

**Численное моделирование гидродинамического усилия, действующего на кольцевой затвор в процессе его опускания в проточную часть радиально-осевой гидротурбины / О. В. Потегенко, Н. Г. Шевченко, Е. С. Коваль, И. И. Тынянова // Вісник НТУ «ХП». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – № 54(960). – С.176-186. – Бібліогр.: 8 назв.**

Досліджується кільцевий затвор радіально-осової гидротурбіни, який виконує аварійні функції перекриття потоку. Розглядається математична модель нерівномірного руху затвора в нерухлій рідині із заданими граничними умовами. Представлені результати розрахунків гидродинамічної сили, що діє на кільцевий затвор гидротурбіни.

**Ключові слова:** радіально-осова гидротурбіна, кільцевий затвор, гидродинамічна сила.

Circular valve of Francis turbine that executes the emergency functions of stream ceiling is considered. Resulting hydrodynamic force operating on a valve is presented as a sum of hydrostatical force and inertia making one. The mathematical model of valve unsteady motion is considered in the stationary liquid with the boundary conditions set. The calculations results of hydrodynamic force operating on the circular valve of hydro-turbine for different positions of valve in flow channel and its different motion laws are presented.

**Key words:** Francis turbine, circular valve, hydrodynamic force.

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

## **О ВЛИЯНИИ СЖИМАЕМОСТИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИДРОПУШКИ**

Оценивается влияние сжимаемости жидкости на параметры гидропушки. Исследование выполнено в рамках модели идеальной сжимаемой жидкости для квазиодномерного приближения. Получены распределения скорости и давления жидкости на разных стадиях процесса. Проведена комплексная оценка эффективности гидропушки для жидкостей с разной сжимаемостью.

**Ключевые слова:** гидроимпульсная установка, сжимаемость жидкости, модели идеальной жидкости, комплексная оценка эффективности.

**Введение.** Во многих технических задачах гидродинамики рассматриваются случаи нестационарного движения жидкости. К ним относятся физические процессы, связанные с кратковременным и интенсивным воздействием на жидкость (удар, взрыв, электрический разряд). Существенной особенностью таких движений жидкости является то, что они, с одной стороны, носят ярко выраженный волновой характер, который проявляется во взаимодействии волн с границами раздела сред и между собой, а с другой – сопровождаются высокими давлениями.

Влияние сжимаемости, как физического свойства жидкости, на параметры гидроимпульсных установок (гидропушки и импульсного водомета) исследовалось многими авторами [1, 2]. В этих работах сравнивались результаты расчетов, полученные в рамках двух моделей жидкости – идеальной несжимаемой и идеальной сжимаемой. Сравнение показало, что пренебрежение сжимаемостью жидкости в этих случаях может привести к заметным количественным искажениям результатов, которые связаны с конечной скоростью протекания процессов и распространения волн. Поскольку выстрел кратковременен (заряд жидкости достигает среза сопла установки за несколько миллисекунд), то можно пренебречь вязкостью и теплопроводностью жидкости, процесс считать адиабатическим, а жидкость – идеальной. Оценка влияния рабочей жидкости с разными упругими свойствами на параметры гидроимпульсных установок не проводилась.

В настоящей работе, в рамках модели идеальной сжимаемой жидкости для квазиодномерного приближения проведена оценка влияния сжимаемости рабочей жидкости на эффективность гидропушки (ГП). Оценены упругие свойства исследуемых жидкостей. Получены распределения скорости и давления жидкости по длине ГП в разные моменты времени. Рассчитаны параметры, характеризующие эффективность ГП (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. Проведена комплексная оценка эффективности ГП в зависимости от сжимаемости рабочей жидкости.

**Упругость жидкости.** Количественно сжимаемость жидкостей характеризуется коэффициентом объемного сжатия, который в изотермическом процессе определяется по формуле:

$$k = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T, \quad (1)$$

где  $v = 1/\rho$  – удельный объем жидкости, м<sup>3</sup>/кг;  $P$  – давление, Па;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>,  $T$  – температура, К.

На практике об упругих свойствах жидкости часто судят по скорости распространения слабых упругих (звуковых) волн в жидкости, которая определяется по формуле:

$$c = \sqrt{(dP/d\rho)_S} = \sqrt{(\rho k)^{-1}}. \quad (2)$$

Методика оценки упругих свойств с помощью скорости звука в жидкости хорошо отработана. В различных справочниках приведены значения скорости во многих жидкостях при разных температурах и давлениях.

В акустике применяется акустический импеданс, как расчетный пара-

метр, характеризующий сжимаемость жидкости

$$\alpha = \rho \cdot c. \quad (3)$$

Физические свойства жидкости (плотность, скорость звука, вязкость и другие) зависят от температуры и давления. Теоретически эти величины можно определить из *уравнения состояния*. Однако в настоящее время нет теоретически обоснованного уравнения состояния для жидкости, как это сделано для газа. Поэтому многие исследователи создают и используют эмпирические и полуэмпирические уравнения, которые в большинстве случаев дают вполне приемлемые результаты.

Одним из наиболее распространенных эмпирических уравнений состояния, хорошо согласующимся с экспериментальными данными при высоких давлениях, является *уравнение Тейта* [3, 4]:

$$\rho = \rho_0 \left( 1 - A \cdot \ln \left( \frac{p + \pi}{p_0 + \pi} \right) \right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  – плотность при стандартных условиях;  $A$ ,  $\pi$  – эмпирические константы.

Другими авторами [5, 6] используется *уравнение Тейта в модифицированном виде*:

$$p = B \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^n, \quad (5)$$

где  $B = B(S)$  – функция, зависящая от энтропии;  $n$  – показатель адиабаты.

Из уравнения (5) можно получить зависимость плотности жидкости от давления:

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{p}{B} + 1 \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (6)$$

Для многих жидкостей коэффициенты Тейта для уравнения (4) определены и приведены в справочниках [7, 8].

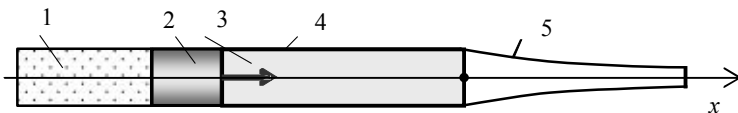


Рис. 1 – Гидропушка:

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

**Математическая модель ГП.** На рис. 1 приведена схема поршневой ГП безударного действия [9]. В этой схеме поршень 2 вместе с зарядом жидкости 3 предварительно разгоняется сжатым газом 1 в цилиндрическом стволе

ле 4 до некоторой скорости, с которой жидкость начинает втекать в сужающееся сопло 5, когда ее передний фронт 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 частицам вблизи переднего фронта жидкости, скорость которых существенно возрастает.

Движение жидкости в ГП рассматривается в квазиодномерной постановке, не учитываются вязкость жидкости, деформации корпуса, давление воздуха в сопле, передний фронт жидкости считается плоским,

В принятой постановке уравнения нестационарного движения идеальной сжимаемой жидкости в ГП можно записать в виде [9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = -\frac{\rho u}{S} \frac{dS}{dx}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} = -\frac{\rho u^2}{S} \frac{dS}{dx}; \quad (8)$$

$$p = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right]. \quad (9)$$

Здесь  $u$ ,  $p$  и  $\rho$  – скорость, давление и плотность;  $x$  и  $t$  – координата и время;  $S = S(x)$  – площадь поперечного сечения сопла, которая является заданной функцией координаты  $x$ .

Начальные и граничные условия для системы (7) – (9) следующие:

$$u(0, x) = U_0, \quad p(0, x) = 0, \quad \rho(0, x) = \rho_0; \quad -L \leq x \leq 0; \\ u(t, x_p) = U_0, \quad p(t, x_p) = 0. \quad (10)$$

Уравнения движения поршня с начальными условиями имеют вид:

$$\frac{du_p}{dt} = -\frac{p(t, x_p)}{m_p} S_0, \quad \frac{dx_p}{dt} = u_p, \quad u_p(0) = U_0, \quad x_p(0) = -L, \quad (11)$$

где  $u_p$  и  $x_p$  – скорость и координата поршня;  $L$  – начальная длина заряда жидкости;  $m_p$  – масса поршня;  $S_0$  – площадь поперечного сечения ствола;  $U_0$  – начальная скорость поршня и заряда жидкости.

Численное решение уравнений движения жидкости (7) – (9) выполнялись методом Родионова [10]. Расчеты проводились на регулярной подвижной сетке, границы которой опирались на свободную поверхность и поршень. Законы движения границ сетки (свободной поверхности и поршня) определялись в ходе решения гидродинамической задачи.

**Анализ результатов расчетов.** Расчеты проводились для лабораторной

ГП, размеры и параметры которой взяты из работы [11]. Начало координат совмещено с входом в сопло. 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  $u_0 = 76,2$  м/с, масса поршня  $m_p = 2,25$  кг, масса жидкости  $m = 0,85$  кг. Профиль сопла экспоненциальный, который описывается уравнением  $R(x) = R_c e^{-kx}$  [12], где  $k = L_s^{-1} \ln(R_c/R_s)$ .

Экспоненциальный профиль сопла гидропушки был получен Б. В. Войцеховским для течения идеальной несжимаемой жидкости при условии, что поршень тормозится с постоянным ускорением, и в этом случае наиболее эффективно передает свою энергию жидкости. Сопло Б. В. Войцеховского запатентовано и получило широкое распространение для гидропушек.

Выстрел из ГП сопровождается высоким давлением внутри установки, которое может достигать 1,5 ГПа. Поэтому при расчете параметров необходимо учитывать сжимаемость жидкости. В расчетах сжимаемость учитывалась при помощи уравнения Тейта в виде (9). В справочниках [7, 8] часто приводятся данные для уравнения Тейта в форме (4). Поэтому коэффициенты уравнения (9) рассчитывались по справочным данным для другого уравнения состояния при помощи соответствующей аппроксимации.

В табл. 1 приведены значения плотности (при нормальных условиях) и коэффициенты  $A$ ,  $\pi$  уравнения (4) для исследуемых жидкостей [7, 8]. По этим данным были определены коэффициенты  $n$  и  $B$  для уравнения (6).

Ошибка расчета коэффициентов уравнения (6), полученных с помощью уравнения (4) для исследуемых жидкостей нигде не превышает 0,1% в исследуемом диапазоне давлений.

Таблица 1 – Значения  $\rho_0$ ,  $A$ ,  $\pi$ ,  $n$ ,  $B$  при температуре  $T = 293$  К

№ п/п	жидкость	$\rho_0$	$AA$	$\pi$ , МПа	$n$	$B$ , МПа	Максимальное давление, ГПа
1	н-гептан	683,6	0,1020	82,7	7,356	120,0	1,1
2	метиловый спирт	791,8	0,1018	93,7	7,348	138,0	1,2
3	вода	998,2	0,1050	210,5	7,15	298,4	3,0
4	анилин	1021,7	0,0938	206,8	8,773	289,7	1,0
5	глицерин	1261,0	0,0790	244,4	10,88	300,0	1,0

Оценка упругих свойств жидкостей проводилась по коэффициенту объёмного сжатия при атмосферном давлении, скорости звука в покоящейся жидкости и акустическому импедансу. Коэффициент объёмного сжатия  $k$  рассчитывался по формуле:

$$k = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{n(P+B)},$$

скорость звука в покоящейся жидкости и акустический импеданс – по формулам (2) и (3) соответственно.

В табл. 2 приведены справочные данные среднего значения коэффициента сжимаемости [13], скорости звука [14] и расчетные значения этих параметров для исследуемых жидкостей.

Таблица 2 – Справочные и расчетные значения  $k, c, \alpha$

Жидкость	$k \cdot 10^{-11}$ , Па <sup>-1</sup>	$k_{рас} \cdot 10^{-11}$ , Па <sup>-1</sup>	$c$ , м/с	$c_{рас}$ , м/с	$\alpha \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> ·с	$\alpha_{рас} \cdot 10^6$ , кг/м <sup>2</sup> ·с
н-гептан	132	113	1100	1136	0,768	0,752
метилловый спирт	103	99	1123	1132	0,896	0,899
вода	48	46	1497	1462	1,459	1,494
анилин	43	39	1656	1577	1,611	1,692
глицерин	25	31	1923	1609	2,029	2,425

Для оценки влияния сжимаемости жидкости на эффективность ГП были использованы следующие критерии: максимальная скорость струи  $u_{max}$ , максимальное давление в установке  $p_{max}$ , динамическое давление струи

$$p_b = \rho u_{max}^2 / 2,$$

импульс высокоскоростного участка струи

$$I = \int_{t_0}^{t_{v_{max}/\sqrt{2}}} \rho u^2 F_s dt,$$

коэффициент превышения давления  $k_p = \rho u^2 / 2 p_{max}$ , коэффициент преобразования энергии

$$k_e = 0,5 E_0^{-1} \int_{t_0}^{t_{v_{max}/\sqrt{2}}} \rho u^3 F_s dt [10].$$

Численные значения этих критериев для воды, которая являлась эталонной жидкостью, приведены в табл. 3:

Таблица 3 – Значения главных параметров ГП для водяного заряда

жидкость	$k \cdot 10^{-11}$ , Па <sup>-1</sup>	$u_{max}$ , м/с	$p_{max}$ , МПа	$p_b$ , МПа	$I$ , кг·м/с	$k_p$	$k_e$
вода	47	1055	163	556	3,73	3,41	0,20

В табл. 4 приведены относительные критерии эффективности ГП для исследуемых жидкостей (критерии исследуемых жидкостей отнесены к соответствующим критериям эталонной жидкости).

Таблица 4 – Значения главных параметров ГП для исследуемых жидкостей

№ п/п	Вид вещества	$u_{\max}$	$p_{\max}$	$p_b$	$I$	$k_p$	$k_e$
1	н-гептан	0,91	0,55	0,56	0,68	1,01	0,65
2	метиловый спирт	0,91	0,65	0,66	0,86	1,01	0,80
3	вода	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	анилин	1,03	1,10	1,08	1,09	0,99	1,15
5	глицерин	1,04	1,40	1,37	1,36	0,98	1,45

На рис. 2 а, б приведено распределение скорости и давления в стволе ГП в момент начала истечения для исследуемых жидкостей. 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  $L_s$ .

Максимальная скорость струи для разных жидкостей отличается незначительно. При уменьшении сжимаемости жидкости на 35% (глицерин) максимальная скорость струи увеличивается на 4%. При увеличении сжимаемости на 140% (гептан) скорость струи уменьшается на 9%.

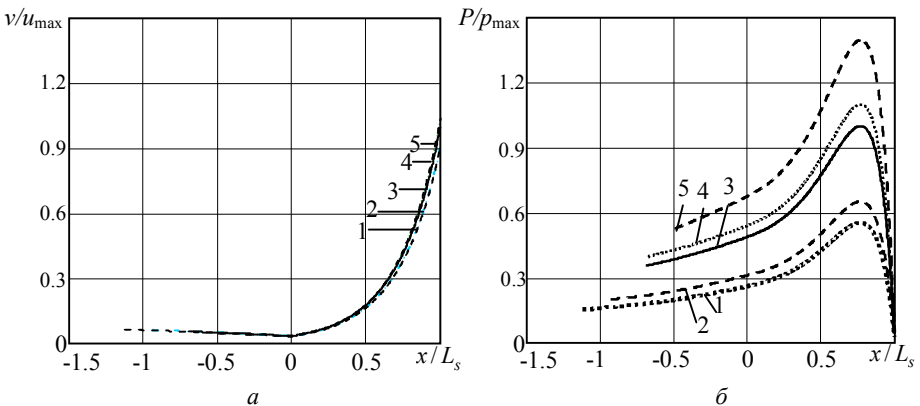


Рис. 2 – распределение скорости а и давления б в стволе ГП в момент начала истечения.

1 – гептан, 2 – метиловый спирт, 3 – вода, 4 – анилин, 5 – глицерин.

Максимальное давление внутри гидропушки определяется прочностными свойствами корпуса установки и накладывает ограничение на размеры и массу установки. Отличие максимального давления в ГП для исследуемых жидкостей от водяного заряда составляет 40-45%. Локальные значения давления внутри установки для разных жидкостей также существенно различаются.

Например, на поршне давление для самой слабосжимаемой жидкости (глицерин) в 1,36 раза больше, чем для самой легкосжимаемой жидкости (гептан) (кривые 5 и 1 на рис. 2 б). Чем меньше сжимаемость жидкости, тем больше давление на поршне.

Максимальное значение давления внутри установки для всех исследуемых жидкостей наблюдается на расстоянии 0,23 от среза сопла. Профиль давления хорошо согласуется с теорией о перераспределении энергии между частицами жидкости, нестационарно движущейся в гидропушке. Участок кривой, где давление меняется от максимального до нуля, соответствует ускорению частиц переднего фронта жидкости. Здесь производная  $dP/dx > 0$ . Остальная масса жидкости вместе с поршнем тормозится, о чем свидетельствует профиль изменения давления на участке от конца ствола до расстояния равного 0,23 от среза сопла. Здесь производная  $dP/dx < 0$ .

Динамическое давление струи характеризует эффективность воздействия струи на объект и сильно зависит от максимальной скорости струи

$$p_b = \rho u_{\max}^2 / 2 .$$

Если  $p_b$  меньше *предела прочности образца на сжатие*  $\sigma_{np}$ , то образец не разрушается. Отличие давления торможения в ГП для исследуемых жидкостей от водяного заряда составляет 40%.

Коэффициент превышения давления характеризует, во сколько максимальное давление струи на жесткую преграду превышает максимальное давление внутри установки. Этот коэффициент максимален для легкосжимаемой жидкости. Тем не менее,  $k_p$  для разных жидкостей отличается незначительно, всего лишь на 2%.

Эффективность воздействия струи на преграду сильно зависит от скорости струи. Поэтому в струе определяющую роль играет высокоскоростной участок, скорость которого лежит в интервале [10]

$$u_{\max} \leq u \leq u_{\min} .$$

Минимальная скорость высокоскоростного участка выбирается такой, чтобы удельная энергия и динамическое давление струи при этой скорости было в два раза меньше максимальных значений, то есть минимальная скорость высокоскоростного участка струи равна

$$u_{\min} = u_{\max} / \sqrt{2} .$$

Импульс высокоскоростного участка максимальный в случае слабосжимаемой жидкости. Его изменение по отношению к водяному заряду составляет 30-32%.

Коэффициент преобразования энергии  $k_E$  характеризует кинетическую энергию высокоскоростного участка струи. Он определяется как отношение



кинетической энергии высокоскоростного участка струи  $E_{\max}$  к начальной энергии установки  $E_0$  (поршня и водяного заряда). Зависимость этого коэффициента от сжимаемости жидкости аналогична соответствующей зависимости давления торможения  $p_b$  – чем меньше сжимаемость, тем больше коэффициент преобразования энергии. При увеличении сжимаемости на 140% (гептан)  $k_E$  изменяется на 44%. При уменьшении сжимаемости на 35% (глицерин)  $k_E$  уменьшается на 37%.

В табл. 5 представлены результаты комплексной оценки эффективности ГП в зависимости от сжимаемости рабочих жидкостей. Оценка проводилась по 100-бальной шкале согласно методике [10] для следующих критериев:

$$\tilde{u}_{\max}, \tilde{p}_{\max}^{-1}, \tilde{p}_b, \tilde{I}, \tilde{k}_p, \tilde{k}_E.$$

Обратная величина для максимального давления взята потому, что меньшему давлению соответствует большая надежность сопла. 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 эффективной считалась ГП с наибольшей суммой баллов.

Таблица 5 – Комплексная оценка эффективности ГП для 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	н-гептан	87	39	41	50	100	45	362
2	метиловый спирт	88	46	48	64	100	55	401
3	вода	96	71	73	74	99	69	482
4	анилин	99	79	79	81	97	79	514
5	глицерин	100	100	100	100	96	100	596

По результатам расчетов видно, что из рассмотренных жидкостей, наилучшие показатели имеет глицерин, у которого максимальны значения всех главных параметров ГП, за исключением коэффициента превышения давления (рейтинг 596).

Хорошие показатели у анилина, где высокие значения по всем критериям, кроме  $k_p$  (рейтинг 514).

У метилового спирта и нормального гептана наблюдается максимальный коэффициент превышения давления.

Худшие показатели у н-гептана (рейтинг 362).

**Выводы.** Из проведенных исследований следует, что сжимаемость жидкости оказывает наибольшее влияние на максимальное давление внутри установки и параметры гидропушки, характеризующие силовое воздействие на преграду. Зависимость максимальной скорости от сжимаемости жидкости незначительна. Комплексная оценка эффективности применения различных веществ в качестве рабочей жидкости в ГП показала, что наиболее эффективной является слабосжимаемая жидкость.

**Список литературы:** 1. *Атанов Г. А.* Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. – К.: Вища школа, 1987. – 155 с. 2. *Семко А. Н.* О влиянии сжимаемости жидкости на параметры гидропушки // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т. 74, № 1. – С. 1-5. 3. Физические величины: Справочник / *А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.*; Под ред. *И. С. Григорьевой, Е. З. Мейлихова.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. 4. *Вервейко В. Н.* Анализ применимости уравнений Тэйта к различным классам веществ в конденсированном состоянии / *В. Н. Вервейко, М. В. Вервейко, Ю. Ф. Мелихов* // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – Курск, 2006. – №1. <http://scientific-notes.ru> 5. *Коул Р.* Подводные взрывы. – М.: ИЛ, 1950. – 495 с. 6. *Яковлев Ю. С.* Гидродинамика взрыва. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 313 с. 7. Исследование в области высоких давлений / Под ред. *Е. В. Золотых.* – М.: Изво стандартов, 1987. – 304 с. 8. *Атанов Ю. А.* Сжимаемость некоторых жидкостей при высоких давлениях / *Ю. А. Атанов, В. А. Борзунов, В. Н. Разумихин* // Труды метрологических институтов СССР. – 1969. – Вып. 104 (164). – С. 99-102. 9. *Семко А. Н.* Импульсные струи жидкости высокого давления. Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с. 10. *Решетняк В. В.* Оптимизация параметров гидропушки: Дис. ... канд.т.н.: 01.02.05. Донецк: ДонНУ, 2010. – 167 с. 11. *Атанов Г. А.* Исследование внутренней баллистики гидропушки / *Г. А. Атанов, А. Н. Семко, Ю. Д. Украинский* // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа.–1983.–№ 4. – С. 168-170. 12. *Войцеховский Б. В.* Кавитационный эффект в экспоненциальном струйном насадке / *Б. В. Войцеховский, Ю. А. Дудин, Ю. А. Николаев, В. П. Николаев, В. В. Никитин* // Динамика сплошной среды. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР. – 1971. – Вып. 9. – С. 7-11. 13. *Кикоин И. К.* Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. *И. К. Кикоина.* – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с. 14. *Енохович А. С.* Краткий справочник по физике. – М.: Высшая школа, 1976. – 288 с.

*Поступила в редколлегию 22.10.12*

УДК 532.522: 518.5

**О влиянии сжимаемости рабочей жидкости на эффективность гидропушки / А. Н. Семко, Ю.В. Локтюшина** // Вісник НТУ «ХП». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Харків: НТУ «ХП», – 2012. – № 54(960). – С. 186-195. – Бібліогр.: 14 назв.

Оцінюється вплив стисливості рідини на параметри гідрогармати. Дослідження виконано в рамках моделі ідеальної стисливої рідини для квазіодномірного наближення. Отримані розподіли швидкості й тиску рідини на різних стадіях процесу. Проведена комплексна оцінка ефективності гідрогармати для рідин з різним коефіцієнтом стисливості.

**Ключові слова:** гідроімпульсна установка, стисливість рідини, моделі ідеальної рідини, комплексна оцінка ефективності.

In this article evaluated the effect of liquid compressibility on the parameters hydrogun. The study was conducted in the model of ideal compressible fluid to quasi approximation. The dependence of the velocity distribution and pressure at different stages of process was received. Integrated assessment of the effectiveness of GG for liquids with different compressibility was performed.

**Key words:** hydroimpulsive installation, compressibility of the liquid, ideal fluid model, a comprehensive performance evaluation.