

с. 2. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 3. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 5. Рябенков И.А., Новиков Ф.В. Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на эффективность процесса шлифования // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 143 – 147.

Bibliography (transliterated): 1. *Fiziko-matematicheskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroenija*. Ed. F. V. Novikov, and A. V. Yakimov. V desjati tomah. Vol. 4. *Teorija abrazivnoj i almazno-abrazivnoj obrabotki materialov*. Odessa: ONPU, 2002. Print. 2. Maslov, E. N. *Teorija shlifovanija metallov*. Moscow: Mashinostroenie, 1974. Print. 3. Popov, S. A., N. P. Malevskij and L. M. Tereshhenko. *Almazno-abrazivnaja obrabotka metallov i tverdych splavov*. Moscow: Mashinostroenie, 1977. Print. 4. Yakimov, A. V., et al. *Teoreticheskie osnovy rezanija i shlifovanija materialov: utheb. posobie*. Odessa: OGPU, 1999. Print. 5. Rjabenkov, I. A., and F. V. Novikov. "Ocenka vlijanija intensivnosti trenija svjazki kruga s obrabatyvaemym materialom na effektivnost' processa shlifovanija." *Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prac'. Ser.: Innovacijni tehnologii' ta obladnannja obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurgii'*. No. 43 (1086). Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 143–147. Print.

Поступила (received) 27.04.2015

УДК 532.5, 614.844, 621.227

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

ГИДРОПУШКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Описаны основные направления применения импульсных высокоскоростных струй жидкости в технологических процессах, их преимущества и недостатки, дальнейшие перспективы развития. Приведены схемы устройств, применяемых для получения ультраструй. Описано отличие в физике процессов, происходящих при втекании воды в сопло и истечении из него в гидропушке и импульсном водомете. Даны уравнения для расчета внутренней баллистики, а также конечно-разностная аппроксимация уравнений движения по методу Родинонова, адаптированному для расчета гидроимпульсных установок, который удовлетворяет требованиям монотонности, однородности, консервативности и имеет второй порядок аппроксимации по времени и координате.

Ключевые слова: импульсные струи жидкости, высокоскоростные струи, импульсный водомет, гидропушка.

Введение. Водоструйные технологии, основанные на применении струй жидкости высокой и сверхвысокой скорости (ультраструй), нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, таких как прямолинейное и фасонное резание различных материалов (камень, металлы, пластмасса, кожа, и так далее), обработка бетонных поверхностей (резка, очистка, углубление), прецизионная обработка современных материалов (фигурная резка и изготовление отверстий заданной формы), разрушение горных пород и бетонных блоков, углубление акватории порта с каменистым дном, упрочнение металлических поверхностей наклепом при ударе струи, очистка корпусов судов от ракушек и старой краски, очистка внутренней поверхности труб от

плотных отложений и шламов и внешней поверхности для антикоррозийной обработки, очистка теплообменников, очистка разметки на бетоне и асфальте, формовка изделий сложной формы из листового материала, пробивание фасонных отверстий в листовых материалах, соединение (сварка) материалов при ударе высокоскоростной струи, и так далее [1 – 6]. Характерной особенностью водоструйных технологий является возможность обработки материалов, существенно различающихся по своим механическим свойствам: пластмассы, кожа, мягкие, твердые и хрупкие металлы, горные породы и бетонные изделия различной крепости и абразивности.

Процессы на основе импульсных технологий обладают громадными удельными мощностями, позволяють развивать сверхвысокие давления, получать импульсные струи сверхвысокой скорости. В таких процессах имеет место пространственное перераспределение энергии, которое приводит к резкому локальному возрастанию плотности энергии. Этот эффект может быть усилен и использован для формирования импульсных струй жидкости или локального повышения давления. На этих принципах могут быть построены установки и технологические процессы.

Анализируя современное состояние водоструйных технологий, президент Международной Ассоциации водоструйных технологий *М.М. Vijay* уверен в перспективности силовых импульсных и пульсирующих водяных технологий в будущем [7]. Эти устройства компактны, безопасны и требуют меньше энергии, чем непрерывные струи. Дальнейшие работы в этой области должны быть направлены на повышение надежности гидроимпульсных установок, работающих в экстремальных режимах, оптимизацию сопла и других систем.

Установки для получения ультраструй. Для получения импульсных струй жидкости часто используют гидропушку (ГП) и импульсный водомет (ИВ) с поршневым или пороховым приводом, а также электроимпульсный водомет (ЭИВ), в котором используется энергия подводного электрического разряда. В ГП и ИВ реализованы разные физические принципы, поэтому процесс выстрела и параметры струи ГП и ИВ сильно отличаются. В ИВ высокоскоростная импульсная струя формируется при выдавливании воды из отверстия малого диаметра. Такой способ позволяет получить струю дальностью 1,5 – 2 м [8, 9]. Давление внутри ИВ не может превышать давления гидронапора струи, поэтому надежность установки сильно зависит от скорости струи. В связи с прочностными ограничениями, ИВ не позволяет получать струи скоростью выше 1500 м/с. Для эффективного разрушения крепких горных пород мощности струи ИВ может быть недостаточно.

В отличие от ИВ, в ГП ускорение жидкости происходит при втекании в сужающееся сопло. Давление гидронапора струи ГП может в несколько раз превышать давление внутри установки. Расчеты показали возможность получения при максимальном давлении в ГП не больше 1 ГПа (это вполне достижимо при использовании современных материалов и технологий) струй, способных оказывать на преграду давление до 4 ГПа. Такого давления достаточно для разрушения даже самого крепкого материала [8, 9].

Схема поршневой ГП безударного действия приведена на рис. 1. Под действием давления сжатого газа 1 тяжёлый поршень 2 разгоняется вместе с водой 3 в цилиндрическом стволе 4. Вода, достигая входа в сужающееся

сопло 5, начинает втекать в него, ускоряясь. Ускорение воды происходит за счет перераспределения энергии между частицами нестационарно движущейся жидкости. При этом кинетическая энергия частиц воды, прилегающих к свободной поверхности, значительно превышает среднюю по объёму энергию. Ускоряясь, передний фронт воды может достигать скорости, значительно превышающей скорость звука в воде [8, 9]. Достигнув среза сопла, вода истекает из него импульсной струей.

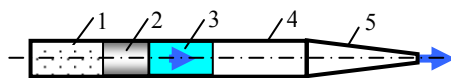


Рис. 1 – Гидропушка:
1 – ресивер, 2 – поршень,
3 – вода, 4 – ствол, 5 – сопло.

При истечении скорость струи на срезе сопла быстро уменьшается. Уменьшение скорости истечения приводит к возникновению градиента скорости по длине струи, ее «растяжению» и дальнейшему разрушению из-за развития кавитации. В результате расстояние эффективного разрушения преграды струей (дальнобойность) существенно уменьшается, что сильно ограничивает область применения ГП.

Кроме безударной установки, описанной выше, существует ГП ударного действия, в которой начальная скорость втекания в два раза больше скорости поршня. Основные части ударной ГП те же, что и для безударной. Различие состоит в механизме начального разгона жидкости. В ГП ударного действия энергия сообщается ударом разогнанного под действием сжатого газа поршня покоящейся у входа в сопло воде. Созданная поршнем ударная волна разгоняет покоящуюся воду до скорости, близкой к скорости поршня, и повышает в ней давление. Достигнув свободной поверхности, ударная волна отражается от нее центрированной волной разрежения. Расширяясь в волне разрежения, вода получает дополнительную скорость, практически равную скорости за ударной волной. При разгоне воды таким способом, начальная скорость ее втекания в сопло в два раза превышает скорость поршня. Тем не менее, исследования не показали существенных преимуществ ударной ГП [8].

Процесс выстрела поршневого ГП с пневматическим приводом жестко детерминирован и практически неуправляем. В рамках теории идеальной несжимаемой жидкости втекание свободного водяного заряда в сужающееся сопло принципиально не отличается от движения заряда с поршнем, поскольку поршень может быть заменен эквивалентным водяным зарядом с массой, равной массе поршня [10 – 12]. В результате получится втекание в сопло более длинного водяного заряда. Распределение параметров жидкости и закон их изменения со временем зависят исключительно от профиля сопла и его геометрических размеров.

Во многих случаях альтернативой пневматической ГП может быть пороховая ГП, источником энергии в которой являются продукты сгорания пороха. Конструкция пороховой ГП позволяет в довольно широких пределах управлять процессом выстрела и существенно увеличить дальнобойность установки [13 – 15]. Пороховая

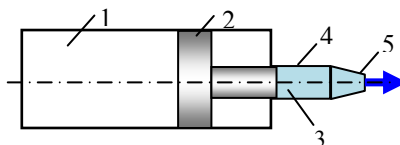


Рис. 2 – Импульсный водомет:
1 – сжатый газ, 2 – поршень, 3 – вода,
4 – ствол, 5 – сопло.

ГП по сравнению с пневматической обладает следующими преимуществами: простота конструкции, малые габариты и масса, мобильность, большая удельная мощность, возможность получения ультраструй большого диаметра и длины, существенное увеличение дальности.

В отличие от ГП, в которой используется инерционный принцип разгона жидкости при втекании в сужающееся сопло, импульсная струя ИВ образуется при выдавливании жидкости через отверстие малого диаметра тяжелым поршнем. На рис. 2 представлена схема поршневого ИВ с пневматическим приводом. Под действием давления сжатого газа 1 тяжелый поршень 2 разгоняется до начальной скорости u_{p0} . В конце разгона поршень сжимает небольшой объем воды 3, заполняющей ствол 4 и сопло 5, вытесняя воду через малое отверстие в сопле в виде импульсной высоконапорной струи. В отличие от ГП, струя ИВ начинает истекать с небольшой скоростью, которая возрастает по мере торможения поршня и повышения давления воды, достигая максимума в середине выстрела. Струя ИВ, как правило, компактнее струи ГП, дальность ИВ может достигать 2 – 3 метров [16].

Внутренняя баллистика гидроимпульсных установок. Процессы в ГП и ИВ характеризуются импульсным и волновым характером, большими градиентами параметров, возникновением и эволюцией кавитации, появлением и исчезновением разрывов, взаимодействием волн сжатия и разрежения. Как показали исследования, с достаточной для практических целей точностью и адекватностью движение жидкости в таких установках описывается в рамках *модели квазидномерной газовой динамики* с соответствующими начальными и граничными условиями. Для определения основных гидродинамических параметров ГП и ИВ необходимо учитывать сжимаемость жидкости и возможную кавитацию; вязкостью жидкости, влиянием воздуха в сопле, радиальной скоростью и изменением энтропии, деформациями корпуса и отдачей при выстреле можно пренебречь, свободную поверхность и границы кавитации считать плоскими. В принятой постановке квазидномерное изоэнтропическое движение жидкости в поршневой ГП описывается следующими уравнениями в дивергентной форме

$$\frac{\partial p F}{\partial t} + \frac{\partial \rho u F}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho u F}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) F}{\partial x} = p \frac{dF}{dx}, \quad p = B \left[(\rho / \rho_0)^n - 1 \right]$$

с начальными и граничными условиями

$$u(0, x) = u_{p0}, \quad p(0, x) = 0, \quad \rho(0, x) = \rho_0; \quad -L \leq x \leq 0; \quad p(t, x_F) = 0.$$

Движение поршня описывается уравнениями с начальными условиями

$$m_p \frac{du_p}{dt} = -F_c p_p; \quad \frac{dx_p}{dt} = u_p; \quad u_p(0) = u_{p0}; \quad x_p(0) = 0.$$

Здесь ρ, u, p – плотность, скорость и давление, t, x – время и координата, m_p, x_p, u_p – масса, координата и скорость поршня, u_{p0} – начальная скорость поршня, F_c – площадь поперечного сечения ствола, x_F – координата свободной поверхности, L – длина водяного заряда, $\rho_0 = 10^3$ кг/м³ – плотность воды при обычных условиях, $B = 304,5$ МПа, $n = 7,15$ – постоянные в уравнении воды в *форме Тэма*.

Существует несколько моделей нестационарной кавитации, основанных

на представлениях сплошной среды [17 – 20]: модели с постоянным давлением и скоростью звука, заданной концентрацией зародышей кавитации, парожидкостная модель. Одной из самых простых является модель кавитации с постоянным давлением, согласно которой кавитация возникает, если при расчете давление в жидкости становится меньше некоторого критического p_{cr} . Уравнение состояния воды для этой модели кавитации имеет вид

$$p = \begin{cases} B[(\rho/\rho_0)^n - 1], & \rho > \rho_{cr}; \\ p_{cr}, & \rho \leq \rho_{cr}. \end{cases}$$

Учитывая небольшую величину критического давления на практике часто им пренебрегают, считая, что вода совсем не выдерживает растяжения, то есть принимают $p_{cr} = 0$.

Горение пороха рассматривается в рамках квазистационарной модели, характерной для задач внутренней баллистики в артиллерии, при следующих допущениях [21]:

- теплообмен через стенки не учитывается;
- граница раздела «пороховые газы – вода» считается плоской и непроницаемой;
- порох горит параллельными слоями по геометрическому закону, скорость горения линейно зависит от давления;
- химический состав продуктов сгорания не изменяется при горении;
- параметры состояния пороховых газов связаны *упрощенным уравнением Ван-дер-Ваальса*.

В принятой постановке квазистационарное горение пороха описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными и граничными условиями

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_1}{h_1} p_g, \quad Q_g = m_{p0} \chi_1 \sigma(z) \frac{dz}{dt}, \quad \frac{dV_g}{dt} = u_g F_c + \alpha_1 Q_g,$$

$$\frac{dp_g}{dt} = \frac{1}{V_g} \left[(k-1) q Q_g - p_g (k u_g F_c + \alpha_1 Q_g) \right],$$

$$z = 0, \quad V_g = V_{g0}, \quad p_g = p_{g0}; \quad p(t, x_g) = p_g; \quad u(t, x_g) = u_g,$$

где V_g , p_g и u_g – объем, давление и скорость пороховых газов; $z = h/h_1$ – относительная толщина сгоревшего слоя; $2h_1$ – начальная толщина порохового зерна; h – толщина сгоревшего слоя; χ_1 , λ_1 , μ_1 – коэффициенты, определяемые формой порохового зерна; m_{p0} – начальная масса пороха; $\sigma(z)$ – относительная площадь поверхности горения; u_1 и q – постоянная скорости горения и удельная теплота сгорания пороха; k – показатель адиабаты продуктов сгорания пороха; $\alpha_1 = 1/\rho_p - \alpha$ – поправка; учитывающая собственный объем молекул пороховых газов; ρ_p – плотность твердого пороха; V_{g0} , p_{g0} – параметры газа после срабатывания воспламенителя.

Как правило, такие задачи не имеют аналитического решения и решаются численно. При выборе численного метода для решения таких задач, пред-

почтение отдается монотонным, однородным консервативным схемам высокого порядка аппроксимации. Для расчета гидроимпульсных установок развит метод Родинова, который удовлетворяет требованиям монотонности, однородности, консервативности и имеет второй порядок аппроксимации по времени и координате. Повышение порядка аппроксимации по координате достигается за счет замены кусочно-постоянной реконструкции параметров кусочно-линейной, а по времени – за счет выполнения двухшагового пересчета типа *предиктор-корректор*. Сохранение монотонности обеспечивается применением *принципа минимума производной* при выборе приращений функций в ячейке [22]. Конечно-разностная аппроксимация уравнений движения в ГП по методу Родинова имеет вид:

$$\rho_{i+\frac{1}{2}}^{m+1} = \left\{ \rho_{i+\frac{1}{2}}^m \Delta x_{i+\frac{1}{2}}^m - \Delta t [R(U-W)] \Big|_i^{i+1} - \left(\frac{\rho u}{F} \right)_{i+1/2}^m - \frac{F_i^{i+1} \Delta t \Delta x_{i+1/2}^{m+1/2}}{\Delta x_{i+1/2}^m} \right\} / \Delta x_{i+\frac{1}{2}}^{m+1};$$

$$(\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^{m+1} = \left\{ (\rho u)_{i+\frac{1}{2}}^m \Delta x_{i+\frac{1}{2}}^m - \Delta t [(RU(U-W) + P)] \Big|_i^{i+1} - \left(\frac{\rho u^2}{F} \right)_{i+1/2}^m \frac{F_i^{i+1} \Delta t \Delta x_{i+1/2}^{m+1/2}}{\Delta x_{i+1/2}^m} \right\} / \Delta x_{i+1/2}^{m+1}.$$

Здесь Δt – шаг по времени, $\Delta x_{i+1/2}^m = (x_{i+1} - x_i)^m$ – шаг сетки по координате на m -том шаге по времени, $W_i = (x_i^{m+1} - x_i^m) / \Delta t$ – скорость движения i -го узла сетки, $F_i^{i+1} = F_{i+1} - F_i$. Большими буквами R, U, P обозначены параметры, которые рассчитываются на границах ячеек при решении *обобщенной задачи Римана*, или, на границах расчетной области из граничных условий. Параметры с целыми индексами i определяются в точках с координатами x_i , а параметры с полуцелыми индексами $i + 1/2$ – в точках с координатами $(x_i + x_{i+1})/2$. Расчеты проводились на подвижных регулярных сетках, которые опирались на передний и задний фронт движущегося водяного заряда.

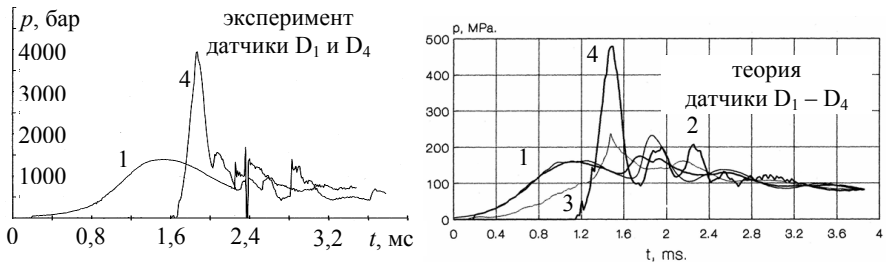


Рис. 3 – Давление внутри пороховой гидропушки.

На рис. 3 для сравнения приведены результаты эксперимента и расчета параметров пороховой ГП, которые наглядно демонстрируют адекватность разработанных моделей и эффективность численных методов. Давление по-

роховых газов (датчик D_1) и воды (датчик D_4) внутри пороховой ГП измерялось на полигоне системой для измерения параметров внутренней баллистики ствольных орудий, а рассчитывалось численно методом Родино-нова.



перед выстрелом

после выстрела

Рис. 4 – Разрушение железобетонных блоков.

Ультразвук как инструмент разрушения. Экспериментальные и теоретические исследования по применению импульсных струй жидкости для разрушения горных пород, бетонных блоков и проходки тоннелей показали, возможность создания импульсных струй жидкости скоростью до 3000 м/с [8, 9]. Такие струи способны в короткий промежуток времени создавать на поверхности мишени давление в несколько десятков тысяч атмосфер, и эффективно разрушать материалы даже очень высокой прочности. На рис. 4 и 5 приведены фотографии экспериментального исследования по применению ультразвуков для разрушения бетонных блоков и конструкционных материалов.

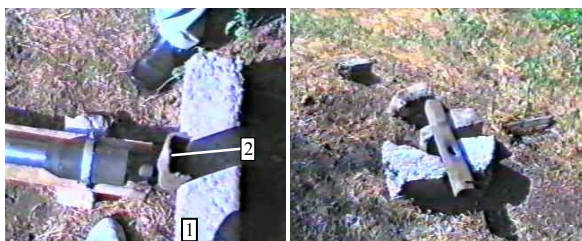


Рис. 5 – Разрушение конструкционных материалов:
1 – бетонная перемычка, 2 – п-образный стальной профиль.

Под действием ультразвуков в горной породе протекают различные процессы, каждый из которых способен привести к разрушению. Разрушение может происходить за счет резкого повышения давления в ударной волне. Кроме того, распространяясь в массиве породы, ударная волна отражается волной разрежения от имеющихся внутри неоднородностей, что приводит к появлению растягивающих напряжений, и в результате породе отрывается от

забоя.

При растекании потока по шероховатой поверхности забоя (скорость растекания может во много раз превышать скорость удара) за выступами возникают зоны пониженного давления. В этом случае возможен отрыв потока с образованием каверн, захлопывание которых сопровождается локальным гидравлическим ударом, приводящим к разрушению.

Трещиноватые породы разрушаются вследствие того, что вода под большим давлением проникает в трещины и откалывает породу. Помимо названных выше факторов следует также учитывать проявление усталостных свойств массива, понижение его прочности вследствие действия переменной нагрузки. Степень влияния каждого фактора на разрушение породы зависит от ее свойств.

Обобщение результатов экспериментальных исследований по разрушению бетонных пород позволило сделать вывод, что ИВ могут успешно применяться для разрушения горных пород крепости $f = 8 \dots 10$ (по шкале М.М. Протодьяконова), средняя производительность при этом составляет $10 \dots 12 \text{ м}^3 / \text{ч}$ [8].

К преимуществам импульсного гидродинамического способа разрушения относят следующее: отсутствие режущего инструмента и устранение по этой причине расходов на его заточку и замену; отсутствие контакта с забоем; небольшие габаритные размеры комбайна и его масса; высокая производительность и низкая энергоемкость процесса разрушения; простота автоматизации и механизации работ, возможность организации безлюдной выемки; большая мобильность установки, возможность проведения вспомогательных операций (выполнение канавок для стока воды, лунок под крепь и тому подобное); улучшение условий труда и повышение его безопасности.

К недостаткам технологий на основе ГП и ИВ является относительно высокий уровень шума, достигающий 120 дБ в момент выстрела.

Ультразвук как инструмент эффективного обезвреживания взрывоопасных предметов (ВОП). Благодаря возможности эффективного разрушения взрывоопасных предметов, не вызывая их детонации, импульсные струи нашли широкое применение для утилизации боеприпасов и ликвидации взрывоопасных объектов. Использование струй разной скорости позволяет эффективно проводить гуманитарное разминирование бомб террористического назначения в корпусах разной прочности.



Рис. 6 – Ликвидация электронного взрывного пакета:
1 – гидропушка, 2 – электронный ВОП с таймером.

Разрушение с помощью импульсной струи жидкости заключается в том, что струя пробивает и разрушает корпус ВОП, дробит монолит ВВ и разбираывает отдельные его фрагменты за время, меньшее времени срабатывания взрывателей на расстояния, которые больше расстояния возможности индукционной передачи детонации между фрагментами ВВ [23]. Реализации метода гидродинамического обезвреживания ВОП осуществляется с помощью пороховой гидропушки, в которой столб воды разгоняется с помощью взрыва порохового заряда и при истечении из ствола совершает работу по разрушению ВОП.

Применение ГП позволяет обезвредить взрывные устройства, в том числе имеющие прочные стальные корпуса, массу ВВ более 25 кг, установленных как на воздухе, так и под водой на глубинах до 40 м или под слоем грунта толщиной до 200 мм [24]. Некоторые фотографии, иллюстрирующие эффективность разминирования ВОП приведены на рис. 6 и 7.

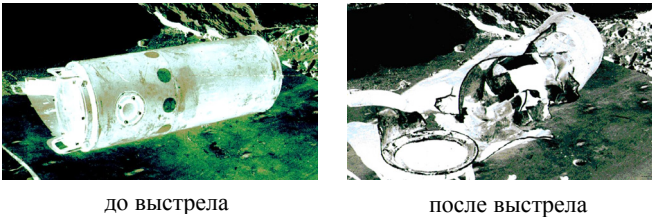


Рис. 7 – Дезактивация морской мины массой 25 кг.

Ультразвук как инструмент тушения факелов и компактных пожаров. Технологические процессы почти во всех газоперерабатывающих и во многих химических производствах особо пожароопасны, поскольку протекают при высоких температурах жидкостей и газов и под высоким, а часто и сверхвысоким давлением (до 245 МПа). Эффективными ингибиторами горения углеводородов являются инертные многоатомные газы: эффективность возрастает в ряду аргон, гелий, азот, CO_2 . Одним из наиболее эффективных ингибиторов являются пары воды – наличие 29% паров воды предотвращает воспламенение метан-воздушной смеси любого состава. Поэтому наибольшее распространение получил способ тушения газовых факелов при помощи тонкораспыленной воды. Основными действующими факторами при тушении факела тонкораспыленной водой является охлаждение горящего материала и образование локализирующего очага горения облака пара. При большой скорости струи жидкости наблюдается отрывное тушение газового факела, при котором струя мелкодисперсных брызг срывает горящий факел [25, 26].

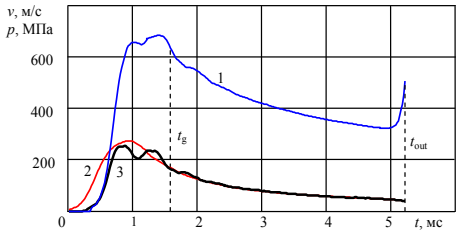


Рис. 8 – Графики зависимости скорости истечения струи и давления внутри ИВ.

Ниже приведены некоторые результаты расчетов параметров порохово-

го ИВ, который использовался для тушения факелов. На рис. 8 приведены графики зависимости скорости истечения струи и давления внутри ИВ от времени для следующих исходных данных: масса водяного заряда 450 г, масса пороха 30 г. Кривая 1 – скорость истечения струи, кривые 2 и 3 – давление пороховых газов в камере сгорания и давление воды по середине ствола ИВ.

Как видно, истечение струи порохового ИВ начинается с нулевой скорости. По мере сгорания пороха скорость истечения быстро возрастает и достигает максимального значения 685 м/с через 1,5 мс от начала выстрела. После сгорания пороха скорость истечения медленно уменьшается до 320 м/с. Истечение струи заканчивается к моменту времени $t_{out} = 5,2$ мс выбросом малой порции воды пороховыми газами с более высокой скоростью.

Проведенные полевые испытания на моделях порохового ИВ и газового факела подтвердили теоретические предположения о возможности тушения газовых факелов с помощью импульсных струй жидкости высокой скорости. В экспериментах варьировалась скорость струи, расстояние до факела и прицельное расстояние от устья скважины. Максимальная расчетная скорость импульсной струи в зависимости от энергии порохового заряда составляла 300 – 600 м/с, что хорошо согласуется с измеренными значениями [25].

На рис. 9 представлена средняя стадия тушения газового факела. Здесь 1 – импульсная струя жидкости, 2 – газовый факел, 3 – модули измерителя скорости головы импульсной струи жидкости. На заднем плане фотографии видна полоса из темного материала с делениями. Расстояние между большими метками равно 1 метру, а между маленькой и большой – 0,5 м. Расстояние от установки до факела 10 м. Модули измерителей скорости 3 были установлены на расстоянии два метра друг от друга вдоль траектории движения импульсной струи жидкости. Всего использовалось 5 модулей.

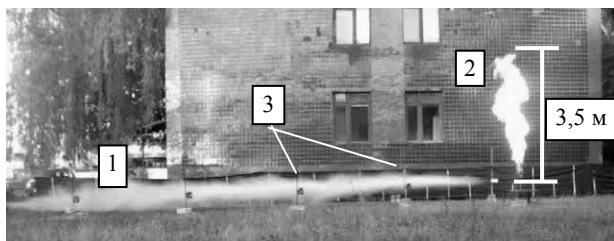


Рис. 9 – Эксперимент по тушению газового факела.

Метод тушения газового факела импульсной струей жидкости высокой скорости основан на отрыве горящего факела от устья скважины. В результате воздействия струи на некоторое время прекращается подача горючей смеси в зону горения, нарушается энергетический баланс реакции горения и горение прекращается. Механизм тушения факела при срыве пламени заключается в том, что струя инертной среды (в данном случае это облако мелкодисперсных брызг воды) имея достаточную скорость, отсекает подачу горючей смеси из устья скважины в зону горения. Экспериментальные исследования показали, что скорость струи для срыва факела должна быть не меньше 80 – 100 м/с. Кроме того, поперечное сечение струи для срыва факела должно быть не меньше поперечного сечения факела в зоне горения. Поперечные

размеры факела в зоне горения в несколько раз превышают поперечные размеры скважины. Размеры факела зависят от диаметра скважины, расхода газа и параметров газа: вязкости, теплопроводности и диффузии.

Выводы. Рассмотрена возможность применения импульсных струй жидкости высокой скорости для решения экологических проблем: разрушения железобетонных изделий и конструкционных материалов, ликвидации взрывоопасных предметов и объектов, тушения газовых факелов и компактных пожаров. Для получения импульсных струй жидкости используются импульсный водомет и гидропушка. Построены физические и математические модели гидроимпульсных установок, разработаны надежные и эффективные численные методы их расчета. Определены тактико-технические параметры гидроимпульсных установок разного назначения, спроектированы и изготовлены экспериментальные образцы, измерены основные гидродинамические параметры, проведены полевые испытания. Результаты экспериментов показали адекватность разработанных моделей, надежность методов и методик расчета, перспективность применения гидроимпульсных технологий.

Список литературы: 1. *Annoni M.* WJ Decoating / *M. Annoni, M. Monno* // Proc. American Water Jet Conference. – Houston, Texas, August 17 – 19, 2003. – Paper 1E. 2. *Fossey R.D.* Improvements in a multi-use waterjet tool for humanitarian demining / *R.D. Fossey, D.A. Summers, J.G. Blaine, G. Galecki, S. Dorle* // Proc. American Water Jet Conference. – Houston, Texas, August 17 – 19, 2003. – Paper 4N. 3. *Сургай Н.С., Коломиец В.С., Зуёков А.Л.* Гидроимпульсная струя на крупноподходящих пластах // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сб. научн. трудов МакНИИ. – 2005. – С. 81 – 89. 4. *Сургай Н.С., Коломиец В.С., Зуёков А.Л.* Применение гидроимпульсных струй – эффективный способ борьбы с выбросами // Уголь Украины. – 2004. – № 10. – С. 28 – 31. 5. *Онацкая Н.А., Демиденко Л.Ю.* Электрогидроимпульсная обработка для упрочнения поверхности крестовин из стали 110Г13МЛС // Автоматическая сварка. – № 3. – 2009. – С. 45 – 46. 6. *Vijay M.* Radiological Decontamination of Armored Personnel Carriers of Continuous and Pulsed Waterjets at UMEA, Shweden / *M. Vijay, W. Yan, A. Tieu* [etc.] // Proc. American Water Jet Conference. – Houston, Texas, August 17 – 19, 2003. – Paper 2E. 7. *Vijay M.M.* Pulsed jets: fundamentals and applications / *M.M. Vijay* // Proc. of the 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology. New Delhi, India, February 3 – 5, 1998, pp. 610 – 627. 8. *Атанов Г.А.* Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. – К.: Вища школа. 1987. – 155 с. 9. *Семко А.Н.* Импульсные струи жидкости высокого давления. – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с. 10. *Семко А.Н.* О влиянии сжимаемости жидкости на параметры гидропушки // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т. 74. – № 1. – С. 1 – 5. 11. *Ryhming J.L.* Analysis of unsteady incompressible jet nozzle flow / *J.L. Ryhming* // J. of Appl. Mathematics and Physics (ZAMP). – 1973. – V. 24. – P. 149–164. 12. *Семко А.Н.* Механика гидропушки с поршневым приводом для идеальной несжимаемой жидкости // Вісник Донецького університету, Серія А. Природничі науки. – 2005. – № 1. – С. 149 – 157. 13. *Гескин Э.С., Русанова О.А., Семко А.Н.* Прочностной расчет и оптимизация сопла ствола пороховой гидропушки // Проблемы прочности. – 2006. – № 2. – С. 137 – 146. 14. *Атанов Г.А.* Пороховая гидропушка широкого спектра действия / *Г.А. Атанов, Э.С. Гескин, А.Н. Семко* и др. // Прикладная гидромеханика. – 2004. – Т. 6 (78). – № 3. – С. 3 – 8. 15. *Атанов Г.А.* The powder hydrocannon / *G.A. Atanov, A.N. Semko* // Proc. International Summer Scientific School «High Speed Hydrodynamics», June 2002, Cheboksary, Russia. – P. 419 – 424. 16. *Петраков А.И.* Разрушение горных пород импульсными струями / *А.И. Петраков, О.Д. Криворотко* // Уголь. 1982. – № 3. – С. 12 – 15. 17. *Галиев Ш.У.* Динамика гидроупругопластических систем. – Киев: Наук. думка. – 1981. – 276 с. 18. *Семко А.Н.* Non-stationary cavitation of a liquid in pulse processes // Proceedings of International Summer Scientific School «High Speed Hydrodynamics» (HSH 2002, June 16–23, 2002). – Cheboksary, Russian / Washington, USA: Cheboksary, Russian, 2002. P. 377–381. 19. *Атанов Г.* Unsteady cavitation in the impulse and wave processes / *G. Atanov, O. Rusanova, A. Semko* // Fifth International Symposium on Cavitation (cav2003). Osaka, Japan, November 1 – 4, 2003. Paper Cav03-OS-7-002. 20. *Counter-Delgosha O.* Numerical prediction of the cavitating flow a two-dimensional symmetrical hydrofoil with a single fluid model / *O. Counter-Delgosha, J. Andre Astolfi* // Proc. 5th International Symposium on

Cavitation (CAV2003), Osaka, Japan, November, 1–4, 2003. Paper CAV03–OS–1–013. – 8 p. **21.** Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. – М.: Машиностроение, 1964. – 406 с. **22.** Семко А.Н., Решетняк В.В. Применение метода Родionoва для расчета квазидвумерных течений сжимаемой жидкости // Тези науково-практичної конференції «Комп'ютерна гідромеханіка». – Київ: ІГМ НАН України, 2008. – С. 44 – 46. **23.** Семко А.Н., Бигвава В.А. Применение импульсных высоконапорных струй жидкости для разрушения взрывоопасных объектов // Вісник Донецького університету, Сер. А: Природничі науки, 2009. – Вип. 2. – С. 325 – 334. **24.** Шаповалов В.Д. Приборы и технологии для чрезвычайных ситуаций // Надзвичайна ситуація, 2007. – №8. – С. 56 – 59. **25.** Семко А.Н., Виноградов С.А., Грицина И.Н. Использование импульсных струй жидкости высокой скорости для тушения газовых факелов // Вісник ДонНУ. Сер.А: Природничі науки, 2011. – Вип. 1. – С. 160 – 167. **26.** Семко А.Н., Бескровная М.В., Украинский Ю.Д., Виноградов С.А., Грицина И.Н. Перспективы применения импульсных струй жидкости для тушения газовых факелов // Вісник НТУ «ХПИ», 2013. – №5(979). – С. 225 – 231.

Bibliography (transliterated): 1. Annoni, M., and M. Monno. "WJ Decoating." *Proc. American Water Jet Conference*. Houston, Texas, August, 17–19. 2003. 1E. Print. **2.** Fossey, R. D., et al. "Improvements in a multi-use waterjet tool for humanitarian demining." *Proc. American Water Jet Conference* Houston, Texas, August, 17–19. 2003. 4H. Print. **3.** Surgaj, N. S., V. S. Kolomic and A. L. Zujkov. "Gidroimpulsnaja struja na krutopadajushih plastah." *Sposoby i sredstva sozdaniya bezopasnyh i zdorovyh uslovij truda v ugol'nyh shahtah. Sb. naych. trudov MakNII*. 2005. 81–89. Print. **4.** Surgaj, N. S., V. S. Kolomic and A. L. Zujkov. "Primenenie gidroimpul'snyh struj – jeffektivnij sposob bor'by s vybrosami." *Ugol' Ukrainy*. No. 10. 2004. 28–31. Print. **5.** Onackaja, N. A., and L. Yu. Demidenko. "Jelektrohidroimpul'snaja obrabotka dlja uprochnenija poverhnosti krestoviny iz stali 110G13MLS." *Avtomaticheskaja svarka*. No. 3. 2009. 45–46. Print. **6.** Vijay, M., at al. "Radiological Decontamination if Armored Personnel Carriers of Continuous and Pulsed Waterjets at UMEA, Shweden." *Proc. American Water Jet Conference*. Houston, Texas, August, 17–19. 2003. 2E. Print. **7.** 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. 610–627. Print. **8.** Atanov, G. A. *Gidroimpul'snye ustanovki dlja razrushenija gornyh porod*. Kiev: Vyshha shkola, 1987. Print. **9.** Semko, A. N. *Impul'snye strui zhidkosti visokogo davlenija*. Donetsk: Veber, 2007. Print. **10.** Semko, A. N. "O vlijanii szhimaemosti zhidkosti na parametry gidropushki." *Journal of Engineering Physics*. Vol. 74. No. 1. 2001. 1–5. Print. **11.** Ryhming, J. L. "Analysis of unsteady incompressible jet nozzle flow." *J. of Appl. Mathematics and Physics (ZAMP)*. Vol. 24. 1973. 149–164. Print. **12.** Semko, A. N. "Mehanika gidropushki s porshnevym privodom dlja ideal'noj neszhimaemoj zhidkosti." *Bulletin of Donetsk National University: Ser. A. Natural Sciences*. Vol. 1. 2005. 149–157. Print. **13.** Geskin, Je. S., O. A. Rusanova and A. N. Semko. "Prochnostnoj raschet i optimizacija sopla stvola porohovoj gidropushki." *Problemy prochnosti*. Vol. 2. 2006. 137–146. Print. **14.** Atanov, G. A., at al. "Porohovaja gidropushka shirokogo spectra dejstvija." *Applied Hydromechanics*. Vol. 6 (78). No. 3. 2004. 3–8. Print. **15.** Atanov, G. A., and A. N. Semko. "The powder hydrocannon." *Proc. International Summer Scientific School «High Speed Hydrodynamics»*. Cheboksary, Russia, June, 2002. 419–424. Print. **16.** Petrakov, A. I., and O. D. Krivorot'ko. "Razrushenie gornyh porod impul'snymi strujami." *Ugol'*. Vol. 3. 1982. 12–15. Print. **17.** Galiev, Sh. U. *Dinamika gidrouprugoplasticheskikh sistem*. Kiev: Naukova dumka, 1981. Print. **18.** Semko, A. N. "Non-stationary cavitation of a liquid in pulse processes." *Proceedings of International Summer Scientific School «High Speed Hydrodynamics»*. Cheboksary, Russian / Washington, USA: Cheboksary, Russian, June, 16–23. 2002. 377–381. Print. **19.** Atanov, G., O. Rusanova and A. Semko. "Unsteady cavitation in the impulse and wave processes." *Fifth International Symposium on Cavitation*. Osaka, Japan, November, 1–4. 2003. Paper Cav03-OS-7-002. Print. **20.** Counter-Delgosha, O., and J. Andre Astolfi. "Numerical prediction of the cavitating flow a two-dimensional symmetrical hydrofoil with a single fluid model." *Proc. 5th International Symposium on Cavitation*. (Osaka, Japan, November, 1–4. 2003. Paper CAV03–OS–1–013. Print. **21.** Orlov, B. V., and G. Yu. Mazing. *Termodinamicheskie i ballisticheskie osnovy projektirovanija raketnyh dvigatelej na tverdom toplive*. Moscow: Mashinostroenie, 1964. Print. **22.** Semko, A. N., and V. V. Reshethjak. "Primenenie metoda Rodionova dlja rascheta kvaziodnomernyh techenij szhimaemoj zhidkosti." *Tezy naukovopraktyčnoj konf. "Komp'juternaja gidromechanika"*. IGM NAN Ukrainy. 2008. 44–46. Print. **23.** Semko, A. N., and V. A. Bigvava. "Primenenie impul'snih visokonapornyh struj zhidkosti dlja razrushenija vzryvoopasnyh ob'jektov." *Bulletin of Donetsk National University: Ser. A. Natural Sciences*. Vol. 2. 2009. 325–334. Print. **24.** Шаповалов, В. Д. "Приборы и технологии длia чрезвычайных ситуаций." *Надзвичайна ситуація*. Vol. 8. 2007. 56–59. Print. **25.** Semko, A. N., S. A. Vиноградов and I.

N. Gricyna. "Ispol'zovanie impul'snyh struj zhidkosti visokoj skorosti dlja tushenija gazovyh fakelov." *Bulletin of Donetsk National University: Ser. A. Natural Sciences*. Vol. 1. 2011. 160–167. Print. 26. Semko, A. N., et al. "Perspektivy primenenija impul'snyh struj zhidkosti dlja tushenija gazovyh fakelov." *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «KhPI»*. *Zbirnyk naukovykh prac'. Ser.: Matematyčne modeljuvannja v tehnič ta tehnologijah*. Vol. 5 (979). 2013. 225–231. Print.

Поступила (received) 11.05.2015

УДК 621.833

В.Н. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГИБКОМ КОЛЕСЕ ВОЛНОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ

Для проверки гибкого колеса волновой зубчатой передачи на изгибную прочность и выносливость предложена методика определения напряжений от изгиба колеса генератором волны упругой деформации с применением теории упругих тонких оболочек. Вычисленные напряжения корректируются с учётом переменной изгибной жесткости в области зубчатого венца и наличия эффекта концентрации напряжений во впадинах между зубьями. Предлагается определить напряжения в двух опасных сечениях – во впадинах между зубьями венца и в области перехода от зубчатого венца к гибкому колесу. При этом для второго сечения расчёт напряжений проводится с учётом передаваемого вращающего момента. Из приведенного примера расчётов видна целесообразность предлагаемого подхода к оценке прочности и выносливости гибкого колеса волновой зубчатой передачи.

Ключевые слова: волновая передача, напряжения, гибкое колесо, теория оболочек.

Введение и постановка задачи. Одним из основных факторов, определяющих ресурс волновой зубчатой передачи – ВЗП, является прочность и выносливость зубчатого гибкого колеса цилиндрической оболочки, закрученной передаваемым вращающим моментом и изогнутой со стороны зубчатого венца генератором волн упругой деформации. Наличие на поверхности оболочки выступов в виде зубьев является фактором, модулирующим изгибную жесткость в области зубчатого венца в окружном направлении и приводящим к росту напряжений изгиба во впадинах между зубьями. У основания зубьев, в местах перехода к гибкому колесу, наблюдается концентрация напряжений. Методика учета переменной изгибной жесткости и концентрации напряжений рассматривалась в работе [1].

Экспериментально установлено, что при недостаточной выносливости усталостные трещины зарождаются во впадинах зубьев, с внутреннего края зубчатого венца в сечении I рис. 1, в местах перехода от зубчатого венца к оболочке.

В вершине волны упругой деформации генератор волн полностью вводит зубья гибкого колеса (ГК) в зацепление с зубьями жесткого, так что грани зубьев ГК располагаются здесь параллельно оси ГК. Это приводит к дополнительной угловой деформации в рассматриваемом сечении, возрастанию изгибающего момента, как это наблюдается в области жесткой заделки консольных балок. При испытаниях ВЗП на выносливость наблюдались поломки гибкого колеса, связанные с образованием трещин не только во впадинах