

УДАРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СТРУИ НА ЖЕСТКУЮ СТЕНКУ

А.А. Аганин, М.А. Ильгамов, Т.Ф. Халитова
aganin@kfti.knc.ru, taliny@kfti.knc.ru

Изучается ударное воздействие на жесткую стенку струи жидкости, образованной при схлопывании пузырька вблизи ее поверхности. Струя моделируется цилиндрическим столбом жидкости с плоским или полусферическим концом.

Поверхности элементов конструкций, находящихся в контакте с движущейся жидкостью или жидкостью с переменным давлением, подвержены кавитационной эрозии (разрушению). Обусловленные кавитацией повреждения возникают в результате воздействия ударных волн давления, образующихся при схлопывании парогазовых пузырьков. Фундаментальным для понимания разрушительного влияния кавитации является уяснение особенностей воздействия на тело отдельного пузырька. Несмотря на большое количество исследований этой проблемы (например, обзор [1-2]), ряд важных вопросов воздействия отдельных пузырьков на тело до сих пор остается неизученным. Не изучен, в частности, режим ударного воздействия, при котором в финальной стадии сжатия пузырька в жидкости возникают ударные волны.

В настоящее время сформировалось следующее представление о механизме кавитационного разрушения. При схлопывании пузырька вблизи поверхности тела на поверхности пузырька образуется высокоскоростная струя, направленная к стенке тела. Эта струя пересекает полость пузырька и бьет по телу либо непосредственно, если пузырек примыкает к телу, либо по поверхности прослойки жидкости между пузырьком и телом, если пузырек отстоит от тела на небольшое расстояние.

В настоящей работе рассматривается удар образованной на поверхности пузырька высокоскоростной струи жидкости (воды) по

телу без учета его упругих свойств (т.е. по абсолютно твердому телу). Основное внимание уделяется силовому нагружению поверхности тела (жесткой стенки), ее зависимости от формы конца струи. Параметры струи принимаются близкими к тем, что наблюдаются в экспериментах по изучению воздействия кавитационных пузырьков на тело. Рассматриваются цилиндрические струи жидкости с плоским и полусферическим концами. В начальный момент времени областью контакта струи с плоским концом является круг радиусом, равным радиусу струи, а областью контакта струи с полусферическим концом – лишь одна точка. Проведено сравнение полученного в расчетах максимального значения давления жидкости в струе при ее ударе по поверхности жесткой стенки с известными аналитическими оценками.

Постановка задачи

На рис. 1а показан начальный момент ударного воздействия струи на жесткую стенку. Исследования показали [3], что ударное воздействие струи на тело более разрушительно, когда пузырек примыкает к телу. В силу этого в настоящей работе ударное воздействие струи изучается только в том случае, когда пузырек примыкает к стенке. При этом форма пузырька, а вместе с ней и форма струи, значительно упрощаются, как указано на рис. 1б.

Принимается, что струя начинает воздействовать на жесткую стенку в момент их касания. Полость пузырька по сравнению с поперечным размером струи считается настолько большой, что

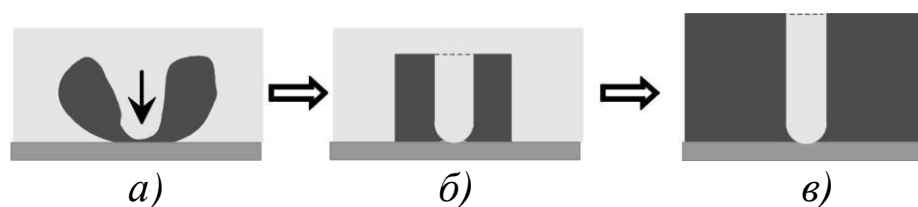


Рис. 1. Схематизация удара струи по жесткой стенке. Светло-серым цветом указан фрагмент жидкости, серым цветом – фрагмент жесткой стенки. Парогазовая полость пузырька указана темно-серым цветом. Стрелкой вниз отмечено направление движения струи. Слева (а) – форма струи, близкая к той, что наблюдается в экспериментах, справа (в) – форма струи, используемая при моделировании.

влиянием ее (полости) верхней и боковой поверхностей можно пренебречь (рис. 1в).

В настоящей работе рассматривается удар струи жидкости радиуса R с плоским (рис. 2а) и полусферическим (рис. 2б) концами по плоской жесткой стенке со скоростью $v_{\text{струи}}$.

Задача полагается осесимметричной. Ось симметрии z направлена перпендикулярно жесткой стенке в сторону струи. Динамика жидкости в струе описывается следующей системой уравнений

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \mathbf{u}) \mathbf{u} + (\rho \mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = 0, \quad (1б)$$

где t – время, ρ – плотность, p – давление, \mathbf{u} – скорость. В цилиндрической системе координат r, φ, z радиальная компонента вектора скорости \mathbf{u} обозначается u , а осевая v .

Уравнение состояния жидкости берется в форме Тэта

$$p = (p_0 + B) \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\Gamma - B,$$

где ρ_0, p_0, B, Γ – константы жидкости. В настоящей работе в качестве жидкости бралась вода с $\rho_0 = 1000$ кг/м³, $p_0 = 1$ бар, $B = 3072$ бар, $\Gamma = 7,15$. В [4] показано, что уравнение состояния Тэта с принятыми значениями B и Γ с удовлетворительной точностью описывает зависимость $p(\rho_0/\rho)$ на ударной адиабате воды до давлений $\sim 10^5$ бар.

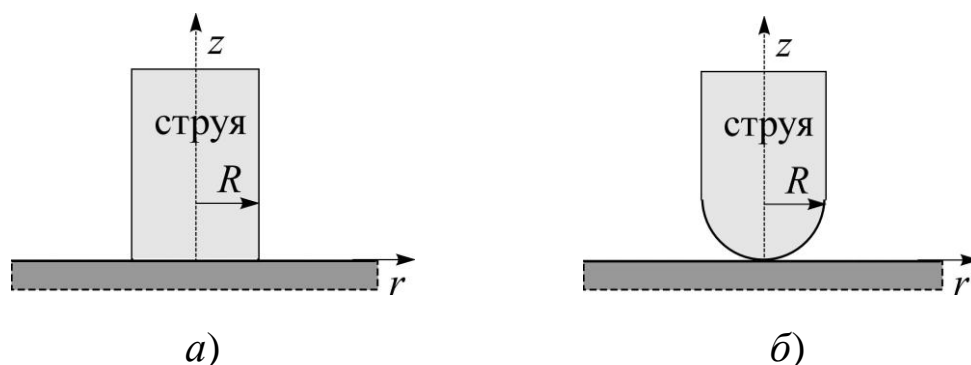


Рис. 2. Схематическое представление удара струй с плоским (а) и полусферическим (б) концами по плоской жесткой стенке.

На границах струи ставятся следующие условия:

- на нижней границе контакта струи и тела: $v = 0$,
- на верхней границе: $u = 0$, $v = -v_{струи}$,
- на свободной (боковой) поверхности: $p = p_0$,
- на оси симметрии: $u = 0$.

Исследование ударного воздействия струи на жесткую стенку проводится при входных данных, близких к тем, что характерны для струи, возникающей в комнатных условиях на поверхности примыкающего к телу кавитационного пузырька в воде при его несферическом схлопывании. С учетом этого скорость струи $v_{струи}$, ее радиус R полагаются следующими: $v_{струи} = 500$ м/с, $R = 25$ мкм.

В начальный момент времени $t = 0$ во всей струе принимается:

$$\rho = \rho_0, p = p_0, u = 0, v = -v_{струи}.$$

Расстояние от поверхности контакта «струя-жесткая стенка» до внешней верхней границы при $t = 0$ принимается равным радиусу струи R .

Методика решения

Система уравнений (1) записывается в подвижной системе координат. Решение находится численно классическим методом С.К. Годунова [5], в котором потоки через границы рассчитываются с применением решения задачи о распаде разрыва.

При расчете удара струи с плоским концом подвижная система координат выбирается таким образом, чтобы одна из координатных поверхностей совпадала с боковой поверхностью струи, а другая – с осью симметрии. При этом используется расчетная сетка с числом ячеек 320x320.

В случае удара струи с полусферическим концом численное решение задачи значительно усложняется. Во-первых, область контакта струи и тела быстро возрастает, фактически, из одной точки до круговой области с центром в данной точке. Во-вторых, часть полусферической боковой поверхности струи постепенно превращается в контактную поверхность. В-третьих, в результате растекания жидкости вдоль поверхности тела расчетная сетка с течением времени все более деформируется. Для описания этих

особенностей в настоящей работе применялась подвижная система координат, связанная с боковой поверхностью струи. Расчет был выполнен до момента сильной деформации сетки, когда возникает необходимость перехода на сетку иной (отличной от начальной) структуры (топологии). Вместе с тем, этого оказалось достаточно для выявления типичного для этой формы струи профиля нагрузки.

Ударное воздействие на жесткую стенку цилиндрической струи с плоским концом («двумерного жидкого молотка»).

На рис. 3 представлено изменение полей давления (в виде изолиний) жидкости в струе в процессе ударного воздействия струи на жесткую стенку. Видно, что в начале удара областью контакта сразу становится круг радиусом, равным радиусу струи (момент t_1). В дальнейшем из-за растекания жидкости вдоль стенки радиус круговой области контакта струи и жесткой стенки увеличивается так, что в момент t_3 он на 20% больше начального. В начале ударного воздействия в струе на поверхности контакта возникает плоская ударная волна. Со временем она распространяется навстречу движению струи. На внешней поверхности области жидкости, сжатой ударной волной, возникает волна разрежения. По жесткой стенке волна разрежения сходится к центру области контакта. В результате воздействия волны разрежения струя растекается вдоль стенки, а фронт ударной волны несколько закругляется в окрестности боковой поверхности струи.

На рис. 4 показаны распределения давления вдоль поверхности жесткой стенки. В начале удара давление в жидкости резко возрастает до своего максимального значения $p_{\max}=12,1$ кбар. Затем из-за возникающей на внешней круговой границе области контакта радиально сходящейся вдоль стенки волны разрежения давление жидкости на периферии падает до своего невозмущенного значения. В результате область, где давление сохраняет свое максимальное значение, постепенно уменьшается до нуля. Отметим, что согласно аналитическим оценкам в акустическом приближении давление при ударе «одномерным жидким молотком» по жесткой стенке определяется по формуле

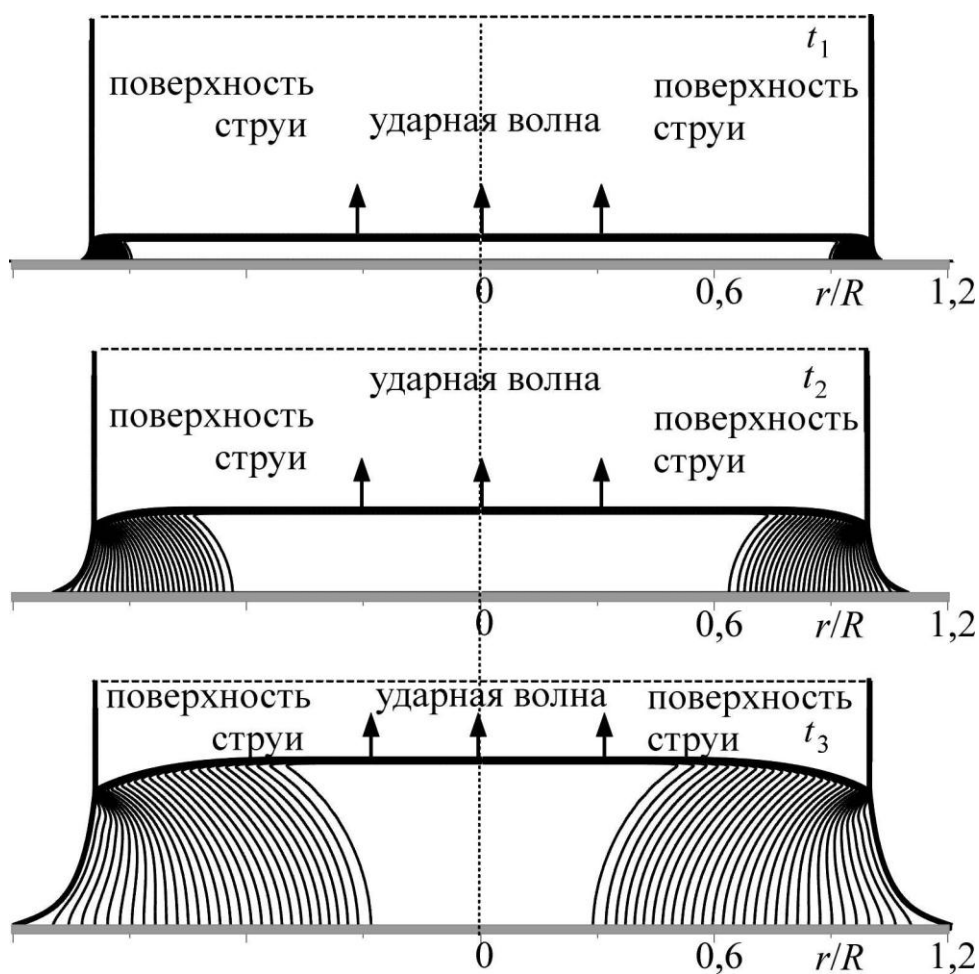


Рис. 3. Изолинии давления жидкости при ударе струи с плоским концом по жесткой стенке в три последовательных момента времени t_{1-3} . Изолинии с минимальным уровнем давления – ближайшие к внешне поверхности струи, изолинии с максимальным уровнем давления – ближайшие к оси симметрии.

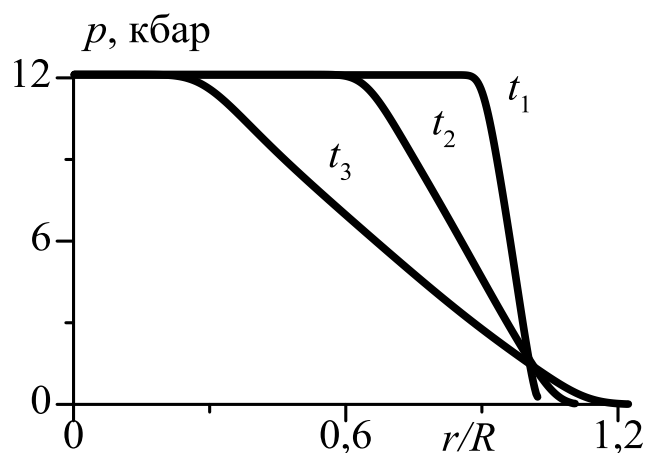


Рис. 4. Распределения давления жидкости p вдоль поверхности контакта «струя-жесткая стенка» в три последовательных момента времени t_{1-3} .

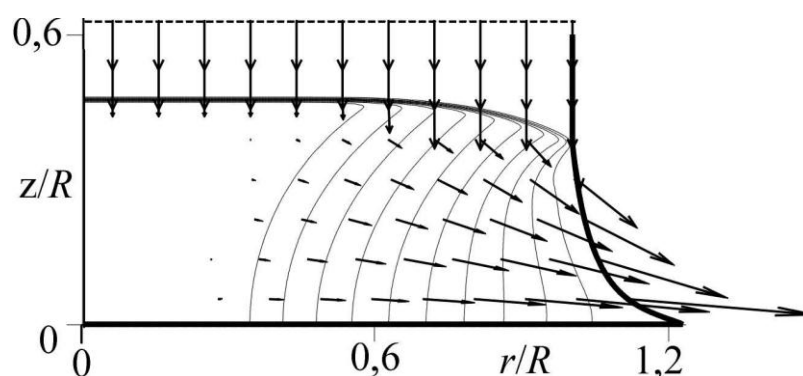


Рис. 5. Поле вектора скорости, разреженное в 8 раз в обоих направлениях, и изолинии давления (тонкие линии) жидкости в струе в момент времени t_3 .

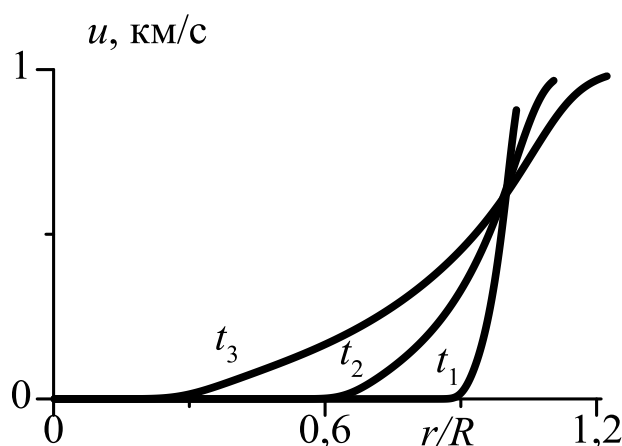


Рис. 6. Радиальные распределения скорости жидкости на поверхности контакта струи и жесткой стенки в моменты времени t_{1-3} .

$$P_{\max} = \rho_0 c_0 v_{\text{струи}},$$

где c_0 – скорость звука в невозмущенной жидкости.

При рассматриваемых в настоящей работе входных данных ($c_0 = 1482$ м/с) эта формула дает $p_{\max} = 7,4$ кбар. Это на 40% ниже, чем получается в расчете данной задачи в нелинейной постановке (отметим, что в данной задаче $v_{\text{струи}}/c_0 \approx 0,3$).

На рис. 5 показано поле вектора скорости (совмещенное с изолиниями давления) жидкости в струе в моменты времени t_{1-3} . Видно, что в области за фронтом ударной волны, куда еще не дошла волна разрежения, жидкость практически неподвижна. В возмущенной волной разрежения области жидкость движется в направлении внешней границы зоны контакта, где и достигается

максимум скорости. На рис. 6 показаны радиальные распределения скорости жидкости на поверхности контакта струи и тела в моменты времени t_{1-3} . Видно, что при принятых входных данных максимальное значение скорости примерно равно 1 км/с.

Отметим, что с самого начала ударного воздействия величина скорости на внешней границе области контакта близка к своему максимальному по времени значению. Зона области контакта струи и жесткой стенки, где скорость жидкости не равна нулю (зона растекания жидкости), постепенно увеличивается. Это обусловлено радиальным сжатием волны разрежения.

Таким образом, в радиальном профиле давления жидкости на стенке, характерном для удара по ней струи с плоским концом, давление жидкости по мере удаления от центра области контакта сначала сохраняется постоянным и равным своему максимальному при таком ударе значению. Затем оно падает до начального невозмущенного значения по закону, близкому к линейному.

Ударное воздействие на жесткую стенку цилиндрической струи с полусферическим концом.

На рис. 7 представлено изменение полей давления (в виде изолиний) жидкости в струе в процессе ударного воздействия струи на стенку. В начальный момент времени областью контакта является лишь одна точка касания кончика струи и стенки. С течением времени область контакта быстро расширяется сначала вследствие натекания струи на жесткую стенку (т.е. из-за наличия у скорости частиц жидкости в струе вертикальной составляющей), а затем вследствие ее растекания вдоль поверхности стенки (т.е. из-за наличия у скорости частиц жидкости в струе горизонтальной составляющей). В результате область контакта между струей и жесткой стенкой представляет собой расширяющийся из точки касания кончика струи и стенки круг с центром в этой точке. В начальный момент времени в точке касания струи и стенки образуется расходящаяся от этой точки ударная волна. В направлении оси симметрии скорость ее распространения вследствие влияния натекания струи меньше, чем в радиальном направлении. В результате ударная волна приобретает форму приплюснутой полусферы (моменты $t_{2,3}$). Отметим, что в промежутке

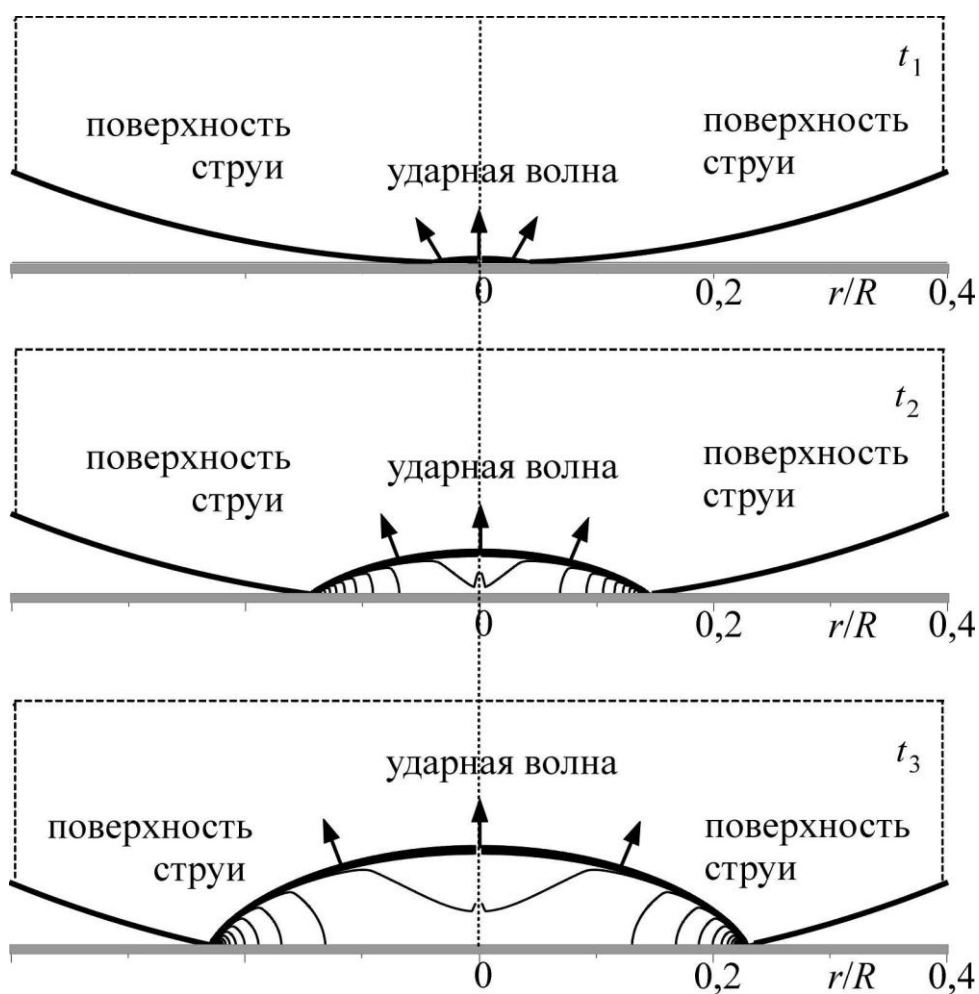


Рис. 7. Изолинии давления p жидкости при ударе струи с полусферическим концом о жесткую стенку в три последовательных момента времени t_{1-3} .

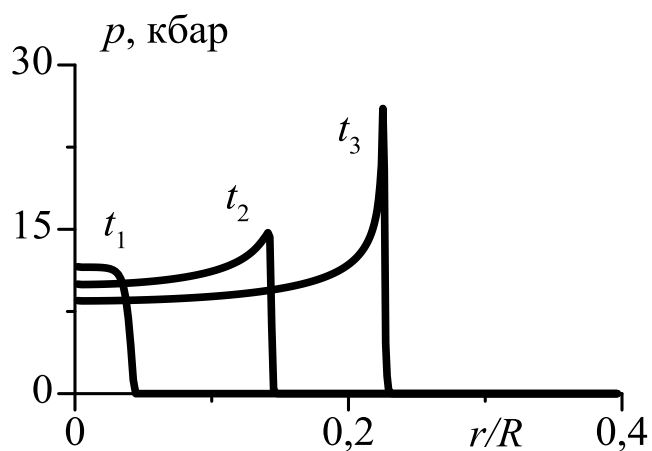


Рис. 8. Радиальные распределения давления вдоль жесткой стенки в три последовательных момента времени t_{1-3} . Области контакта струи и стенки соответствуют те части графиков, где давление выше уровня $p_0 = 1$ бар.

времени, который удалось рассмотреть в настоящей работе на сетке единой структуры, боковая граница фронта ударной волны всегда находится на стенке, совпадая с внешней границей области контакта струи и тела.

На рис 8 показано изменение радиального распределения давления вдоль жесткой стенки. В начале в результате торможения струи жесткой стенкой, также как и в задаче с плоским концом давление в области контакта резко возрастает до 12.1 кбар (момент t_1). Однако в дальнейшем в центральной области контакта из-за растекания жидкости вдоль поверхности тела оно падает, а на периферии из-за натекания струи на тело – возрастает (моменты $t_{2,3}$). В результате радиальный профиль давления жидкости вдоль поверхности тела оказывается близким к степенному. В момент t_3 давление монотонно возрастает от центра к периферии до уровня $p_{\max} \approx 26$ кбар.

Отметим, что для приближенного определения уровня максимального давления жидкости на внешней границе области контакта можно воспользоваться следующей оценкой [2]

$$p_{\max} \sim 3\rho_0 c_0 v_0.$$

При рассматриваемых в настоящей работе входных данных эта оценка дает $p_{\max} \sim 22.23$ кбар. Это вполне удовлетворительно согласуется с тем, что получается в расчетах настоящей работы.

На рис. 9 представлены поля вектора скорости жидкости (с наложенными изолиниями давления) в двух фрагментах струи в момент времени t_3 . Видно, что за фронтом ударной волны основное движение жидкости направлено к внешней границе области контакта струи и тела. В окрестности области контакта скорость частиц жидкости значительно (более чем в 3 раза) выше невозмущенной скорости струи. На рис. 10 приведены радиальные распределения скорости жидкости в струе в области контакта в моменты времени t_{1-3} . Видно, что со временем скорость жидкости становится монотонно возрастающей от центра к периферии. При этом максимум скорости превышает 1 км/с.

Таким образом, в радиальном профиле давления жидкости на стенке, характерном для удара по ней струи с полусферическим

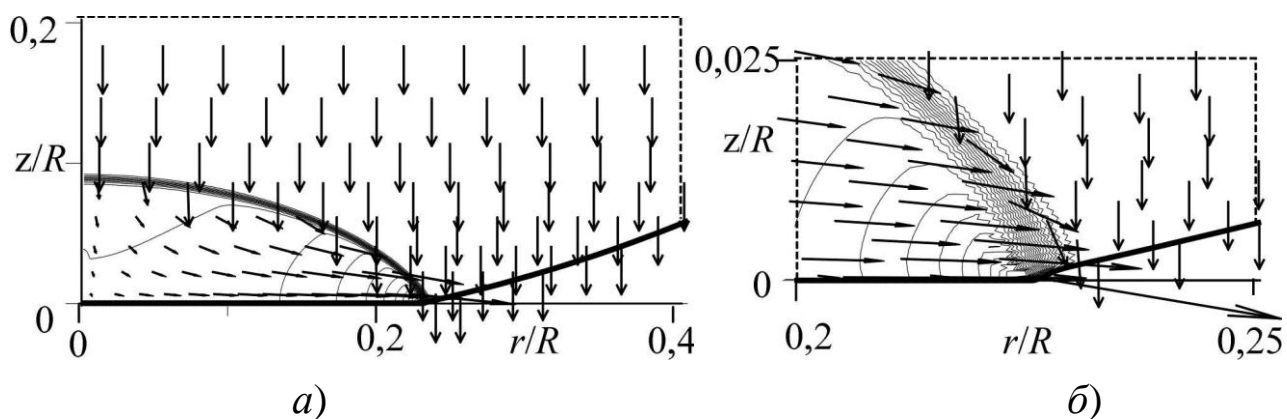


Рис. 9. Поля вектора скорости жидкости. На рис (а) разрежено для наглядности в 8 раз в обоих направлениях и на рис (b) без разрежения, и изолинии давления (тонкие линии) в двух фрагментах струи в момент времени t_3 .

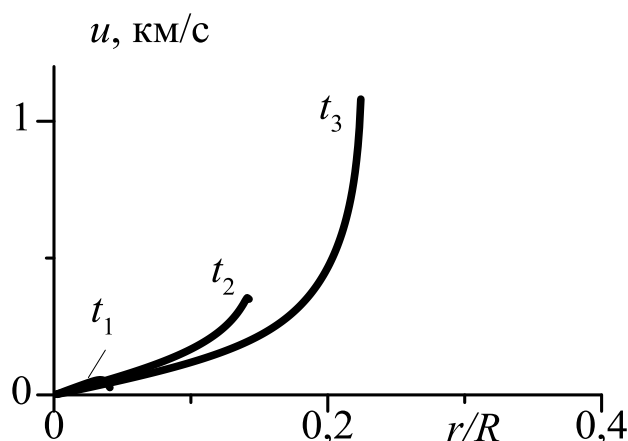


Рис. 10. Радиальные распределения скорости жидкости в струе в области контакта в моменты времени t_{1-3} .

концом, давление жидкости по мере удаления от центра области контакта монотонно возрастает по закону, близкому к степенному. Давление растет от значения, несколько меньшего максимального при ударе струи с плоским концом, до значения, в несколько раз превышающего его.

Заключение

Исследованы величина и закон изменения давления на поверхности жесткой стенки при ударном воздействии на нее цилиндрической струи жидкости с плоским и полусферическим концами. Выявлено,

что максимум давления в ходе ударного воздействия на тело струи с полусферическим концом оказывается примерно в 2 раза выше, чем при ударе струи с плоским концом. При этом характерная нагрузка в случаях струи с плоским и полусферическим концами различна. При струе с плоским концом максимум давления на стенке достигается во всей области контакта в начале удара. По мере растекания струи давление жидкости на периферии контакта падает до своего невозмущенного значения. В случае струи с полусферическим концом максимум давления достигает тогда, когда область контакта имеет радиус примерно $1/5$ радиуса струи. В радиальном профиле давления жидкости на стенке, характерном для удара по ней струи с полусферическим концом, давление жидкости по мере удаления от центра области контакта монотонно возрастает (по закону, близкому к степенному) от значения, несколько меньшего максимального при ударе струи с плоским концом, до значения, в несколько раз превышающего его.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Blake J.R., Gibson D.C.* Cavitation bubbles near boundaries // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1987. С. 99 - 123.
2. *Neumann F.J.* High-speed impact between a liquid drop and solid surface // *J. Appl. Phys.* 1969. V. 40. № 13. С. 5114 - 5122.
3. *Аганин А.А., Малахов В.Г. и др.* Силовое воздействие кавитационного пузырька на упругое тело // Труды международной конференции Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела. Казань: КГУ, 2009. С. 20 - 24.
4. *Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х.* Уравнение состояния жидкой воды при статических и ударных сжатиях // Труды VI Забабахинских научных чтений. Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2003. 20 с. [www.vniitf.ru /rig/konfer/bzst/bzst.htm](http://www.vniitf.ru/rig/konfer/bzst/bzst.htm).
5. *Годунов С.К., Забродин А.В. и др.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400с.