

УДК 622. 232. 522. 24

О.А. Геммерлинг (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА РАЗРУШЕНИЕ
УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ИМПУЛЬСНОЙ СТРУЕЙ ЖИДКОСТИ**

В работе установлены закономерности изменений энергозатрат на разрушение угольного пласта импульсной струей жидкости на основе математической модели процесса взаимодействия гидроимпульсной струи с угольным массивом и экспериментальных данных

Ключевые слова: энергозатраты, разрушение, уголь, гидроимпульсная струя, математическая модель, эксперимент

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Для создания и обеспечения высокопроизводительной работы гидроимпульсных установок (ГИУ) необходимо обосновать ряд параметров: давление, частоту, шаг разрушения и установить энергетические параметры разрушения угля импульсной струей.

Актуальность работы обусловлена уточнением математической модели процесса взаимодействия гидроимпульсной установки с угольным массивом. Для этого необходимы данные об энергетических показателях разрушения угля импульсной струей жидкости. Это позволит повысить производительность ГИУ и уменьшить удельные затраты энергии при добыче угля.

Анализ исследований и публикаций. В работе [1] описан стенд для проведения исследований изменения силы удара импульсной струи о преграду при прохождении ее по воздушной среде и через слой разрушенного угля. В работе [2] приведены закономерности разрушения угольного массива гидроимпульсной струей жидкости. В работе [3] определена сила удара гидроимпульсной струи при прохождении ее через слой разрушенного угля и по воздушной среде для гидроимпульсных установок, предназначенных для проведения нарезных работ. Работа [4] посвящена определению параметров гидроимпульсных установок для проведения нарезных работ на пластах крутого падения. В работе [5] приведена математическая модель взаимодействия импульсной струи жидкости с разрушаемым массивом угля.

Постановка задачі. Настоящая статья является продолжением указанных работ. Целью данного исследования является определение энергозатрат на разрушение угольного пласта импульсной струей жидкости на основе экспериментальных данных и математической модели процесса взаимодействия гидроимпульсной струи установки с угольным массивом.

Изложение материала и результаты.

Энергетические показатели процесса разрушения при начальном образовании воронок (воронкообразовании) оцениваются следующими величинами: энергоемкостью разрушения \mathcal{E}_e и удельной энергией углубления воронки E_e [4]:

$$\mathcal{E}_e = \frac{A_u}{V_e} = \frac{P_n V_u}{V_e}, \quad (1)$$

$$E_e = \frac{A_u}{h} = \frac{P_n V_u}{h}, \quad (2)$$

где A_u – энергия импульса;

V_e – объем образуемой воронки;

P_n – необходимое для разрушения угля давление импульсной струи;

V_u – объем жидкости в импульсе;

h – глубина воронки.

Определим величины входящие в выражения (1)-(2).

Давление струи ГИУ, необходимое для разрушения угольного пласта, представим в виде

$$P_n = \frac{F}{S_k}; \quad (3)$$

где F - усилие, необходимое для разрушения угля импульсной струей;

S_k – площадь контакта импульсной струи с разрушаемым массивом угля. В первом приближении будем считать, что этой площадью является окружность.

$$S_k = \frac{k_{\varepsilon 1} \pi d_n^2}{4}; \quad (5)$$

где $k_{\varepsilon 1}$ – коэффициент, учитывающий изменение площади контакта струи с угольным массивом при прохождении струей определенного расстояния l [5]. Численное значение данного коэффициента получено экспериментальным путем, см. таблицу 1;

d_n – диаметр насадки установки.

Усилие, необходимое для разрушения массива угля импульсной струей, с учетом принятых допущений [5], запишем в виде

$$F = \begin{cases} k_{oc} k_{cm} A_{pu} l_{ск}; & 0 \leq l_{ск} < l_{ск1}; \\ k_{oc} k_{cm} A_{pu} l_{ск1} \frac{l_{ск2} - l_{ск}}{l_{ск2} - l_{ск1}}; & l_{ск1} \leq l_{ск} < l_{ск2}; \\ 0; & l_{ск2} \leq l_{ск} \leq l_{ск3}; \end{cases} \quad (6)$$

где k_{oc} – коэффициент, учитывающий ослабление угольного пласта трещинами. Для пластов крутого падения Центрального района Донбасса принимаем коэффициент равный 0,75-0,85 [4, 5];

k_{cm} – коэффициент, учитывающий условия разрушения угля импульсной струей (уменьшение передачи энергии струей при увеличении угла расхождения струи: для угла расхождения струи $0^\circ 30' - 0^\circ 45'$, согласно данным [4], коэффициент изменяется от 1,04 до 1,29; изменение поперечного сечения струи из-за нелинейной скорости и аэрацию струи, составляющую 2-3% для расстояния до 1м), $k_{cm}=1,10-1,30$;

A_{pu} – математическое ожидание сопротивляемости угля резанию [4, 5];

$l_{ск}$ – длина скола угля [4, 5].

Таблица 1 – Численные значения коэффициента $k_{эl}$ в зависимости от расстояния l

Расстояние l , м	Значения коэффициента $k_{эl}$
0,1	1,012
0,2	1,024
0,4	1,048
0,6	1,072
0,8	1,096
1,0	1,120

Для характеристики давления, необходимого для разрушения пласта, достаточно использовать в зависимости (6) только первое выражение, которое определяет усилие, необходимое для разрушения угольного пласта [4, 5].

Тогда математическое ожидание силы, необходимой для разрушения массива угля импульсной струей, будет следующим:

$$\begin{aligned}
M_F = k_{oc} k_{cm} \iint_{-\infty}^{\infty} f(Z) & \left[\frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \int_{\frac{Z}{A_{pu}}}^{\infty} A_{pu} l_{ск} e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left(\frac{l_{ск} - c}{a} \right)^b \right]} \times \right. \\
& \times \left(\frac{l_{ск} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ск} + \frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} \sqrt{2\pi}} + \\
& \left. + \int_0^{\frac{Z}{A_{pu}}} \int_{-\infty}^{\infty} A_{pu} l_{ск} e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left(\frac{l_{ск} - c}{a} \right)^b \right]} \left(\frac{l_{ск} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ск} \right] dA_{pu} dl_{ск}.
\end{aligned}$$

где a, b, c - параметры распределения, учитывающие соответственно масштаб, форму и сдвиг кривой распределения; $Z = A_{pu} l_{ск}$.

Давление, необходимое для разрушения пласта, является случайной двухпараметрической величиной, обусловленной сопротивляемостью угля разрушению с распределением вероятности по закону Гаусса и длиной скола с распределением вероятности по закону Вейбулла [4, 5]. На основании этого получим

$$P_n = \frac{4 k_{oc} k_{cm} A_{pu} l_{ск}}{k_{э1} \pi d_n^2}. \quad (7)$$

Обозначим постоянные величины в выражении (7) через

$$\Omega = \frac{4 k_{oc} k_{cm}}{k_{э1} \pi}. \quad (8)$$

Тогда выражение (6) с учетом (7) примет вид

$$P_n = \frac{\Omega}{d_n^2} A_{pu} l_{ск}. \quad (9)$$

Приняв, что $Z = A_{pu} l_{ск}$ получим выражение закона распределения давления, необходимого для разрушения массива угля импульсной струей

$$\begin{aligned}
P_H(A_{pu}, l_{ck}) &= \frac{\Omega b}{a \sigma_{A_{pu}} d_H^2 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \int_{\frac{Z}{A_{pu}}}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \times \\
&\times \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} + \frac{\Omega b}{a \sigma_{A_{pu}} d_H^2 \sqrt{2\pi}} \times \\
&\times \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\frac{Z}{A_{pu}}} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck}.
\end{aligned}$$

Тогда математическое ожидание давления, необходимого для разрушения массива угля импульсной струей, будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
M_{P_H} &= \Omega \iint_{-\infty}^{\infty} f(Z) \left[\frac{b}{a \sigma_{A_{pu}} d_H^2 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \int_{\frac{Z}{A_{pu}}}^{\infty} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \times \right. \\
&\times \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} + \frac{\Omega b}{a \sigma_{A_{pu}} d_H^2 \sqrt{2\pi}} + \\
&\left. + \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\frac{Z}{A_{pu}}} A_{pu} l_{ck} e^{-\left[\frac{(A_{pu} - \bar{A}_{pu})^2}{2\sigma_{A_{pu}}^2} + \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^b \right]} \left(\frac{l_{ck} - c}{a} \right)^{b-1} dA_{pu} dl_{ck} \right] dA_{pu} dl_{ck}.
\end{aligned}$$

Объем образуемой воронки V_v и ее глубина h определялись экспериментально при разрушении угольного блока [2, 3, 4]. При проведении эксперимента фиксировались параметры образуемых импульсной струей воронок: наружный D и внутренний d диаметры, глубина h , в зависимости от числа импульсов струи N при фиксируемых параметрах импульсной струи: давлении на входе P_{ex} и выходе P_u генератора импульсов, напряжении сжатия угля, частоты ν и длительности импульсов τ_u (см. табл. 2). Форма получаемых воронок представляет собой усеченный конус. Общий вид и фотография полученных

воронок при параметрах струи $P_{ex}=30$ МПа, $P_u=25$ МПа, $d_n=10$ мм, $\tau_u=14$ мс, $N=1$ показаны на рис. 1, 2.

Объем жидкости в импульсе V_u определялся экспериментально при помощи специального ловителя. При определении объема импульса число импульсов N изменялось от 1 до 9, проводилось не менее 5 повторных опытов для каждого значения N . Средняя величина объема воды одного импульса струи составляет 0,23л. Отличие экспериментально определенного объема воды в импульсе от объема, обусловленного конструкцией генератора импульсной струи, составляет около 2%.

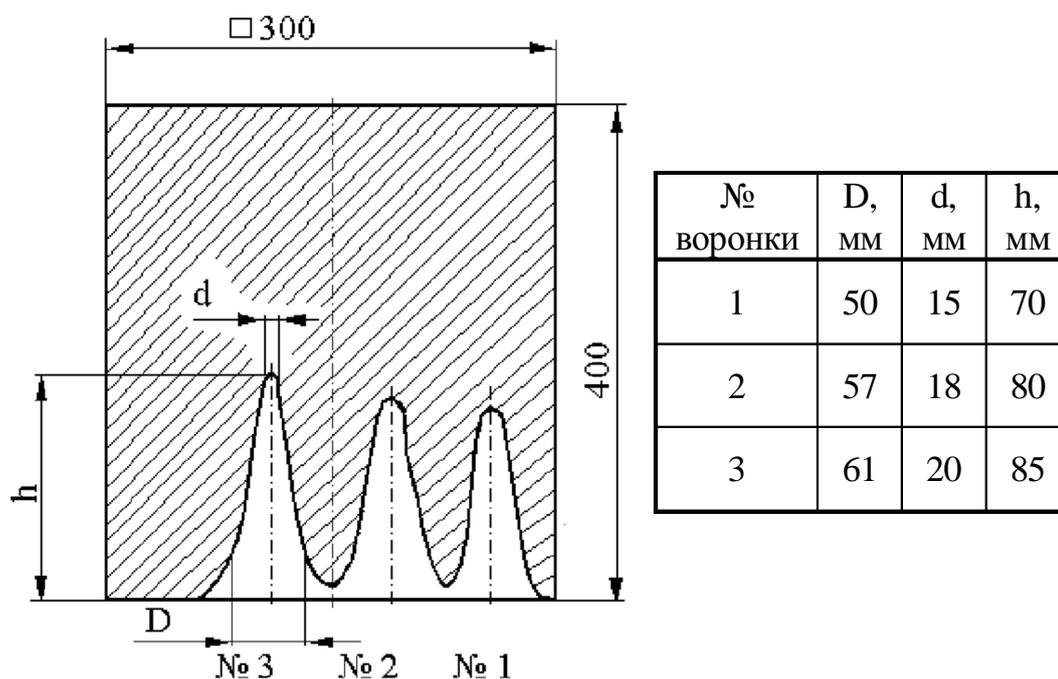


Рис. 1 – Параметры образуемых воронок при одиночных импульсах струи

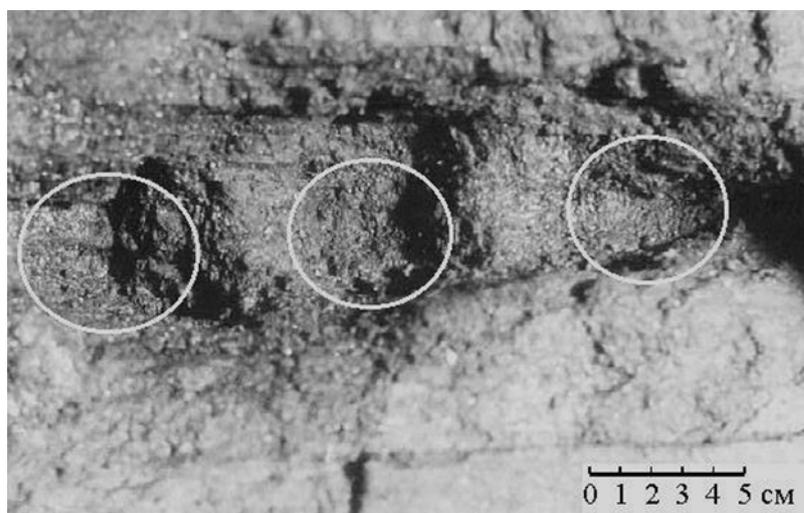


Рис. 2 – Образующиеся воронки при одиночных импульсах струи

Энергоемкость разрушения \mathcal{E}_e и удельную энергию углубления воронки E_e с учетом выражений (3-9) запишем в виде

$$\mathcal{E}_e = \frac{\Omega A_{pu} l_{ск} V_u}{d_n^2 V_e}, \quad (10)$$

$$E_e = \frac{\Omega A_{pu} l_{ск} V_u}{d_n^2 h}. \quad (11)$$

Параметры разрушения угольного блока, параметры импульсной струи и полученные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Параметры разрушения угольного блока

Параметры струи			Параметры воронки				Энергетические показатели разрушения		
P_u , МПа	τ_u , мс	N	D, мм	d, мм	h, мм	V_e , см ³	A_u , кДж	E_e , кДж/см	\mathcal{E}_e , кДж/см ³
25,0	13,8	1	59	17	78	97,5	57,2	7,33	0,587
25,5	13,0	2	68	20	153	255,7	115,8	7,57	0,453
24,8	14,0	3	68	19	200	328,7	172,7	8,64	0,525
25,5	13,0	5	65	20	250	387,8	289,9	11,60	0,749
25,0	13,0	6	70	20	260	456,1	347,4	13,36	0,762
25,0	12,0	7	75	20	280	615,8	404,9	14,46	0,659
25,0	13,0	10	85	21	320	791,8	577,4	18,04	0,729
25,0	13,0	11	90	21	340	940,3	634,9	18,67	0,675

Энергетические показатели разрушения угля при образовании воронок (см. табл. 2) определялись с учетом количества импульсов струи N по отдельному участку угольного образца для отдельного опыта.

При образовании воронки одним импульсом ($N=1$) энергоемкость разрушения (рис. 3) достигает величины $0,6$ кДж/см³ (120 кВт·ч/т), при увеличении количества импульсов до двух происходит снижение \mathcal{E}_e до $0,45$ кДж/см³ (90 кВт·ч/т), при $N=3$ энергоемкость незначительно возрастает до $0,52$ кДж/см³ (110 кВт·ч/т), при $N=5$ и более импульсов энергоемкость стабилизируется на величине около $0,72$ кДж/см³ (142 кВт·ч/т). Таким образом, видно, что при 2-3 импульсах струи в одну точку угольного массива происходит снижение энергоемкости разрушения \mathcal{E}_e в 1,1-1,3 раза, по сравнению с энергоемкостью на образование воронки одним импульсом. Поэтому, для эффективного разрушения угольного массива гидроимпульсной струей, ГИУ

должна обеспечивать 2-3 импульса струи в одну точку забоя (в начальную воронку) и после перемещаться в следующую точку разрушения с определенным шагом.

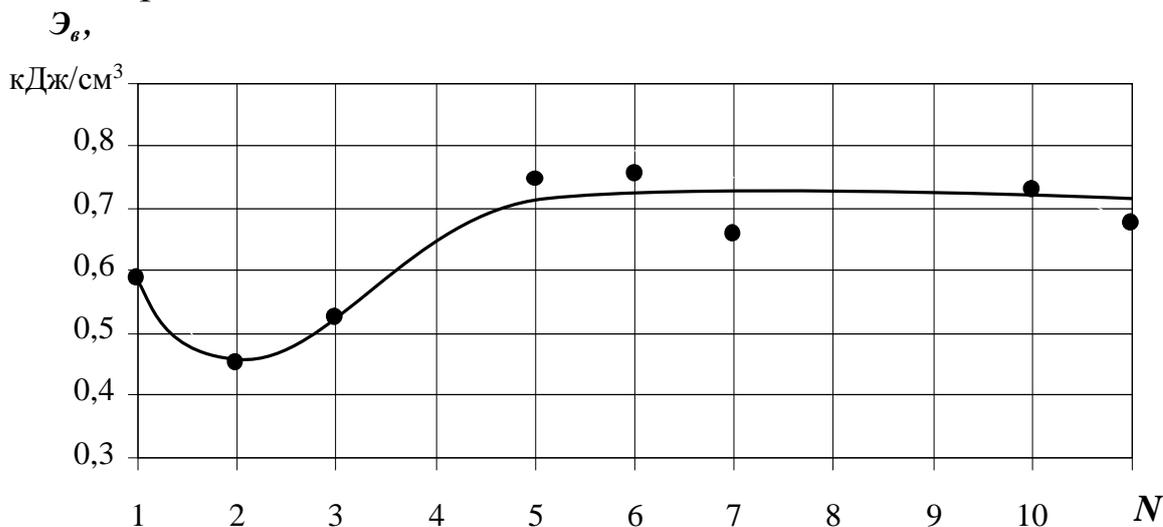


Рис. 3 – Энергозатраты на разрушение угля

Выводы и направления дальнейших исследований.

В работе доказано, что для эффективного разрушения угольного массива гидроимпульсной струей необходимо обеспечивать 2-3 импульса струи в одну точку забоя и после перемещаться в следующую точку разрушения угольного массива. Установленные закономерности энергетических показателей разрушения угольного пласта импульсной струей жидкости будут использоваться при усовершенствовании математической модели процесса взаимодействия гидроимпульсной установки с угольным массивом и при проектировании новых гидроимпульсных установок для проведения добычных работ на пластах крутого падения.

В дальнейшем, с целью уточнения полученных зависимостей, планируется провести экспериментальные исследования в шахтных условиях на реальном пласте угля.

Список литературы

1. Бойко Н.Г. Потери энергии гидроимпульсной струи и ее КПД / Н.Г. Бойко, О.А. Геммерлинг // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-електромеханічна. – 2002. – Вип. 51. – С. 37-41.
2. Геммерлинг О.А. Установление закономерностей разрушения угольного массива импульсной струей жидкости / О.А. Геммерлинг // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-електромеханічна. – 2004. – Вип. 83. – С. 64-70.
3. Бойко Н.Г. Определение силы удара гидроимпульсной струи при прохождении ее через слой разрушенного угля и по воздушной среде / Н.Г. Бойко, О.А. Геммерлинг // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-електромеханічна. – 2008. – Вип. 16(142). – С. 10-15.

4. Геммерлінг О.А. Обґрунтування параметрів гідроімпульсної установки для проведення нарізних робіт на пластах крутого падіння: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.06 «Гірничі машини» / О.А. Геммерлінг. – Дніпропетровськ, 2007. – 19 с.
5. Бойко Н.Г. Математическая модель процесса разрушения угольного массива гидроимпульсной установкой / Н.Г. Бойко, О.А. Геммерлинг // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-електромеханічна. – 2009. – Вип. 17(157). – С. 93-101.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2012

О.А. Геммерлінг. Донецький національний технічний університет

Визначення енерговитрат на руйнування вугільного пласта імпульсним струменем рідини

У роботі визначені закономірності змін енерговитрат на руйнування вугільного пласта імпульсним струменем рідини на основі математичної моделі процесу взаємодії гідроімпульсного струменя з вугільним масивом і експериментальних даних. Наведено аналітичні формули для розрахунку: зусилля і математичного очікування тиску, необхідного для руйнування вугільного масиву імпульсним струменем, енергоємності руйнування і питомої енергії поглиблення воронки. Здобутий експериментальний матеріал наведено у зручному вигляді: табличному і графічному. Доведено, що для ефективного руйнування вугільного масиву імпульсним струменем, установка повинна забезпечити 2-3 імпульси струменя в одиночну точку вибою і після переміщуватися у наступну точку руйнування вугілля.

Ключові слова: енерговитрати, руйнування, вугілля, імпульсний струмінь, математична модель, експеримент

O. Gemmerling. Donetsk National Technical University

Estimating Power Inputs for Coal Seam Destruction with an Impulse Liquid Jet.

We estimated the regularities of power inputs change while destroying a coal seam with an impulse jet. The estimation was made using experimental data and mathematical models of interaction of the impulse jet with the destroyed coal massif. The paper provides analytical formulas for calculating the effort and mathematical expectation of the pressure necessary for coal massif destruction with an impulse jet. We also provide formulas for estimating power consumption in the process of destruction and for calculating specific energy of whirlpool deepening. The obtained experimental data are presented in a convenient form, as tables and graphs. It is proved that effective coal massif destruction requires 2-3 jet impulses in one point of the coal massif.

Keywords: power inputs, destruction, coal, impulse jet, mathematical model, experiment.