы симметричного относительно вертикали кавитационного пузырька при его коллапсе у горизонтальной стенки: пузырек в начале сжатия является приплюснутым по оси симметрии эллипсоидом (слева), чистой сферой (в центре) и вытянутым по оси эллипсоидом (справа). Штриховые линии — начало сжатия, тонкие сплошные — промежуточная стадия, жирные сплошные — момент начала ударного воздействия конца струи на стенку

### 3. Влияние твердой стенки

Известные теоретические и экспериментальные данные свидетельствуют [1, 2], что при наличии рядом с пузырьком твердой стенки на противоположной к стенке части поверхности сжимающегося пузырька в результате несферичности процесса сжатия образуется высокоскоростная кумулятивная струйка, обладающая большой разрушительной силой. Краткий обзор работ в этом направлении можно найти в [12]. Считается, что воздействие таких струек и приводит на практике к разрушению поверхностей тел. Если пузырек находится близко к стенке или непосредственно примыкает к ней, то возникающая на его поверхности кумулятивная струйка обычно оказывается направленной к стенке. Струйки воздействуют на стенку либо непосредственно, либо через прослойку жидкости между пузырьком и стенкой. К настоящему времени выполнено много исследований разрушительного влияния кавитационных пузырьков на стенки тел, 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 жидкостью и телом. При этом формоизменения поверхности пузырька могут быть очень большими (в частности, сферический пузырек может превратиться в тор), в жидкости и теле могут возникать ударные волны.

Рис. 4 иллюстрирует формирование кумулятивной струйки на поверхности кавитационного пузырька при его коллапсе у горизонтальной плос-

кой стенки в том случае, когда пузырек в начале сжатия примыкает к стенке (касается ее одной точкой своей поверхности). Показано влияние начальной несферичности. Пузырек в начале сжатия эллипсоидальный с осью симметрии, ортогональной плоскости стенки. Задача двумерная (осесимметричная). Решение находится методом граничных элементов по методике, кратко изложенной в [13], расчеты выполнены Косолаповой Л.А. Радиус сферического пузырька в начале сжатия  $R = 1$  мм. Жидкость — вода в комнатных условиях.

По мере приплюсывания пузырька вдоль оси симметрии струя в момент своего касания стенки (т.е. в момент начала ударного воздействия на стенку) становится все более тонкой. При этом ее скорость возрастает (от 120 до 530 м/с), а полость пузырька увеличивается. По мере вытягивания пузырька картина изменяется на противоположную: струя утолщается, ее скорость убывает (от 120 до 110 м/с), а полость пузырька уменьшается.

### 4. Влияние соседних пузырьков

Важную роль в динамике двух и более пузырьков, находящихся друг от друга на расстояниях порядка их радиусов, играет их гидродинамическое взаимодействие. Без учета такого взаимодействия можно получить оценки, далекие от действительности. В результате взаимодействия пузырьки могут удаляться друг от друга, приближаться друг к другу. Их радиальные колебания могут либо усиливаться, либо ослабляться и т.д. Взаимодействие пузырьков может приводить к их деформациям. Расчеты показывают, что взаимодействие пузырьков накладывает ограничение на величину минимальных искажений сферической формы пузырька в начале сжатия. При сильном сжатии в финальной высокоскоростной стадии сжатия влияние взаимодействия между пузырьками становится несущественным.

### 5. Заключение

Показано, что относительно небольшие начальные отклонения от сферичности пузырьков в начале их сжатия могут приводить к значительным изменениям процесса кумуляции и ее характеристик (скорости, давления, плотности и т.д.) при коллапсе пузырьков на большом удалении от разнообразных границ, около твердой стенки и во взаимодействии с соседними пузырьками. В частности, при коллапсе пузырька у стенки изменяются скорость и диаметр образующейся на поверхности пузырька кумулятивной струйки, объем полости пузырька в момент начала ударного воздействия этой струйки на стенку.

**Список литературы**

- [1] Kornfeld M., Suvorov N. On the destructive action of cavitation // *App. Phys.* 1944. V. 15. P. 495–506.
- [2] Plesset M.S., Chapman R.B. Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary // *J. Fluid Mech.* 1971. V. 47. P. 283–290.
- [3] Gaitan D.F., Crum L.A. Observation of sonoluminescence from a single, stable cavitation bubble in a water/glycerine mixture // In 12th Intern. Symp. On Nonl. Acoustics. New York: Elsevier, 1990. P. 459–463.
- [4] Галимов Э.М., Кудин А.М., Скоробогатский В.Н., Плотниченко В.Г., Бондарев О.Л., Зарубин Б.Г., Страздовский В.В., Аронин А.С., Фисенко А.В., Быков И.В., Баринов А.Ю. Экспериментальное подтверждение синтеза алмаза в процессе кавитации // *ДАН.* 2004. Т. 395, № 2. С. 187–191.
- [5] Днестровский А.Ю., Воропаев С.А., Пономарева Е.А. Моделирование условий образования алмаза при кавитации в бензоле // *ДАН.* 2011. Т. 416, № 5. С. 611–614.
- [6] Taleyarkhan R.P., West C.D., Cho J.S. (jr), Nigmatulin R.I., Block R.C. Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation // *Science.* 2002. V. 295. P. 1868–1873.
- [7] Suslick K.S. Sonochemistry // *Science.* 1990. V. 247.
- [8] Chaussy C. *Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy: New Aspects in the Treatment of Kidney Stone Disease.* Basel: Karger, 1982.
- [9] Аганин А.А., Ильгамов М.А., Нигматулин Р.И., Топорков Д.Ю. Эволюция искажений сферичности кавитационного пузырька при акустическом сверхсжатии // *МЖГ.* 2010. № 1. С.57–69.
- [10] Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // *Теплофизика высоких температур.* 2011. Т. 49, № 2. С. 310–313.
- [11] Аганин А.А., Халитова Т.Ф., Хисматуллина Н.А. Метод численного решения задач сильного сжатия несферического кавитационного пузырька // *Вычислительные технологии.* 2010. Т. 15, № 1. С. 14–32.
- [12] Аганин А.А., Ильгамов М.А., Малахов В.Г., Халитова Т.Ф., Хисматуллина Н.А. Ударное воздействие кавитационного пузырька на упругое тело // *Ученые записки Казанского университета.* 2011. Т. 153. Серия: физико-математические науки. Книга 1. С. 131–146.
- [13] Косолапова Л.А., Малахов В.Г., Хисматуллина Н.А. Ударное воздействие кавитационного пузырька на упругое полупространство // *Труды X Международной Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление» 12–16 июня 2012 г. (в печати).*