

*А. Н. СЕМКО*, д-р техн. наук, проф., ДонНУ, Донецк;  
*В.А. БИГВАВА*, зам. директора, НИПКИ «Искра», Луганск

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ ПОРОХОВОГО ИМПУЛЬСНОГО ВОДОМЕТА С ПЛОСКОЙ ПРЕГРАДОЙ**

Представлено результати дослідження поширення й взаємодії с перешкодою затопленого струменя порохового імпульсного водомета. Побудовано математичну модель процесу, наведені результати розрахунків для конкретної установки. Показано, що в рідині формується імпульсний затоплений струмінь із радіусом, рівним радіусу вихідного перерізу сопла. Зона підвищеного тиску локалізована поблизу центра перешкоди. Установлено, що основні параметри установки не залежать від зовнішніх умов і можуть розраховуватися без їхнього обліку.

Представлены результаты исследования распространения и взаимодействия с преградой затопленной струи порохового импульсного водомета. Построена математическая модель процесса, приведены результаты расчетов для конкретной установки. Показано, что в жидкости формируется импульсная затопленная струя с радиусом, равным радиусу выходного сечения сопла. Зона повышенного давления локализована вблизи центра преграды. Установлено, что основные параметры установки не зависят от внешних условий и могут рассчитываться без их учета.

The investigation results of expansion and interaction drowned jet from pulse-jet water cannon with barrier are presented. The mathematic model of the processes is build. The results obtained for specific construction are performed. It is shown, that radius of liquid formed drowned jet congruent the radius of nozzle exit area. The maximum pressure zone is localized near the center of barrier. It is estimated, that the main installation parameters are not depend on ambient conditions and can calculated without taken into account this parameters.

**Введение.** Импульсные высокоскоростные струи жидкости (ультра-струи) нашли широкое применение в различных технологических процессах, таких, как фрагментация крепких материалов, разрушение негабаритов, горных пород и бетонных блоков, обработка поверхности и так далее [1 – 3]. Для получения таких струй используют импульсный водомет (ИВ) и гидропушку (ГП), в которых реализуются экструзионный и инерционный принципы ускорения жидкости. Разный механизм ускорения жидкости в этих установках существенно отражается на основных гидродинамических параметрах ультра-струй: максимальной скорости, компактности, дальнобойности и коэффициенте превышения давления (отношение максимального динамического давления струи к максимальному статическому давлению внутри установки). Например, максимальная скорость струи ИВ достигает 1500 м/с, а при помощи ГП получают струи со скоростью до 3000 м/с.

Эффективность силового воздействия ультраструи зависит в первую очередь от давления, которое струя развивает на преграде. При этом можно выделить две стадии взаимодействия струи с преградой: начальную, которая характеризуется непосредственно ударом и соответственно давлением гидроудара, и установившуюся, которая характеризуется натеканием струи и соот-

ветственно динамическим напором. Давление на этих стадиях определяется исключительно скоростью струи. Как правило, рассматривается взаимодействие струи с преградой, расположенной в воздухе. Однако имеются сообщения о предварительных экспериментальных исследованиях взаимодействия импульсной высокоскоростной струи жидкости с преградой, погруженной в воду [4]. Эти исследования показали, что затопленная ультраструя может достаточно эффективно воздействовать на объекты, находящиеся в жидкости.

Теоретические исследования, выполненные на модельных задачах, в которых предполагалось, что ультраструя истекает с постоянной скоростью, позволили установить некоторые особенности и закономерности взаимодействия, затопленных ультраструй с плоской недеформируемой преградой [5, 6]. Установлено, что перед ультраструей формируется ударная волна, интенсивность которой убывает по мере распространения. Давление на преграде изменяется скачкообразно под действием ударной волны, а затем устанавливается, соответствуя динамическому напору ультраструи.

В работах [7 – 9] численно исследовано взаимодействие затопленных ультраструй, генерируемых конкретными конструкциями ГП, с плоской преградой. Как известно, в отличие от ИВ истечение струи ГП начинается с максимальной скоростью, которая затем быстро уменьшается. Эта особенность истечения ультраструи ГП сказывается на характере изменения давления струи на преграду. В начале истечения ультраструи в жидкости генерируется ударная волна, которая создает на преграде ударное давление. Затем на преграду натекает струя, оказывая динамическое давление.

В работах [10 – 11] рассмотрены перспективы применения импульсных высокоскоростных струй жидкости для обезвреживания взрывоопасных предметов (ВОП) в различных условиях, в том числе и под водой. Теоретические исследования выполнены численно с использованием описанных выше моделей ультраструй. Экспериментальные исследования подтвердили принципиальную возможность применения ультраструй, генерируемых пороховой ГП, для обезвреживания ВОП.

В настоящей работе рассматривается распространение затопленной ультраструи, истекающей из сопла ИВ с пороховым приводом, и взаимодействие ее с плоской жесткой преградой. Построена математическая модель процесса, приведены результаты расчетов для конкретной конструкции порохового ИВ. Расчеты выполнены методом Годунова в подвижных сетках с учетом кавитации. Показано, что в жидкости формируется импульсная затопленная струя, радиус которой практически равен выходному радиусу сопла ИВ, а максимальное давление на преграду близко к максимальному скоростному напору струи. Установлено, что основные параметры ИВ можно рассчитывать, предполагая, что выстрел происходит в воздухе, а не в жидкости. Показано, что влияние вязкости жидкости незначительно сказывается на гидродинамических параметрах импульсных затопленных струй при расстояниях до преграды порядка 10 – 20 радиусов струи.

**Постановка задачи.** Пусть пороховой ИВ, конструкция которого описана в [3, 12], погружен в объем, заполненный водой (рис. 1). В жидкости на некотором расстоянии от торца установки перпендикулярно ее оси расположена плоская жесткая преграда. Сопло ИВ закрыто тонкой диафрагмой от проникания в него внешней жидкости. В начальный момент пороховой заряд поджигается. Пороховые газы вытесняют воду из сопла ИВ, и она истекает в виде затопленной импульсной струи жидкости. Необходимо оценить действие этой струи на преграду.

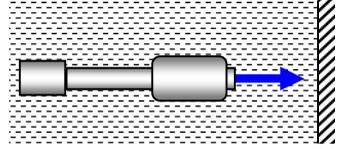


Рисунок 1 – Схема формирования струи.

Как обычно для таких процессов жидкость считаем идеальной и сжимаемой, вязкость и теплопроводность не учитываем [1, 3]. Влиянием воздуха в сопле и диафрагмы в выходном сечении пренебрегаем. Движение жидкости внутри ИВ с достаточной точностью описывается в квазиодномерном приближении [1, 3]. Течение импульсной затопленной струи жидкости рассматривается в осесимметричной постановке. Эти особенности течения учтем при построении математической модели и конечно-разностной сетки.

В принятой постановке квазиодномерное изэнтропическое течение идеальной сжимаемой жидкости в пороховом ИВ описывается системой уравнений нестационарной газовой динамики при следующих начальных и граничных условиях [3,12]

$$\frac{\partial \rho F}{\partial t} + \frac{\partial \rho u F}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u^2}{2} + \frac{n}{n-1} \frac{p+B}{\rho} \right) = 0, \quad (1)$$

$$p = B \left[ \left( \rho / \rho_0 \right)^n - 1 \right],$$

$$u(0, x) = 0, \quad p(0, x) = 0, \quad 0 \leq x \leq L; \quad (2)$$

$$p(t, x_g) = p_g, \quad u(t, x_g) = u_g. \quad (3)$$

Здесь  $t$  – время;  $x$  – координата;  $u$ ,  $p$  и  $\rho$  – скорость, давление и плотность;  $F$  – площадь поперечного сечения сопла;  $L$  – длина водяного заряда;  $x_g$  – координата контактной поверхности;  $p_g$  и  $u_g$  – давление и скорость пороховых газов на контактной поверхности. Начало координат для этой области совмещено с начальным положением контактной поверхности. На срезе сопла никаких граничных условий не ставилось, а совместно решалась задача движения жидкости внутри и снаружи установки.

Распространение затопленной струи жидкости и взаимодействие ее с преградой описывается уравнениями газовой динамики со следующими начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial r\mathbf{a}}{\partial t} + \frac{\partial r\mathbf{b}}{\partial x} + \frac{\partial r\mathbf{c}}{\partial r} = \mathbf{f}; \quad (4)$$

$$\mathbf{a} = \{\rho, \rho u, \rho v\}, \quad \mathbf{b} = \{\rho u, p + \rho u^2, \rho uv\},$$

$$\mathbf{c} = \{\rho v, \rho uv, p + \rho v^2\}, \quad \mathbf{f} = \{0, 0, p\};$$

$$u(0, x, r) = 0, \quad v(0, x, r) = 0, \quad p(0, x, r) = p_a; \quad 0 < x \leq L_T, \quad r > 0; \quad (5)$$

$$u(t, x, r) = 0, \quad v(t, x, r) = 0, \quad p(t, x, r) = p_a; \quad 0 \leq x \leq L_T, \quad r \rightarrow \infty; \quad (6)$$

$$u(t, 0, R_s) = 0, \quad r > R_s; \quad u(t, L_T, r) = 0, \quad r > 0. \quad (7)$$

Здесь  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{f}$  – векторы;  $x$  и  $r$  – осевая и радиальная координаты;  $u$  и  $v$  – осевая и радиальная компоненты скорости;  $p_a$  – начальное давление жидкости,  $L_T$  – расстояние от выходного сечения сопла ИВ до преграды,  $R_s$  – радиус выходного сечения сопла ИВ. Начало цилиндрической системы координат для этой области располагалось на оси ИВ в выходном сечении.

Горение пороха рассчитывалось в квазистационарном приближении при допущениях, характерных для задач внутренней баллистики в артиллерии [13]: порох воспламеняется мгновенно и горит адиабатически параллельными слоями по геометрическому закону; химический состав продуктов сгорания постоянный, их параметры одинаковые по объему; параметры состояния пороховых газов связаны упрощенным уравнением Ван-дер-Ваальса, учитывающим только собственный объем молекул.

Система уравнений и начальные условия, описывающие квазистационарное горение пороха следующие:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_1 p_g}{h_1}, \quad Q_g = \frac{dm_g}{dt} = m_{p0} \sigma(z) \frac{dz}{dt};$$

$$\frac{1}{k-1} \frac{d(p_g V_g)}{dt} + p_g F u_g = q Q_g; \quad (8)$$

$$\frac{dV_g}{dt} = Q_g (1/\rho_p - \alpha) + u_g F, \quad u_g = \frac{dx_g}{dt};$$

$$z = 0, \quad V_g = V_{g0}, \quad m_g = m_{g0}, \quad p_g = p_{g0}, \quad x_g = -L.$$

Здесь  $h_1$  – половина толщины порохового зерна;  $z$  – толщина сгоревшего слоя, отнесенная к  $h_1$ ;  $u_1$  – постоянная скорости горения;  $p_g$  – давление пороховых газов;  $Q_g$  – скорость прихода пороховых газов;  $\sigma(z)$  – функция, зависящая от формы порохового зерна (для зерна сферической формы  $\sigma(z) = 3(1 - 2z + z^2)$  [13]);  $\alpha$  – поправка на собственный объем молекул;  $m_g$  – масса газа;  $m_{p0}$  – начальная масса пороха;  $k$  – показатель адиабаты;  $q$  и  $\rho_p$

– удельная теплота сгорания и плотность пороха;  $V_g$  – объем пороховых газов;  $V_{g0}$ ,  $m_{g0}$ ,  $p_{g0}$  – параметры газа после срабатывания воспламенителя.

**Особенности расчетов.** Поставленная задача решалась численно конечно-разностным методом Годунова [14], обобщенным на случай нестационарных квазиодномерных и осесимметричных течений жидкости [1, 3, 12]. Течение рассчитывалось с момента воспламенения пороха до окончания вытеснения жидкости из ИВ. Расчетная сетка состояла из двух частей: подвижной и регулярной внутри установки и неподвижной прямоугольной в наружном объеме жидкости. Сетка внутри ИВ перестраивалась по мере движения контактной поверхности. Определялась координата  $x^g$  контактной поверхности через шаг по времени и рассчитывался новый шаг сетки

$$h^r = (L - x^g) / N,$$

где  $N$  – число расчетных ячеек в ИВ. При истечении струи объем жидкости внутри установки и, соответственно, шаг сетки уменьшались. Когда шаг сетки становился меньше заданного, производилось укрупнение ячеек. Две соседние ячейки объединялись в одну; параметры в объединенной ячейке определялись как среднее с весом. В расчетах использовались сетки с числом ячеек  $N = 64, 128$  и  $256$ .

Распространение и взаимодействие импульсной затопленной струи жидкости с преградой рассчитывалось на прямоугольной сетке. По оси  $x$  шаг сетки  $h_x$  задавался постоянным, равным шагу по радиусу  $h_{rk}$  в коллиматоре ИВ. Использовались сетки с шагом  $h_x = R_s / 8, R_s / 12, R_s / 16$ . Детализация течения проводилась на мелких сетках, а длительные процессы рассчитывались на более крупных сетках. Шаг сетки по радиусу  $h_r$  был переменным. При  $r \leq 2R_s$  он равнялся шагу  $h_x$ , и ячейки здесь были квадратными. При больших расстояниях ( $r > 2R_s$ ) шаг  $h_r$  увеличивался по мере удаления от оси струи по закону арифметической прогрессии. Приращение шага  $h_r$  выбиралось в пределах 10 – 20 %, чтобы размеры соседних ячеек отличались незначительно, и эта разница не влияла на точность расчетов. Число ячеек по оси  $x$  определялось расстоянием до преграды, а число ячеек по радиусу доходило до 100.

Границы расчетной области, на которых ставились условия на бесконечности, удалялись на такое расстояние, чтобы их влияние не сказывалось в центре преграды за расчетное время процесса. При расчете длительных процессов использовались так называемые «неотражающие» условия [15], которые слабо влияют на параметры течения вблизи преграды. В расчетах применялось условие «протекания», соответствующее равенству текущих параметров в фиктивной (за пределами границы расчетной области) и граничной ячейках, которое меньше всего влияло на параметры течения [3]. Но даже для

такого «неотражающего» условия границы расчетной области все равно приходилось удалять на расстояние  $L_G/4$ , где  $L_G = a_0 t_p/2$  – расстояние, определяемое длительностью процесс  $t_p$  и скоростью распространения возмущений  $a_0 \approx 1500$  м/с. Большая длительность процесса (около 4 мс) и особенности выстрела ИВ приводят к величине  $L_G \approx 3$  м. Чтобы покрыть такую расчетную область использовались, как отмечено выше, неравномерные сетки с увеличивающимся шагом при удалении от оси струи.

Для стыковки разных расчетных сеток в том конце коллиматора, которым заканчивалось сопло ИВ, вводился переходной цилиндрический участок с неподвижной прямоугольной сеткой. На этом участке течение жидкости рассматривалось в осесимметричной постановке. Справа по торцу коллиматора эта область граничила с внешним объемом жидкости, в котором движение рассматривалось в осесимметричной постановке. Слева от сечения, проходящего по середине коллиматора, переходная область стыковалась с объемом жидкости внутри ИВ, в котором течение считалось квазиодномерным. Длина переходной области выбиралась равной двум радиусам коллиматора, так как на таком расстоянии от его конца течение становилось практически одномерным [3].

Параметры на правой границе переходной области рассчитывались по единому алгоритму как для обычных внутренних ячеек. Расчет на левой границе переходной области производился по особому алгоритму. Распад произвольного разрыва на этой границе рассчитывался для каждой отдельной ячейки справа и единственной ячейки слева от границы. «Большие величины», необходимые для расчета параметров течения, определялись из равенства потоков массы и импульса в этом сечении

$$\mathbf{F}_L = \frac{\sum \mathbf{F}_{P_{j+1/2}} S_{j+1/2}}{\sum S_{j+1/2}}, \quad \mathbf{F} = \{RU, RU^2, P\},$$

где  $\mathbf{F}_L$  и  $\mathbf{F}_P$  – значения вектора «больших величин» слева и справа от границы;  $R, U, P$  – плотность, осевая скорость и давление на границе после распада произвольного разрыва;  $S_{j+1/2} = \pi(r_{j+1}^2 - r_j^2)$  – площадь кольца;  $r_j$  – радиус границы кольца с номером  $j$ .

При расчете вблизи оси симметрии использовалась улучшенная аппроксимация уравнений, опробованная при решении модельной задачи [16]. По мнению ряда авторов, разностная схема, построенная на основе однородных уравнений (5), дает менее точные результаты, чем схема, построенная на неоднородных уравнениях следующего вида

$$\frac{\partial \mathbf{a}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial r} = \mathbf{f}, \quad \mathbf{f} = -\frac{1}{r} \{ \rho v, \rho uv, \rho v^2 \}. \quad (10)$$

В отличие от системы (5) уравнения (10) все неоднородные, и соответствующая разностная схема является полностью неконсервативной. Все законы сохранения в разностной форме для такой схемы выполняются приближенно. Этот недостаток схемы обычно игнорируют, если речь идет о точности расчетов около оси симметрии. Расчеты, проведенные на модельной задаче [16], показали, что дисбаланс массы и энергии для двух видов аппроксимации был одного порядка и не превышал 0,5 %.

**Анализ результатов расчетов.** Ниже приведены некоторые результаты расчетов для экспериментального порохового ИВ со следующими параметрами [12]: радиус ствола 20 мм, радиус сопла и коллиматора 10 мм, длина ствола 400 мм, длина сопла вместе с коллиматором 156 мм, объем камеры сгорания 135 см<sup>3</sup>, коническое сопло с углом схождения 13°, масса водяного заряда 600 г. Использовался порох с зерном сферической формы массой 100 г с такими данными:  $h_1 = 0,53$  мм;  $u_1 = 0,91$  м/(с·ГПа);  $k = 1,22$ ;  $q = 3,806$  МДж/кг;  $\rho_p = 1,6$  г/см<sup>3</sup>;  $\alpha = 1,02$  дм<sup>3</sup>/кг. Давление пороховых газов  $p_{g0}$  после срабатывания воспламенителя составляло 5 МПа. Начальный объем и масса газов определялись по объему камеры сгорания  $V_k$ , массе пороха и давлению газов после срабатывания воспламенителя:

$$V_{g0} = V_k - m_{p0} / \rho_p, \quad m_{g0} = \frac{p_{g0} V_{g0}}{(k-1)q}.$$

Начальное давление воды равнялось 1 МПа, что соответствовало глубине погружения установки на 100 м.

На рис. 2 приведена зависимость давления в центре преграды от времени для разных расстояний до преграды  $L_T = 4, 8, 12$  и  $16 R_s$  (кривые 1, 2, 3 и 4, соответственно). На рис. 3 представлены зависимости от времени давления пороховых газов (кривая 1), давления воды у входа в сопло в сечении  $x = 0$ , (кривая 2), давления в центре преграды (кривая 3) и скорости истечения струи из сопла (кривая 4) для расстояния до преграды, равного  $8 R_s$ .

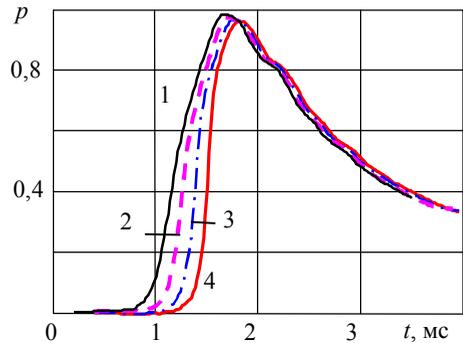


Рисунок 2 – Результаты расчётного исследования.

Из графиков видно, что характер изменения давления на преграде не зависит от расстояния до нее. Максимальное давление на преграде достигает 245 МПа на момент времени  $t = 1,75$  мс. Максимальное давление пороховых

газов составляет 338 МПа и практически равно максимальному давлению воды в сопле (около 326 МПа). Максимальная скорость истечения достигает 762 м/с в момент времени  $t = 1,64$  мс. Динамическое давление струи при

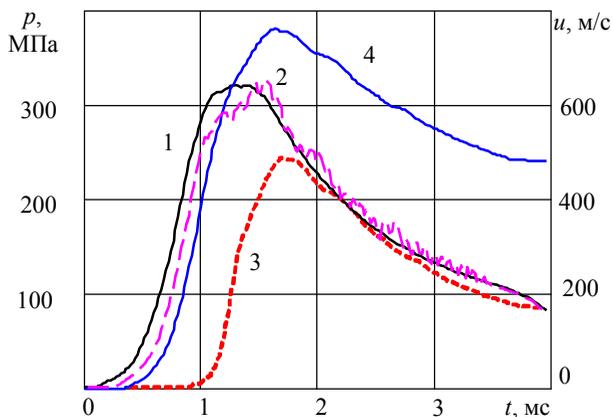


Рисунок 3 – Изменение давления в центре преграды.

такой скорости, рассчитанное по *уравнению Бернулли*, составляет 290 МПа для несжимаемой и 306 МПа для сжимаемой жидкости, что различается примерно на 5%. Коэффициент превышения давления  $k_r$  для порохового ИВ (то есть, отношение максимального динамического давления струи к максимальному давлению внутри установки [1]) достигает 0,9.

Предельное значение этого параметра для ИВ разных конструкций не превышает единицы, если выстрел ИВ близок к квазистационарному [1]. Для данной конструкции ИВ отношение максимального давления струи на преграду к максимальному давлению внутри установки меньше  $k_r$  и достигает 0,73. Таким образом, импульсная струя жидкости порохового ИВ достаточно эффективно воздействует на преграду, даже если преграда погружена в жидкость.

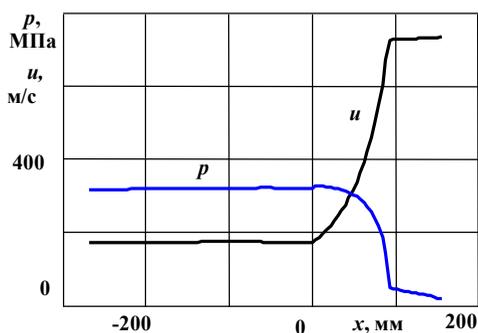


Рисунок 4 – Параметры истечения жидкости при минимальном расходе.

На рис. 4 приведены распределения давления и скорости по длине установки на момент времени  $t = 2$  мс, когда давление внутри ИВ и скорость истечения струи близки к максимальным значениям (кривые помечены соответствующими индексами).

Видно, что в стволе давление и скорость практически постоянные (давление приблизительно равно 320 МПа, а скорость – 170 м/с). В сопле, которое начинается с координаты  $x = 0$ , скорость жидкости быстро возрастает до значения 725 м/с, а давление уменьшается до величины 40 МПа у входа в коллиматор. В коллиматоре (цилиндрическом участке для стабилизации параметров импульсной струи) давление линейно уменьшается до 10 МПа, а скорость возрастает незначительно до 735 м/с. Распределения этих параметров наглядно показывают стабилизирующее действие коллиматора, которое заключается в том, что формируется участок струи, равный длине коллиматора, скорость жидкости на котором примерно одинаковая. Это приводит к большей устойчивости струи и большей эффективности ее воздействия на преграду.

Для порохового ИВ равенство потоков массы через поперечные сечения установки хорошо выполняется практически в течение всего выстрела. Например, на момент достижения максимальной скорости истечения струи отношение секундных потоков в коллиматоре и в стволе  $(u_s \rho_s F_s) / (u_c \rho_c F_c) = 0,997$ . Без учета сжимаемости жидкости это отношение составляет около 1,08. Слабая зависимость расхода от сжимаемости жидкости связана с относительно небольшими давлениями внутри установки (около 330 МПа), при которых плотность воды возрастает всего на 10 %.

Наружная жидкость практически не влияет на параметры внутренней баллистики порохового ИВ. Расчетная скорость истечения струи ИВ в воздухе на 0,7 % отличается от скорости истечения в воде. Слабая зависимость параметров ИВ от условий истечения связана с большими давлениями внутри установки по сравнению с окружающим пространством.

На рис. 5 представлены поля давлений и скоростей на момент времени  $t = 1,75$  мс, когда давление на преграде, отстоящей на  $8R_s$  от ИВ, максимальное. Координаты на графиках отнесены к выходному радиусу сопла  $R_s$ , давление дано возле изобар в МПа, направление и величина скорости изображены соответствующими векторами.

Из графиков следует, что зона повышенного давления локализована в центре преграды в небольшой области размером около  $2R_s$ . В толще воды формируется четко выраженная затопленная струя, радиус которой практически равен радиусу выходного сечения сопла.

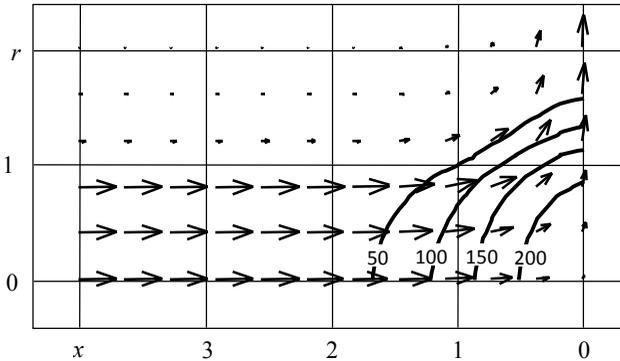


Рисунок 5 – Поле давлений и скоростей.

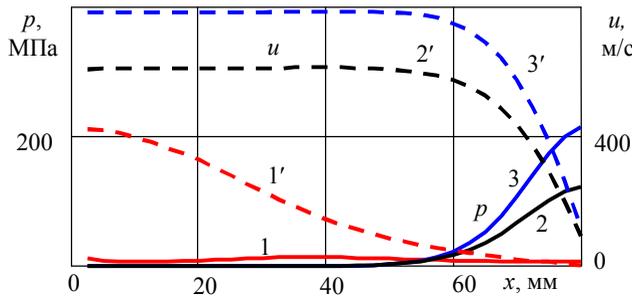


Рисунок 6 – Распределения давления и скорости вдоль оси струи.

На рис. 6 приведено распределение давления (кривые 1, 2 и 3) и скорости (кривые 1', 2' и 3') вдоль оси затопленной струи на моменты времени  $t = 1, 2$  и 3 мс. Из графиков видно, что когда струя достигает преграды, то изменение ее параметров происходит в малой зоне возле преграды. Вдоль струи скорость и давление практически постоянные. Скорость близка к максимальному значению на этот момент времени, а давление незначительно превышает давление окружающей среды. Существенные изменения параметров течения струи наблюдаются только вблизи преграды.

По методике, описанной в работе [16], оценено влияние вязкости жидкости на гидродинамические параметры импульсной струи порохового ИВ. Установлено, что для данной конструкции порохового ИВ вязкость жидкости несущественно влияет на гидродинамические параметры ультраструи. Максимальное давление струи на преграду для вязкой жидкости на 5 – 7% меньше, чем для идеальной. Поэтому с достаточной для практических целей точностью расчет параметров порохового ИВ можно проводить в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости. И только для уточнения результатов рас-

четов можно использовать более сложные модели вязкой и сжимаемой жидкости

Способность импульсной затопленной струи жидкости оказывать большое силовое давление на объект воздействия может быть использовано при обезвреживании ВОП под водой, как отмечается в работах [10, 11].

Дальнейшие исследования в этом направлении должны быть направлены на детализацию картины взаимодействия ультраструи с преградой, учет деформации и разрушения преграды, установление критериев для оценки эффективности порохового ИВ и дальнейшей оптимизации его параметров на основании установленных критериев.

**Заключение.** В результате выполненных теоретических исследований показано, что импульсная струя порохового ИВ может эффективно воздействовать на преграду, расположенную под водой на расстоянии, равном нескольким радиусам струи. В жидкости формируется импульсная затопленная струя с радиусом, равным радиусу выходного сечения сопла. Внешние условия незначительно влияют на параметры струи водомета. Основные параметры порохового ИВ можно рассчитывать без учета условий истечения струи.

**Список литературы:** 1. *Атанов Г. А.* Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. – К.: Вища школа, 1987. – 155 с. 2. *Vijay M.M.* Pulsed jets: fundamentals and applications. – Proc. of the 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology. New Delhi, India, February 3–5, 1998. – P. 610-627. 3. *Семко А.Н.* Импульсные струи жидкости высокого давления. – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с. 4. *Cooley W., Clipp L.* High-pressure water jets for undersea rock excavation // J. Eng. Ind. (ASME). – 1970. – V.5, № 281. – P. 281 – 287. 5. *Атанов Г.А., Семко А.Н.* Impulsive water jet under water // Proc. 8th American Water Jet Conf.- Houston (Texas). August 26 – 29. – 1995. – Paper 62. – P. 845 – 853. 6. *Атанов Г. А., Семко А. Н.* Импульсная струя жидкости под водой // Теорет. и прикл. механика. – 1999. Вып. 29. – С. 169 – 174. 7. *Атанов Г.А., Семко А.Н.* Расчет импульсной струи пороховой гидропушки под водой // Известия РАН, Механика жидкости и газа. – 2002. – №2. – С. 31 – 38. 8. *Атанов Г. А., Семко А. Н.* Numerical Analysis of the Jet Flows of Compressible Water // Proc. of The International Summer Scientific School «High Speed Hydrodynamics» (HSH-2004, June 2004). – Cheboksary, Russia, 2004. – P. 39 – 45. 9. *Семко А.Н.* Особенности взаимодействия импульсных затопленных струй с преградой // Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки. – 2007, № 1. – С. 147 – 155. 10. *Семко А.Н., Бигвава В.А., Кочергин А.В., Козак Т.Н.* Исследование возможности обезвреживания взрывоопасных предметов под водой воздействием ультраструи гидропушки // Науковий вісник ХДМУ – Херсон, 2010. – №1(2). – С. 217-232. 11. *Семко А.Н., Бигвава В.А.* Повышение экологической безопасности при гуманитарном разминировании при помощи импульсных струй жидкости // Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки. – 2009, № 2. – С. 388 – 397. 12. *Семко А. Н.* Внутренняя баллистика импульсного водомета с пороховым приводом // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41, № 3. С. 118 – 124. 13. Проектирование ракетных и ствольных систем / Под ред. Орлова Б. В. – М.: Машиностроение. – 1974. – 382 с. 14. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. Годунова С.К. М.: Наука, 1976. – 400 с. 15. *Ильгамов М. А.* О неотражающих условиях на границах расчетной области // Динамика оболочек в потоке. Тр. семинара Казанского физ.-тех. ин-та. – 1985. – Вып. 28. – С. 4 – 76. 16. *Семко А.Н.* Выход ударной волны из цилиндрической трубы в открытый объем, заполненный жидкостью // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1998. Вып. 8. – С. 169 – 172. 16. *Веремеев С.А., Семко А.Н.* Взаимодействие импульсной затопленной струи жидкости с преградой // Прикладная гидромеханика. – 2008. – Т. 10 (82). № 1. – С. 3 – 9.

Поступила в редакцию 05.09.2011