

РЕАКЦИЯ УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА НА УДАРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СТРУИ

© А.А.Аганин, Т.Ф.Халитова, Н.А.Хисматуллина

В статье изучается динамика упругого тела при приложении к его поверхности нагрузки, типичной для ударного воздействия струи жидкости на поверхность тела. Тело моделируется как линейно-упругое полупространство. Рассматриваются два вида нагружения. В первом из них нагрузка соответствует удару цилиндрической струи жидкости с плоским концом, а во втором – с полусферическим.

Показано, что в первом случае в теле возникают две наиболее напряженные области: одна – в малой окрестности центра нагруженной части поверхности тела, другая – внутри тела в окрестности точки оси симметрии, удаленной от поверхности тела примерно на 0,75 радиуса струи. Во втором случае таких областей лишь одна. Она локализуется в окрестности точек поверхности тела, удаленных от центра ее нагруженной части примерно на 0,25 радиуса струи.

Ключевые слова: кавитационное разрушение, кавитационная эрозия, численное моделирование гидроупругого взаимодействия, ударное воздействие струи.

1. Введение

Как известно, поверхности элементов конструкций, находящихся в контакте с жидкостью, давление которой является переменным, подвержены кавитационной эрозии – разрушению тел под действием импульсов давления, возникающих при схлопывании кавитационных пузырьков. Фундаментальным для понимания разрушительного влияния кавитации является выяснение особенностей воздействия на тело отдельного пузырька. Несмотря на большое количество исследований этой проблемы (например, [1; 2; 3; 4; 5; 6]), ряд важных вопросов до сих пор остается неизученным.

В настоящей работе моделируется ударное воздействие на тело высокоскоростной струи жидкости, образующейся на поверхности пузырька при его схлопывании около тела. Струя образуется на противоположной к стенке тела части поверхности пузырька с направлением к стенке тела. В процессе схлопывания пузырька струя становится все более выраженной, довольно быстро пересекает полость пузырька и бьет по телу либо непосредственно, если пузырек прижимается к телу, либо по поверхности прослойки жидкости между пузырьком и телом, если пузырек отстоит от тела на небольшое расстояние. В настоящей работе при моделировании ударного воздействия на тело струи жидкости, образующейся на поверхности кавитационного пузырька, задача полагается осесимметричной. Ось симметрии является ось симметрии струи. Принимается, что струя начинает воздействовать на тело в тот момент, когда конец струи касается по-

верхности тела. Полость пузырька по сравнению с поперечным размером струи считается настолько большой, что влиянием ее верхней и боковой поверхностей можно пренебречь. Кроме того, принимается, что линейные размеры кавитационного пузырька намного меньше размеров тела. С учетом этого размеры тела по сравнению с размерами струи можно принять бесконечными. Такое допущение вполне естественно, так как обычно кавитационные пузырьки значительно меньше тел.

Таким образом, в результате указанных упрощений воздействие образующейся на поверхности кавитационного пузырька струи моделируется в настоящей работе как воздействие цилиндрического столбика жидкости, бьющего по нормали к плоской поверхности упругого тела (полупространства). Однако даже при таких упрощениях решение задачи в гидроупругой постановке, т.е. с учетом взаимодействия струи и упругого тела, остается весьма сложным. Поэтому в настоящей работе изучается динамика упругого тела (полупространства) при приложении к его поверхности нагрузки, которая является типичной для ударного воздействия струи жидкости на поверхность тела. При этом тело моделируется как линейно-упругое полупространство (аналог модели линейной акустики для жидкости).

Рассматриваются два случая. В первом из них изучается воздействие нагрузки, типичной для удара по телу струи жидкости с плоским концом. Нагрузка в этом случае задается мгновенным увеличением давления в круговой облас-

ти поверхности тела радиусом $R_L = R$ до некоторого одинакового по пространству уровня (определяемого параметрами натекающей струи). В последующем давление во всех точках поверхности тела сохраняется неизменным.

Во втором случае исследуется воздействие нагрузки, характерной для удара по телу струи с полусферическим концом. Нагрузка в этом случае задается увеличением давления до того же уровня, что и в первом случае, но теперь в круговой области поверхности тела с радиусом R_L , изменяющимся (возрастающим) со временем от 0 до R . Скорость увеличения R_L определяется параметрами натекающей струи [7].

2. Математическая постановка задачи

Рассматривается динамика упругого тела (полупространства) при приложении к его поверхности нагрузки, типичного для удара по телу струй жидкости с плоским и полусферическими концами. Линейные размеры кавитационных пузырьков обычно намного меньше размеров тела. С учетом этого рассматриваемое тело считается упругим полупространством.

Динамика упругого тела при осевой симметрии задачи описывается уравнениями [8]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} \right), \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v}{\partial z} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} \right), \\ \frac{\partial \sigma_r}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r} + \lambda \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u}{r} \right), \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial t} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial t} &= \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) + (\lambda + 2\mu) \frac{u}{r}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь r, z – радиальная и осевая координаты цилиндрической системы отсчета; t – время; ρ – плотность; u, v – компоненты скорости по осям r и z соответственно; $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\varphi, \tau_{rz}$ – компоненты напряжений в упругом теле; $\lambda = \rho(c_1^2 - 2c_2^2)$, $\mu = \rho c_2^2$ – параметры Ламе, где c_1 и c_2 – продольная и сдвиговая скорости звука.

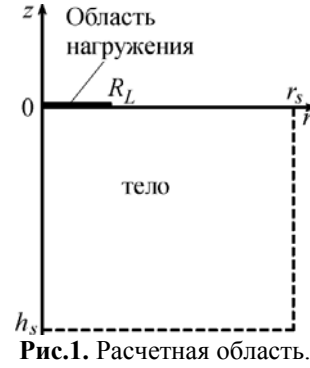


Рис.1. Расчетная область.

За начальный момент времени $t = 0$ (момент приложения нагрузки) принимается момент касания струи поверхности тела.

На нагруженной части поверхности упругого тела полагаются

$$\sigma_z = -p^*, \tau_{rz} = 0 \quad (0 \leq r \leq R_L, z = 0), \quad (2)$$

где p^* – давление жидкости, возникающее на поверхности тела в точке $r = 0$ в начале ударного воздействия струи. В случае нагрузки, соответствующей струе с плоским концом, радиус круговой области контакта $R_L = R$. При нагрузке, соответствующей струе с полусферическим концом, радиус R_L увеличивается со скоростью v_L [7],

$$v = \frac{v(R - vt)}{\sqrt{2Rvt - vt^2}}, \quad (3)$$

где v_0 – скорость струи.

На оси симметрии ($r = 0, -\infty < z \leq 0$) ставятся следующие условия:

$$u = 0, \tau_{rz} = 0, \quad (4)$$

а на свободной поверхности тела ($R < r < \infty, z = 0$) – следующие:

$$\sigma_z = -p_0, \tau_{rz} = 0. \quad (5)$$

На бесконечном удалении от места приложения нагрузки тело считается невозмущенным. В расчетах бесконечная область $0 \leq r < \infty, -\infty < z \leq 0$ заменяется конечной цилиндрической областью $0 \leq r \leq r_s, h_s \leq z \leq 0$ (рис.1). Внешние границы $r = r_s$ и $z = h_s$ являются "искусственными". Они выбираются столь далекими, чтобы отраженные от них волны не оказывали заметного влияния на величину экстремальных напряжений в теле (экстремальные напряжения возникают в окрестности оси симметрии вблизи поверхности тела). Удаленность искусственных границ зависит от условий, принимаемых на этих границах. В настоящей работе принято $r_s = -h_s = 2,2R$ [9], на искусственных границах задаются неотражающие краевые условия [10].

Считается, что в начальный момент времени $t = 0$ в упругом полупространстве деформации в радиальном и окружном направлениях

отсутствуют. При этом реализуется статическое напряженное состояние

$$\sigma_z^0 = -p_0, \sigma_r^0 = \sigma_\varphi^0 = -\lambda(\lambda + 2\mu)^{-1} p_0, \quad (6)$$

$$\tau_{rz}^0 = 0, u^0 = v^0 = 0.$$

Для решения задачи (1)-(6) применяется разностная схема Годунова первого порядка точности [11].

С целью оценки напряженного состояния в упругом теле обычно используется величина интенсивности напряжений σ_i ,

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_z - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_r - \sigma_\varphi)^2 + 6\tau_{rz}^2}.$$

При исследовании напряженно-деформированного состояния металлических упругих тел экстремальные значения интенсивности напряжений σ_i и их положение в теле представляют, как правило, наибольший интерес, поскольку величина σ_i применяется во многих критериях разрушения.

В настоящей работе для характеристики напряженного состояния тела применяется безразмерное возмущение интенсивности напряжений ζ_i , определяемое выражением

$$\zeta_i(r, z, t) = \frac{\sigma_i - \sigma_i^0}{\sigma_i^* - \sigma_i^0}.$$

Здесь σ_i^0 – начальное значение интенсивности напряжений в теле, σ_i^* – максимальное значение σ_i в одномерной задаче об ударе струи с плоским концом бесконечного радиуса по упругому полупространству.

Для анализа максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений используется безразмерная величина

$$\zeta_i^{\max}(r, z) = \max_t \zeta_i(r, z, t).$$

3. Результаты расчетов

Исследование динамики тела при приложении к его поверхности нагрузки, характерной для удара струи, проводится при следующих данных: $\rho = 8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\rho_0 = 10^3 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 5742.9 \text{ м/с}$,

$c_2 = 3069.7 \text{ м/с}$, $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$, $R = 20 \text{ мкм}$. Эти данные соответствуют удару водяной струи по стальному телу.

Шаг по времени определяется из условия устойчивости [11]

$$\tau = \frac{\delta}{c_1} \cdot \frac{\Delta r \cdot \Delta z}{\Delta r + \Delta z},$$

где Δr и Δz – шаги сетки по радиальной и осевой координатам соответственно, $\delta = 0.95$.

Расчеты проведены на шести равномерных последовательно сгущающихся квадратных сетках с размером ячеек $R/40$, $R/80$, $R/160$, $R/320$, $R/640$ и $R/1280$. Дальнейшее измельчение ячеек не проводилось в силу больших потребностей компьютерного времени. Там, где не оговорено противное, речь идет о результатах, полученных на сетке $R/1280$.

3.1. Динамика упругого тела при нагрузке, моделирующей удар струи с плоским концом

Изменение напряженного состояния упругого тела при неподвижной нагрузке, соответствующей удару струи с плоским концом, показано на рис.2.

Видно, что сначала (рис.2а) процесс изменения поля напряжений в теле развивается как одномерный, двумерные эффекты проявляются лишь в малой области у края нагрузки. В этой области величина ζ_i принимает максимальное на момент t_1 значение ($\zeta_i \approx 1,3$). В дальнейшем зона, где возмущение интенсивности напряжений принимает наибольшие значения, продвигается вглубь тела по направлению к оси симметрии, значение максимума растет. Абсолютный по времени и пространству максимум величины ζ_i ($\zeta_i \approx 3,2$) достигается в момент t_2 на оси симметрии на расстоянии примерно $0.75R$ от поверхности тела (рис.2б). Далее величина максимальных напряжений в теле падает, а зона, где они достигаются, оставаясь на оси симметрии, продвигается вглубь тела (рис.2с).

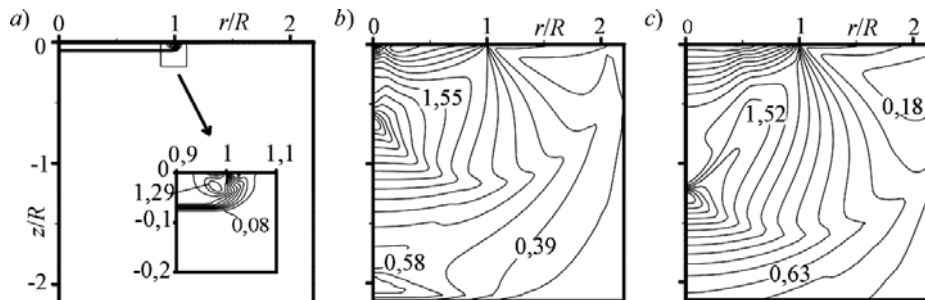


Рис.2. Изолинии возмущений интенсивности напряжений ζ_i в теле при воздействии на него неподвижной нагрузки, типичной для удара струи с плоским концом, в три момента времени t_{1-3} . Момент t_1 (а) соответствует началу процесса деформирования, в момент t_2 (б) достигается максимальное по времени и пространству значение ζ_i , момент t_3 (с) характеризует последующее изменение поля ζ_i . На вкладке рисунка (а) указанная квадратиком область вблизи края нагрузки приведена в увеличенном масштабе.

На рис.3 представлено поле максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений в рассматриваемой области тела $0 \leq r \leq 2,2R$, $-2,2R \leq z \leq 0$. Этому рисунку соответствуют сплошные линии на рис.4, где приведены профили максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений на оси симметрии и поверхности тела, рассчитанные на трех последовательно сгущающихся сетках. Видно, что поле максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений (рис.3) значительно отличается от полей возмущений интенсивности напряжений в фиксированные моменты времени (рис.2). Локальные экстремумы (их два) в поле максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений располагаются на поверхности тела в центре области нагружения и внутри тела на оси симметрии на расстоянии $\sim 0,75R$ от его поверхности (рис.3, 4). При этом область, где возникает первый экстремум, настолько узка, что в масштабе левого рисунка на рис. 3 ее не видно. Она становится заметной лишь при очень большом увеличении разрешения (рис.3 справа).

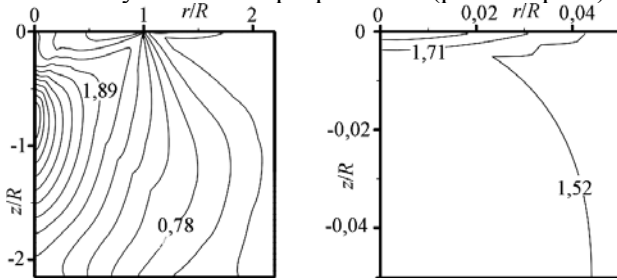


Рис.3. Изолинии максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений в теле $\zeta_i^{\max}(r, z)$ при воздействии на него нагрузки, типичной для удара струи с плоским концом (слева – во всей расчетной области, справа – в узкой области при поверхности тела).

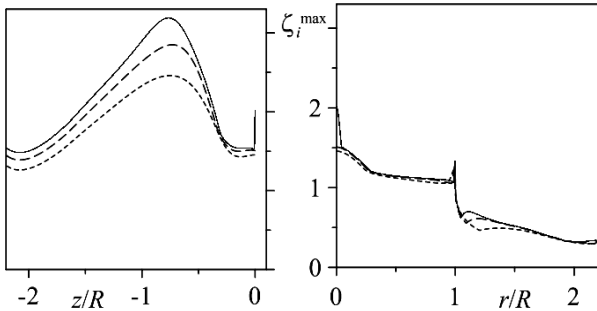


Рис.4. Распределение максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений ζ_i^{\max} на оси симметрии (слева) и на поверхности тела (справа) на трех сетках с шагом $R/80$ (пунктирные кривые), $R/320$ (штриховые кривые) и $R/1280$ (сплошные кривые) в случае приложения нагрузки, соответствующей удару струи с плоским концом.

На рис.4 видно, что на поверхности тела всюду, кроме узкой зоны вблизи центра круговой

области нагружения, численное решение по мере измельчения сетки сходится. В центре этой зоны величина максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений ζ_i^{\max} неограниченно растет из-за схождения волны сжатия вдоль поверхности тела. Эта особенность решения обнаруживается лишь на самой мелкой сетке. На оси симметрии максимальное значение ζ_i^{\max} с измельчением сетки растет не только на поверхности, но и внутри тела.

3.2. Динамика упругого тела при нагрузке, моделирующей удар струи с полусферическим концом

При приложении к телу нагрузки, соответствующей удару струи с полусферическим концом, круговая область нагружения поверхности тела расширяется от 0 до R со скоростью v_L согласно формуле (3). Изменение скорости расширения показано на рис.5. Видно, что на очень коротком начальном отрезке времени скорость расширения области нагружения быстро падает от бесконечно больших значений до величин, сравнимых со скоростью распространения продольных звуковых возмущений в теле. Затем v_L плавно уменьшается до нуля.

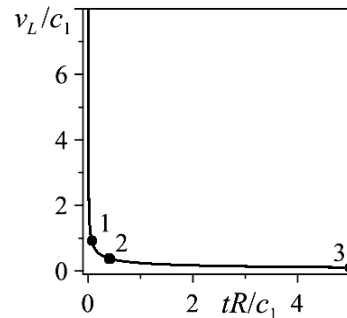


Рис.5. Зависимость безразмерной скорости расширения круговой области нагружения поверхности тела от безразмерного времени. Точками отмечены значения скорости в соответствующие рис.6 моменты времени.

Изменение напряженного состояния тела при приложении к его поверхности нагрузки, соответствующей удару струи с полусферическим концом, показано на рис.6. Скорость расширения области нагружения в соответствующие рис.6 моменты времени t_{1-3} , имеет значения, отмеченные на рис.5 точками 1–3 соответственно. Видно, что в момент t_1 (рис.6a) область нагружения еще мала, так что возмущения концентрируются в малой окрестности оси симметрии и вблизи поверхности тела. Момент t_2 (рис.6b) близок к моменту t^* достижения функцией ζ_i своего максимального по времени и пространству значения (более точно, момент t_2 следует вскоре за моментом t^*). В момент t_2 зона наибольших значений интенсивности напряжений находится вблизи

поверхности тела, но, в отличие от случая нагрузки, соответствующей струе с плоским концом, не на оси симметрии, а у границы круговой области нагружения. В дальнейшем значения максимумов уменьшаются, а их положение смещается к оси симметрии. Момент t_3 (рис.6с) со-

ответствует концу рассматриваемого отрезка времени, когда радиус области нагружения R_L принимает значение R . В этот момент нагрузка становится такой же, как и в случае моделирования удара струи с плоским концом.

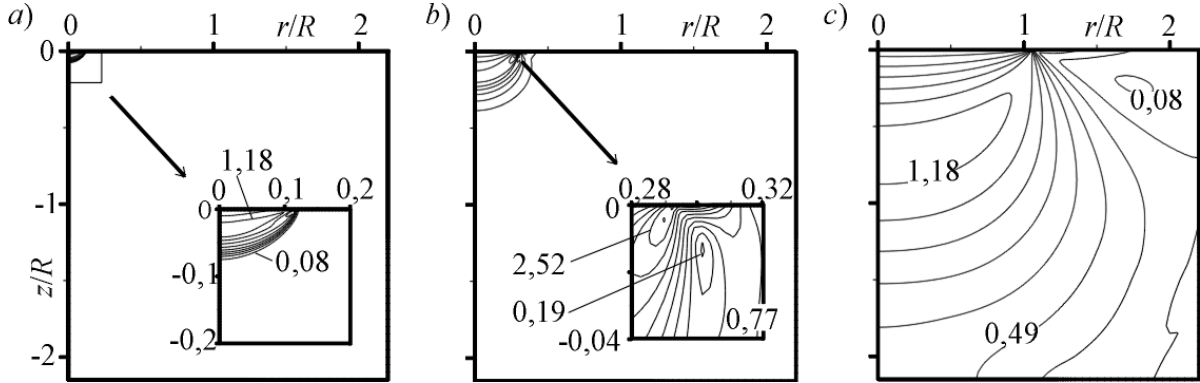


Рис.6. Изолинии возмущений интенсивности напряжений ζ_i в теле при воздействии на него нагрузки, соответствующей удару струи с полусферическим концом, в моменты времени t_{1-3} . (не совпадают с аналогично обозначенными моментами t_{1-3} на рис.2). Момент t_1 (a) соответствует началу процесса деформирования, момент t_2 (b) следует вскоре за моментом t_* достижения максимального по времени и пространству значения ζ_i , момент t_3 (c) соответствует равенству $R_L = R$. На вкладках приведены фрагменты полей в увеличенном масштабе.

На рис.7 представлено поле максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений $\zeta_i^{\max}(r, z)$ в рассматриваемой области $0 \leq r \leq 2,2R$, $-2,2R \leq z \leq 0$. Этому рисунку соответствуют сплошные линии на рис. 8, где приведены профили $\zeta_i^{\max}(r, z)$ на оси симметрии и поверхности тела, рассчитанные на трех последовательно сгущающихся сетках. Видно, что и здесь, как и в случае воздействия нагрузки, соответствующей струе с плоским концом, поле максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений (рис.7) значительно отличается от полей возмущений интенсивности напряжений в фиксированные моменты времени (рис.6). При этом наибольшее значение в поле максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений находится на поверхности тела на расстоянии $\sim 0,25R$ от оси симметрии (рис.7, 8).

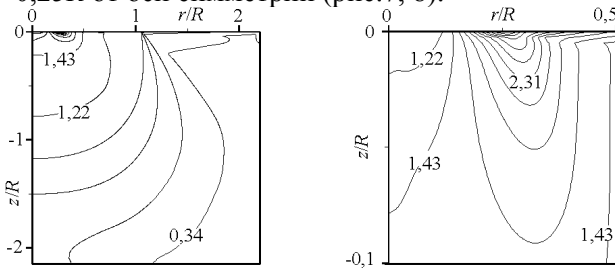


Рис.7. Изолинии максимальных по времени возмущений интенсивности напряжений в теле $\zeta_i^{\max}(r, z)$ при воздействии на него нагрузки, соответствующей удару струи с полусферическим концом (слева – во всей расчетной области, справа – в узкой области при поверхности тела).

На рис.8 видно, что на оси симметрии численное решение по мере измельчения сетки быстро сходится, а на поверхности тела максимальное значение возмущений интенсивности напряжений растет, и этот рост выражен еще более ярко, чем в случае нагрузки, соответствующей удару струи с плоским концом (рис.4).

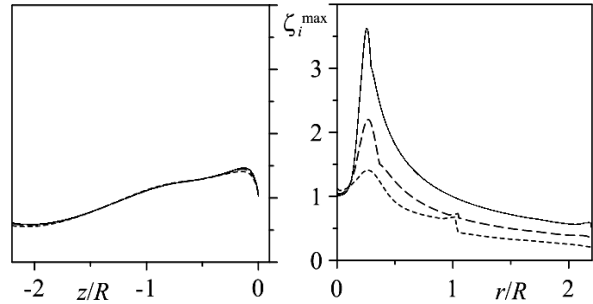


Рис.8. То же, что на рис.4, но для нагрузки, соответствующей удару струи с полусферическим концом.

4. Заключение

Проведено численное исследование динамики упругого тела при приложении к его поверхности нагрузки, типичной для ударного воздействия высокоскоростной струи жидкости. Рассмотрено воздействие нагрузок, характерных для удара струй в виде цилиндра с плоским и полусферическим концами. Входные данные соответствуют водяной струе, возникающей на поверхности маленького кавитационного пузырька при его схлопывании около поверхности большого стального тела (скорость струи 100 м/с, радиус 20 мкм; давление в полости пузырька 1 бар).

Показано, что при приложении нагрузки, соответствующей воздействию струи с плоским концом ("жидкого молотка"), в теле возникают две наиболее напряженные зоны, в которых уровень максимальных по времени значений интенсивности напряжений значительно выше, чем вне этих зон. Первая очень узкая зона находится в окрестности центра круговой области нагружения, а вторая, значительно больших размеров, – внутри тела в области оси симметрии на удалении от поверхности тела примерно на 0,75 радиуса струи. При приложении к телу нагрузки, соответствующей воздействию струи с полусферическим концом, возникает лишь одна наиболее напряженная зона, расположенная на поверхности тела на расстоянии от центра области нагружения примерно 0,25 радиуса струи.

Следует отметить, что в рамках используемых в настоящей работе модели динамики деформируемого тела и метода расчета получить оценки максимальных значений интенсивности возникающих в теле напряжений не удается из-за отсутствия сходимости численного решения по мере измельчения расчетной сетки.

Работа выполнена в рамках программы РАН, гранта Президента Российской Федерации (№МК-2712.2011.1) и при поддержке РФФИ.

1. *Rayleigh Lord*. On the pressure developed in a liquid on a collapse of a spherical cavity // *Phylos Mag.* – 1917. – Vol.34. – №200. – P.94- 97.
2. *Kornfeld M., Suvorov N.* On the destructive action of cavitation // *App. Phys.* –1944. – Vol.15. – P.495-506.

3. *Plesset M.S., Chapman R.B.* Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary // *J. Fluid Mech.* – 1971. – Vol.47. – P.283- 290.
4. *Lauterborn W., Bolle H.* Experimental investigations of cavitation-bubble collapse in the neighbourhood of a solid boundary // *J. Fluid Mech.* – 1975. – Vol.72. – P.391- 399.
5. *Аганин А.А., Малахов В.Г., Халитова Т.Ф., Хисматуллина Н.А.* Силовое воздействие кавитационного пузырька на упругое тело// *Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела: тр. Второй междунар. конф. Казань, 8-11 декабря 2009.* – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – С.20-24.
6. *Mettin R., Luther S., et. al.* Investigations of cavitation bubble dynamics by means of fast Cinematography // *The Intern. Conf. on multiphase systems.* Gilem Publisher, Pol Publisher. – Ufa, 2000. – P.279-287.
7. *Haller K.K., Ventikos Y., Poulikakos D., Monkewitz P.* Computational study of high-speed liquid droplet impact // *J. App. Phys.* – 2002. – Vol.92. – №.5. –P.2821-2828.
8. *Чебан В.Г., Навал И.К., Сабодаш П.Ф., Чередниченко Р.А.* Численные методы решения задач динамической теории упругости. – Кишинев: Изд-во Штиинца, 1976. – 226 с.
9. *Аганин А.А., Малахов В.Г., Халитова Т.Ф., Хисматуллина Н.А.* Расчет силового воздействия кавитационного пузырька на упругое тело // *Вест. ТГГПУ.* – 2010. – №4(22). – С.6- 13.
10. *Ильгамов М.А., Гильманов А.Н.* Неотражающие условия на границах расчетной области. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 240 с.
11. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

THE RESPONSE OF THE ELASTIC SEMI-SPACE TO THE IMPACT OF A JET

A.A.Aganin, T.F.Khalitova, N.A.Khismatullina

The authors of the article consider the dynamics of an elastic body under the action of a load typical of impact of a high-speed jet on the body surface. The body is modeled as an elastic semi-space. Two kinds of loading are considered. The first kind of loading corresponds to impact of a cylindrical jet with the plain tip while the second kind of that with the hemispherical one.

It has been shown that two most stressed domains arise in the body in the first case. The first domain appears in the immediate vicinity of the center of the loaded part of the body surface while the second one is situated inside the body in the neighborhood of the point of the axis of symmetry which is distant from the body surface by about 0.75 times the jet radius. In the second case, there is only one of such domains. It is located in the neighborhood of the body surface points which are distant from the loaded part of the body surface by about 0.25 times the jet radius.

Key words: cavitation destruction, cavitation erosion, numerical simulation of hydro-elastic interaction, jet impact.

* * * * *

Аганин Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной математики и информатики Татарского государственного гуманитарно-педагогического университета.

E-mail: aganin@kfti.knc.ru

Халитова Галия Фаритовна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института механики и машиностроения Казанского научного центра РАН.

E-mail: taliny@mail.ru

Хисматуллина Наиля Абдулхаевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вычислительной математики и информатики Татарского государственного гуманитарно-педагогического университета.

E-mail: nailya_hism@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.2011