

А.Н. СЕМКО, д-р техн. наук, проф., ДонНУ, Донецк;
Ю.В. ЛОКТЮШИНА, аспирант, ДонНУ, Донецк

О ВЛИЯНИИ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ ГИДРОПУШКИ

Оцінюється вплив густини рідини на параметри гідрогармати. Дослідження виконано в рамках моделі ідеальної нестисливої рідини для квазіоднорізного наближення. Отримані розподіли швидкості та тиску рідини по довжині гідрогармати. Розраховані параметри, що характеризують ефективність гідрогармати (максимальна швидкість струменя, максимальний тиск в соплі, тиск гальмування, імпульс високошвидкісної ділянки струменя, коефіцієнт перевищення тиску, коефіцієнт перетворення енергії), які порівнюються із відповідними значеннями для водяного заряду.

Оценивается влияние плотности жидкости на параметры гидропушки. Исследование выполнено в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости для квазиодномерного приближения. Получены распределения скорости и давления жидкости по длине гидропушки. Рассчитаны параметры, характеризующие эффективность гидропушки (максимальная скорость струи, максимальное давление в сопле, давление торможения, импульс высокоскоростного участка струи, коэффициент превышения давления, коэффициент преобразования энергии), которые сравниваются с соответствующими значениями для водяного заряда.

In this paper evaluated the effect of liquid density on the parameters hydrogun. The study was conducted in the model of ideal incompressible fluid to quasi approximation. The dependence of the velocity distribution and pressure along the length of hydrogun are received. The parameters which characterize the efficiency of hydrogun (maximum speed of the jet, the maximum pressure in the nozzle, brake pressure, the impulse of high-speed segment of the jet, the coefficient of excess pressure, the coefficient of energy conversion), which are compared with the corresponding values for the water charge are calculated.

Введение. Импульсные высокоскоростные струи жидкости нашли широкое применение в различных технологических процессах и отраслях промышленности, таких как: обработка материалов, разрушение горных пород, очистка поверхностей, тушение газовых факелов, разминирование взрывоопасных предметов и др. Для получения таких струй используют импульсный водомет (ИВ) и гидропушку (ГП), в которых реализуются экструзионный и инерционный принципы ускорения жидкости [1, 2]. Разный механизм ускорения жидкости в этих установках существенно влияет на основные гидродинамические параметры ультраструй: максимальную скорость струи, ее компактность, дальность и коэффициент превышения давления. Зависимость этих параметров от формы сопла и других конструктивных факторов ГП достаточно подробно исследована в [3]. В этой работе сформулированы критерии для оценки эффективности ГП и предложена методика оптимизации параметров ГП путем изменения ее конструкции.

Одним из существенных недостатков гидропушки с поршневым приводом является небольшая дальность, которая обусловлена особенностью

истечения импульсной струи жидкости из сопла ГП. Как правило, струя ГП начинает истекать с максимальной скоростью, которая затем быстро уменьшается. Это приводит к возникновению больших продольных градиентов скорости в струе, появлению растягивающих напряжений, приводящих к возникновению кавитации и последующему разрушению струи, что резко снижает ее дальнобойность. И если влияние геометрических факторов на параметры ГП в какой-то мере изучено, то влияние свойств рабочей жидкости (плотность, сжимаемость, вязкость) на параметры ГП практически не рассматривалось.

В качестве рабочей жидкости для ГП обычно применяется вода, как наиболее доступный ресурс. Для увеличения плотности рабочей жидкости применяют вещества, хорошо растворимые в воде: глину, мел, известняк, соль. Молотый мел и известняк применяются для приготовления безглинистых растворов. В качестве утяжелителей применяются барит и железистые утяжелители (гематит, магнетит) [4]. Глинистый раствор приготавливают из порошкообразных или комовых глин в специальных устройствах. Для придания требуемых свойств в глинистый раствор добавляют различные химические реагенты, тяжёлые минеральные порошки (утяжелители), нефть и др. Глинистый раствор в движении обладает свойствами жидкости, в покое – твёрдого тела [5].

В работе [6] при оценке влияния вязкости жидкости на параметры ГП методом исчезающей вязкости показано хорошее совпадение результатов расчетов в точной осесимметричной постановке для вязкой жидкости и приближенной квазиодномерной для идеальной жидкости, что свидетельствует о незначительном влиянии вязкости жидкости на параметры ГП.

В работе [7] в качестве критерия для оценки влияния сжимаемости жидкости на параметры ГП предложено число Маха, рассчитанное по максимальной скорости жидкости. Исследования показали, что при небольших числах Маха ($M < 1$) сжимаемостью жидкости можно пренебречь. При больших числах Маха пренебрежение сжимаемостью жидкости приводит к большим погрешностям. Например, при числе Маха $M = 2$ максимальные скорости для несжимаемой и сжимаемой жидкости отличаются на 34%. Однако, при существенном расхождении результатов качественный характер процесса для моделей сжимаемой и несжимаемой жидкости подобный. Поэтому предварительные расчеты параметров ГП можно проводить в упрощенной постановке без учета сжимаемости жидкости.

В настоящей работе в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости для квазиодномерного приближения проведена оценка влияния плотности жидкости на параметры ГП. Получены распределения скорости и давления жидкости по длине ГП на разные моменты времени. Рассчитаны параметры, характеризующие эффективность гидропушки (максимальная скорость струи, максимальное давление в сопле, давление торможения, импульс высокоскоростного участка струи, коэффициент превышения давления, коэффи-

циент преобразования энергии), которые сравниваются с соответствующими значениями для водяного заряда.

Математическая модель гидропушки. На рис. 1 приведена схема поршневой ГП безударного действия. Поршень 2 вместе с водяным зарядом 3 предварительно разгоняется сжатым газом 1 в цилиндрическом стволе 4 до некоторой скорости, с которой жидкость начинает втекать в сужающееся сопло 5, когда передний фронт водяного заряда достигает входа в сопло. При этом происходит ускорение жидкости в окрестности переднего фронта и торможение остальной массы жидкости вместе поршнем. Энергия поршня и прилегающей к нему жидкости передается передним частицам жидкости, скорость которых существенно возрастает.

Движение жидкости в ГП рассматриваем в квазиодномерной постановке, вязкостью и сжимаемостью жидкости пренебрегаем, деформации корпуса не учитываем, передний фронт жидкости считаем плоским, давлением воздуха в сопле пренебрегаем.

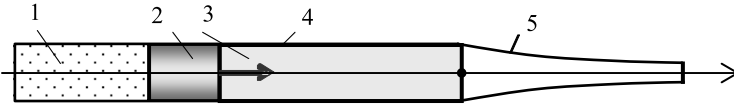


Рисунок 1 – Гидропушка.

1 – ресивер; 2 – поршень; 3 – вода; 4 – ствол; 5 – сопло.

В принятой постановке уравнения нестационарного движения идеальной несжимаемой жидкости в ГП можно записать в виде:

$$\frac{\partial u F}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) = 0. \quad (2)$$

Здесь u , p и ρ – скорость, давление и плотность, x и t – координата и время, $F = F(x)$ – площадь поперечного сечения сопла, которая является заданной функцией координаты x [2]. Начало координат размещено у входа в сопло, где в начальный момент находится передний фронт жидкости.

Начальные и граничные условия для ГП следующие

$$u(0, x) = u_0, \quad p(0, x) = 0, \quad -L \leq x \leq 0, \quad x_R(0) = -L, \\ x_F(0) = 0, \quad u(t, x_R) = u_R, \quad p(t, x_F) = 0,$$

где u_0 – начальная скорость воды и поршня; x_R и x_F – координаты заднего и переднего фронта водяного заряда; u_R – скорость заднего фронта; L – длина водяного заряда; индексами « R » и « F » отмечены параметры на зад-

нем и переднем фронте водяного заряда.

Разобьем выстрел ГП на две стадии: втекание жидкости в сужающееся сопло и истечение импульсной струи из сопла.

Втекание. Стадия втекания, с которой начинается выстрел ГП, заканчивается тогда, когда передний фронт жидкости достигает среза сопла. Запишем балансы массы и энергии на стадии втекания:

$$m = x_R \rho F_R + \rho \int_0^{x_F} F(x) dx, \quad (3)$$

$$\frac{(m + m_p) u_0^2}{2} = \left[m_p - x_R \rho F_R \right] \frac{u_R^2}{2} + \int_0^{x_F} \frac{\rho u^2}{2} F(x) dx. \quad (4)$$

Здесь m_p и m – масса поршня и заряда жидкости; F – площадь поперечного сечения сопла; u – скорость жидкости.

К уравнениям течения жидкости присоединим уравнение движения поршня с начальными условиями

$$m_p \dot{u}_p = -p_R F_R, \quad \dot{x}_p = u_p, \quad u_p(0) = u_0, \quad x_p(0) = -L,$$

где $u_p = u_R$ – скорость поршня; $x_p = x_R$ – координата поршня; p_R – давление на поршень; точка обозначает производную по времени.

Проинтегрируем уравнение неразрывности (1) и запишем в виде:

$$u(t, x) F(x) = u_R F_R. \quad (5)$$

Из уравнений (3) и (4) выразим координату и скорость заднего фронта, как функции координаты переднего фронта

$$x_R = \int_0^{x_F} \frac{F(x)}{F_R} dx - \frac{m}{\rho F_R}, \quad (3')$$

$$u_R = \sqrt{\frac{(m + m_p) u_0^2}{m_p - x_R \rho F_R + \rho F_R^2 \int_0^{x_F} \frac{dx}{F(x)}}}. \quad (4')$$

Из выражения (5) получим распределение скорости по длине водяного заряда

$$u(t, x) = u_R \frac{F_R}{F(x)}. \quad (5')$$

Исключим из уравнения (2) скорость при помощи выражения (5')

$$\frac{F_R}{F(x)} \dot{u}_R + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_R^2}{2} \frac{F_R^2}{F^2(x)} + \frac{p}{\rho} \right) = 0. \quad (6)$$

Принтегрировав это уравнение по координате от x_R до текущей координаты x и учтя, что $p_R = -m_p \dot{u}_R / F_R$, получим распределение давления по длине водяного заряда

$$p(t, x) = -\dot{u}_R \left(\frac{m_p}{F_R} + \rho F_R \int_{x_R}^x \frac{dx}{F(x)} \right) - \frac{\rho u_R^2}{2} \left(\frac{F_R^2}{F^2(x)} - 1 \right), \quad (7)$$

Ускорение заднего фронта жидкости \dot{u}_R найдем из выражения (7) с учетом граничного условия на свободной поверхности ($p(t, x_F) = 0$)

$$\dot{u}_R = -\frac{\rho u_R^2}{2} \left(\frac{F_R^2}{F^2(x)} - 1 \right) \cdot \left(\frac{m_p}{F_R} + \rho F_R \int_{x_R}^x \frac{dx}{F(x)} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Приведенные формулы полностью описывают втекание жидкости в сопло ГП и дают распределение скорости и давления по длине водяного заряда на разные моменты времени или положения переднего фронта.

Истечение. При истечении струи из сопла масса и энергия жидкости в ГП уменьшаются. Пусть истечение струи началось в момент времени t_0 . К моменту времени $t \geq t_0$ из сопла вытечет масса жидкости Δm и будет унесена энергия ΔE :

$$\Delta m = \rho F_s \int_{t_0}^t u_s(t') dt', \quad \Delta E = \frac{1}{2} \rho F_s \int_{t_0}^t u_s^3(t') dt'.$$

Здесь индексом «s» отмечены параметры на срезе сопла. Поскольку объем жидкости больше объема сопла, то на начало истечения поршень находится в стволе ($x_R(t_0) < 0$).

Запишем баланс энергии на этот момент времени

$$\frac{(m + m_p) u_0^2}{2} = \left[m_p - x_R \rho F_R \right] \frac{u_R^2}{2} + \int_0^{x_F} \frac{\rho F u(x)^2}{2} dx + \frac{\rho F_s}{2} \int_{t_0}^t u_s^3(t') dt'. \quad (9)$$

Преобразуем уравнение баланса энергии (9) с учетом уравнения неразрывности $F_s u_s = F_R u_R = F(x) u(x)$ к виду

$$(m + m_p) u_0^2 = \left[m_p - x_R \rho F_R + \rho F_R^2 \int_0^{x_F} \frac{dx}{F(x)} \right] u_R^2 + \frac{\rho F_R^3}{F_s^2} \int_{t_0}^t u_R^3(t') dt'. \quad (10)$$

Продифференцировав уравнение (10) по времени и учтя, что $\dot{u}_R = u_R \frac{du_R}{dx_R}$, после преобразований получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными

$$\left[m_p - x_R \rho F_R + \rho F_R^2 \int_0^{x_F} \frac{dx}{F(x)} \right] \frac{du_R}{dx_R} + \left(\frac{F_R^2}{F_S^2} - 1 \right) \frac{\rho F_R u_R}{2} = 0. \quad (11)$$

Обозначив $k_1 = m_p + \rho F_R^2 \int_0^{x_F} \frac{dx}{F(x)}$, $k_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_R^2}{F_S^2} - 1 \right)$ и проинтегрировав

уравнение (11) с учетом начальных условий на момент истечения, найдем зависимость скорости заднего фронта жидкости (поршня) от его координаты:

$$u_R = u_{R0} \left(\frac{k_1 - x_R \rho F_R}{k_1 - x_{R0} \rho F_R} \right)^{k_2}, \quad (12)$$

где x_{R0} и u_{R0} – координата и скорость заднего фронта на начало истечения, которые рассчитываются по формулам (3') и (4').

Учитывая, что $u_R = \frac{dx_R}{dt}$, после подстановки в уравнение (12) и интегрирования, получим выражение, связывающее координату заднего фронта x_R со временем на стадии истечения

$$t = t_0 + \frac{(m + m_p) u_0^2}{(k_2 - 1) \rho F u_{R0}^3} \left[\left(\frac{k_1 - x_{R0} \rho F_R}{k_1 - x_R \rho F_R} \right)^{k_2 - 1} - 1 \right], \quad (13)$$

где учтено, что $k_1 - x_{R0} \rho F_R = (m + m_p) u_0^2 / u_{R0}^2$. Из выражений (12) и (13) следует явная зависимость x_R и u_R от времени:

$$x_R = \frac{k_1}{\rho F_R} - \frac{k_1 - x_{R0} \rho F_R}{\rho F_R \left[1 + \frac{(k_2 - 1) \rho F_R u_{R0}^3}{(m + m_p) u_0^2} (t - t_0) \right]^{\frac{1}{k_2 - 1}}}, \quad (14)$$

$$u_R = u_{R0} \left[1 + \frac{(k_2 - 1) \rho F_R u_{R0}^3}{(m + m_p) u_0^2} (t - t_0) \right]^{\frac{-k_2}{k_2 - 1}}. \quad (15)$$

Зависимость скорости истечения от времени определяется выражением:

$$u_S = u_R \frac{F_R}{F_S} = u_{R0} \left[1 + \frac{(k_2 - 1) \rho F_R u_{R0}^3}{(m + m_p) u_0^2} (t - t_0) \right]^{\frac{-k_2}{k_2 - 1}} \cdot \frac{F_R}{F_S}. \quad (16)$$

Скорость истечения в $k_F = F_R / F_S$ раз больше скорости поршня. Истечение струи ГП всегда начинается с максимальной скоростью, равной

$$u_{S\max} = u_{R0} k_F, \quad (17)$$

которая затем быстро уменьшается со временем.

Анализ результатов расчетов. Расчеты проводились для лабораторной ГП, размеры и параметры которой взяты из работы [8]: радиус ствола и входа в сопло $R_c = 33$ мм, радиус выхода из сопла $R_s = 5$ мм, длина сопла $L_s = 253$ мм, начальная скорость поршня и заряда жидкости $u_0 = 76$ м/с, масса поршня $m_p = 2,25$ кг, масса жидкости $m = 0,85$ кг. Профиль сопла экспоненциальный, который описывается уравнением $R(x) = R_c e^{-kx}$, где $k = (1/L_s) \ln(R_c/R_s)$. Начало координат совмещено с входом в сопло.

Для расчета параметров ГП использовались следующие вещества: безглинистый раствор, глинистый раствор, соляной раствор, вода, керосин и аммиак, значения плотности для которых приведены в следующей табл. 1.

Таблица 1

Значения плотностей рассчитываемых веществ.

№ п/п	Вид вещества	Плотность, кг/м ³
1	Безглинистый раствор	2500
2	Глинистый раствор	2000
3	Соляной раствор	1350
4	Вода	1000
5	Керосин	850
6	Аммиак	610

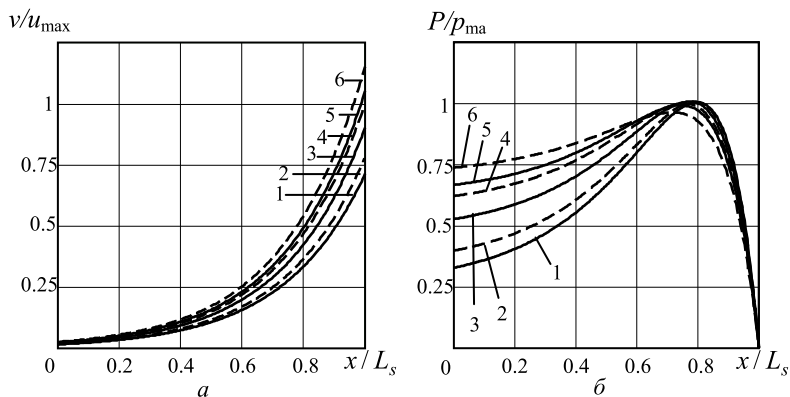


Рисунок 1 – распределение скорости a и давления b в стволе ГП в момент начала истечения. 1 – безглинистый раствор, 2 – глинистый раствор, 3 – соляной раствор, 4 – вода, 5 – керосин, 6 – аммиак.

На рис. 1 a и b приведено распределение скорости и давления в стволе ГП в момент начала истечения для исследуемых веществ. Величины на графиках представлены в безразмерном виде; в качестве масштабов выбраны

максимальная скорость воды u_{\max} , максимальное давление воды p_{\max} в стволе ГП, длина сопла L_s .

Для оценки влияния плотности жидкости на эффективность ГП были использованы следующие критерии: максимальная скорость струи u_{\max} , максимальное давление в сопле p_{\max} , давление торможения p_b , импульс высокоскоростного участка струи I , коэффициент превышения давления k_p , коэффициент преобразования энергии k_E [3]. Численные значения этих критериев для воды, которая являлась эталонной жидкостью, приведены в табл. 2:

Таблица 2

Значения главных параметров ГП для водяного заряда.

	u_{\max} , м/с	p_{\max} , МПа	p_b , МПа	I , кг·м/с	k_p	k_E
Вода	1497	410	1120	1,61	2,73	0,117

В табл. 3 приведены относительные критерии эффективности ГП для исследуемых жидкостей (критерии исследуемых жидкостей отнесены к соответствующим критериям эталонной жидкости).

Таблица 3

Значения главных параметров ГП для исследуемых веществ.

№ п/п	Вид вещества	u_{\max}	p_{\max}	p_b	I	k_p	k_E
1	Безглинистый раствор	0,71	1,004	1,28	1,28	1,27	0,92
2	Глинистый раствор	0,78	1,007	1,22	1,22	1,21	0,96
3	Соляной раствор	0,90	1,007	1,10	1,10	1,10	1
4	Вода	1,00	1,000	1,00	1,00	1,00	1
5	Керосин	1,05	0,992	0,94	0,94	0,95	0,99
6	Аммиак	1,15	0,963	0,81	0,82	0,85	0,95

При уменьшении плотности жидкости на 40% максимальная скорость струи увеличивается на 15%. При увеличении плотности на 150% скорость струи уменьшается на 30%. Максимальное давление в ГП для разных жидкостей отличается незначительно, всего на 4%. А вот локальные значения давления внутри установки для разных жидкостей различаются существенно. Например, на поршне давление для самой легкой жидкости (аммиак) почти в 2 раза больше, чем для самой тяжелой (безглинистый раствор) (кривые 6 и 1 на рис. 2). Чем тяжелее жидкость, тем меньше давление на поршне при примерно одинаковом максимальном давлении, которое наблюдается на расстоянии 0,2 от среза сопла.

Коэффициент превышения давления характеризует насколько макси-

мальное давление струи на жесткую преграду превышает максимальное давление внутри установки, при помощи которой получена струя. Находится как отношение максимального скоростного напора струи $\rho v^2/2$ к максимальному давлению внутри установки.

$$k_p = \rho v^2 / 2 p_{\max} .$$

Этот коэффициент максимальный для наибольшей плотности жидкости. При увеличении плотности на 150% k_p изменяется на 27%. При уменьшении плотности на 40% k_p уменьшается на 15%.

Коэффициент преобразования энергии $k_E = 1/E_0 \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} (\rho v^2 / 2) v F_s dt$ характеризует кинетическую энергию высокоскоростного участка струи. Чем больше этот коэффициент, тем эффективнее начальная энергия ГП преобразуется в энергию высокоскоростного участка, который определяет эффективность силового воздействия струи на объект обработки. Зависимость этого коэффициента от плотности жидкости аналогична соответствующей зависимости коэффициента превышения давления k_p – чем больше плотность, тем больше коэффициент. Изменение k_E не превышает 8%.

Таблица 4

Комплексная оценка эффективности ГП для разных рабочих жидкостей.

№ п/п	Вид вещества	Критерий						Σ
		\tilde{u}_{\max}	\tilde{p}_{\max}^{-1}	\tilde{p}_b	\tilde{I}	\tilde{k}_p	\tilde{k}_E	
1	Безглинистый раствор	2	96	100	100	100	92	550
2	Глинистый раствор	68	96	96	96	95	96	546
3	Соляной раствор	78	96	87	86	86	100	533
4	Вода	87	96	78	78	79	100	518
5	Керосин	91	97	74	73	75	99	509
6	Аммиак	100	100	66	64	67	95	491

Импульс высокоскоростного участка струи характеризует силовое воздействие струи на преграду. Максимальный в случае наибольшей плотности. Его изменение по отношению к водяному заряду равно 28%. В случае уменьшения плотности на 40% – уменьшение значения коэффициента равно 22%.

В табл. 4 представлены результаты комплексной оценки эффективности ГП в зависимости от плотности рабочих жидкостей. Оценка проводилась по 100-бальной шкале согласно методике [3] для следующих критериев: \tilde{u}_{\max} ,

\tilde{p}_{\max}^{-1} , \tilde{p}_b , \tilde{I} , \tilde{k}_p , \tilde{k}_E . Значения критериев в каждой категории отнесены к максимальному значению той категории, которое принято за 100 баллов (например, $\tilde{u}_{\max} = 100u_{\max} / \max(u_{\max})$). Наиболее эффективным считалось вещество с наибольшей суммой баллов.

По результатам расчетов видно, что из рассмотренных жидкостей, наилучшие показатели имеет безглинистый раствор, у которого максимальные значения коэффициента превышения давления, импульса высокоскоростного участка струи, давления торможения (рейтинг 550). Хорошие показатели у глинистого раствора, у которого высокие показатели по всем критериям, кроме максимальной скорости (рейтинг 546). У соляного раствора (рейтинг 533) и воды (рейтинг 518) максимальный коэффициент преобразования энергии. Худшие показатели у аммиака, хотя в этом случае получается струя с максимальной скоростью при минимальном давлении внутри установки (рейтинг 491).

Выводы. Зависимость максимального давления внутри установки от плотности жидкости незначительна. Значение плотности оказывает наибольшее влияние на параметры ГП, характеризующие силовое воздействие на преграду. При увеличении плотности в 2,5 раза можно достигнуть 30% увеличения дальности и компактности струи, несмотря на существенное уменьшение ее скорости в момент истечения. Комплексная оценка эффективности применения различных веществ в качестве рабочей жидкости в ГП показала, что наиболее эффективной является жидкость с наибольшей плотностью.

Список литературы: 1. *Атанов Г. А.* Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. – К.: Вища школа, 1987. – 155 с. 2. *Семко А. Н.* Импульсные струи жидкости высокого давления. Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с. 3. *Решетняк В. В.* Оптимизация параметров гидропушки: Дис.... канд. техн. наук.: 01.02.05. Донецк: ДонНУ, 2010. – 167 с. 4. <http://www.drillings.ru/mel/>; Материалы, применяемые для приготовления промысловых жидкостей. – 21.10.2011. 5. <http://bse.sci-lib.com/article010933.html>; Глинистый раствор. – 22.10.2011. 6. *Веремеев С. А., Семко А. Н.* Влияние вязкости жидкости на параметры гидропушки. Вісник Донецького університету, Серія А. Природничі науки. – 2005. – №2. – С. 90 – 96. 7. *Семко А. Н., Локтюшина Ю. В.* Об учете сжимаемости жидкости при расчете течения в гидропушке. Донецк: ДонНУ, 2011. – С. 95 – 101. 8. *Атанов Г. А., Семко А. Н., Украинский Ю. Д.* Исследование внутренней баллистики гидропушки // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа.- 1983.- № 4.- С. 168-170.

Поступила в редколлегию 04.02.2012