

УДК 622.81:534.222.2

*Н.Н. Налисько, канд. техн. наук, доц. Стахановского учебно-научного института горных и образовательных технологий Украинской инженерно-педагогической академии, Стаханов*

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН СО СТЕНКАМИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

*N.N. Nalisyko, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. (Stakhanov educational and scientific institute of mining and educational technologies of the Ukrainian engineering and pedagogical Academy, Stakhanov)*

### INTERACTION OF AIR SHOCK WAVES WITH THE WALLS OF MINE WORKINGS

**Цель.** Обоснование методики расчета параметров затухания ударных воздушных волн по фактору взаимодействия газового потока со стенками горных выработок.

**Методика.** Критический анализ и обобщение теоретических исследований. Численный эксперимент по распространению ударных воздушных волн, анализ результатов этого эксперимента.

**Результаты.** Разработана методика расчета параметров торможения газового потока за счет трения о стенки выработки, пригодная для использования в схеме численного счета.

**Научная новизна.** Обоснована методика расчета параметров торможения газового потока за счет трения о стенки выработки, максимально отражающая действительные физические процессы течения газов в шероховатом канале.

**Практическая значимость.** Принятая методика расчета потерь энергии ударной воздушной волны позволяет определить наиболее близкие к реальным значениям параметры торможения газового потока за счет трения о стенки выработки.

**Ключевые слова:** газовый поток, коэффициент шероховатости, сила трения, торможение, численный расчет, нестационарный процесс.

**Постановка проблемы.** Проблема локализации взрывов метана в угольных шахтах в комплексе мероприятий по обеспечению безопасности работ продолжает оставаться актуальной. К задачам, вытекающим из указанной проблемы, относится установление достоверных параметров распространения ударных воздушных волн по сети горных выработок. Достоверность полученных результатов расчета может быть достигнута путем выбора максимально приближенной к реальному процессу математической модели и полнотой учета факторов, влияющих на процесс распространения ударных воздушных волн, в том числе и учета взаимодействия этих волн со стенками выработок.

**Анализ последних исследований.** Одним из перспективных направлений в решении задач резко нестационарных процессов является использование численных методов расчета. В работе [4] предложено решение задачи распространения ударных воздушных волн по горной выработке с помощью схемы численного счета уравнений газовой динамики модифицированным методом «крупных частиц». В задаче учитывается фактор падения энергии движения газового потока за счет вовлечения в движение и нагревание

возрастающих с расстоянием объемов воздушных масс. На данном этапе в решении задачи не учитывалось действие сил трения потока газа о стенки выработки.

Значительные результаты в этом направлении получены НИИГД «Респиратор». В работе [1] предложено решение задачи распространения ударных воздушных волн путем численного решения уравнений газовой динамики разностной схемой. Для моделирования диссипации энергии потока на трение используется классическое решение для численных схем счета – условие прилипания пристеночного слоя газового потока к твёрдым стенкам.

В совместных работах Томского политехнического института, РосНИИГД и Института угля СО РАН приводится численное решение задач газовой динамики методом С.К. Годунова [3]. Для расчета взаимодействия газового потока со стенками выработки используют математические зависимости механики движения жидкости и газа в каналах.

**Цель исследования.** Развитие математической модели процесса распространения ударных воздушных волн по горным выработкам путем обоснования методики расчета параметров затухания этих волн при взаимодействии газового потока со стенками горных выработок.

**Материалы и результаты исследований.** В работе [4] математическая постановка задачи распространения ударных воздушных волн в выработке сводится к рассмотрению движения газового потока в цилиндрическом канале с эквивалентным диаметром. Задача решалась путём использования методов численного счёта уравнений гидродинамики в системе «газовая взрывчатая среда – окружающая среда».

Движение среды в цилиндрической системе координат описывают уравнения Эйлера (в дивергентном виде):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho W) &= 0; && \text{неразрывности} \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u W) + \frac{\partial P}{\partial z} &= \tau_{\text{тр}} \frac{\Pi}{S} dz; \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v W) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0; \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E W) + \operatorname{div}(\rho P W) &= q \Pi dz, && \text{энергии} \end{aligned} \right\} \text{движения} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$P$  – давление, Па;

$W$  – вектор скорости, м/с;

$u, v$  – компоненты скорости  $W$  по оси  $z$  и  $r$  соответственно, м/с;

$z, r$  – цилиндрические координаты;

$E = J + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$  – полная энергия, Дж;

$J$  – внутренняя энергия газа, Дж;

$\tau_{\text{тр}}$  – сила трения газового потока о стенки выработки;

$q$  – интенсивность теплового потока, Дж/(м<sup>2</sup>·с);  
 $\Pi, S$  – соответственно периметр и сечение выработки, м.

В правой части уравнения движения учитывается взаимодействие газового потока со стенками выработок в форме торможения потока за счет силы трения  $\tau_{\text{тр}}$ . Методика реализации диссипации энергии в численном расчете основана на известном представлении механики движения вязкого сжимающегося газа в канале: газ непосредственно около стенки канала не скользит вдоль, а прилипает к ней. Это, в конечном итоге, вызывает торможение всего потока. В численном расчете этот фактор учтен в граничных условиях:  $u = 0$ , где  $u$  – компонента скорости газового потока, направленного вдоль стенки канала. Однако такого подхода недостаточно для моделирования нестационарных процессов, так как он удовлетворительно работает в области устоявшегося движения. Известно, что потери напора на трение при ускоренном движении должны быть больше, чем при стационарном течении. Обычно для конкретных задач коэффициент трения в нестационарных течениях находят экспериментальным путем.

Вторая причина недостаточности – это отсутствие учета влияния шероховатости (неровности) стенки выработки. Рассмотренные выше предположения работают в модели канала с «технически гладкой стенкой». Технически гладкий канал – имеется в виду определенный минимальный уровень потерь на трение, остающийся постоянным при уменьшении шероховатости стенки [5]. В шахте прямолинейность стенок выработок является условием отнюдь не тривиальным и любое изменение направления движения воздуха за счет выступов крепи или других элементов влечёт за собой дополнительные потери. В настоящее время аналитических решений для определения коэффициентов затухания ударных воздушных волн за счет шероховатости стенки не получено. В известных исследованиях коэффициент трения определялся экспериментальным путем. Некоторые ученые коэффициент шероховатости исследовали на модели ударной трубы. Шероховатость стенок выработки моделировали стальной спиралью с различным шагом и толщиной прутка. В этих работах получены эмпирические значения коэффициента шероховатости для определенных условий.

В численном расчете [4] состояние стенки выработки и нестационарность процесса предложено учитывать зависимостью теории гидродинамики для течения жидкости и газов в шероховатых каналах [2]. Такой подход реализован в работе [3]. Силу трения потока о стенки определяют из выражения

$$\tau_{\text{тр}} = f \rho u^2, \quad (2)$$

где  $\rho, u$  – соответственно плотность и скорость потока газа, кг/м<sup>3</sup>; м/с;  
 $f$  – коэффициент сопротивления трения воздуха о стенки.

В работе [3] коэффициент  $f$  определяют по формуле  $f = \frac{1}{8} c_f$ , где  $c_f$  – коэффициент сопротивления трения Фаннинга. Однако эта формула может

давать значительную погрешность, так как константа  $\frac{1}{8}$  применяется к безразмерному коэффициенту сопротивления Шлихтинга  $f = \frac{1}{8}\lambda$  и работает для условий технически гладких каналов. В условиях шероховатых каналов необходимо использовать константу  $\frac{1}{2}$ .

Один из способов расчета коэффициента сопротивления Фаннинга – использование формул, основанных на полуэмпирических теориях. В работе [3] использована формула Никурадзе [5]:

$$c_f = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}}, \quad (3)$$

где  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\text{Re} = \frac{\rho u D_{\text{экв}}}{\mu}$ ;

$\mu$  – динамическая вязкость газа, Па·с;

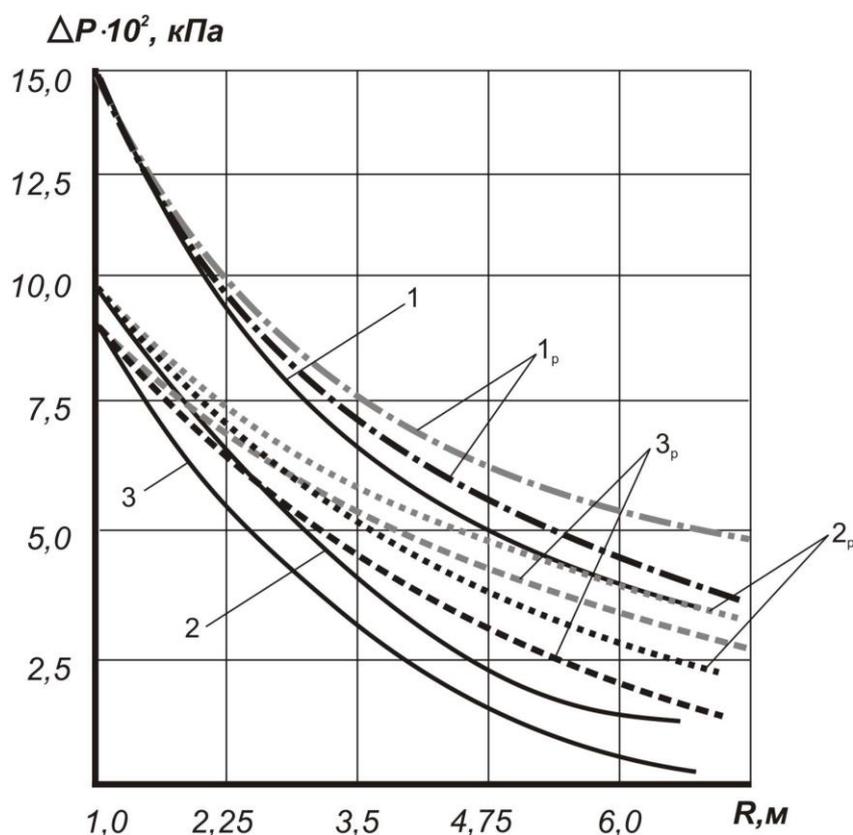
$D_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр цилиндрического канала, м.

Для условий горных выработок соотношение (3) применять не совсем корректно, так как в нем учитывается только характеристика потока газа и совершенно не учитывается шероховатость поверхности, что в горных выработках является значительным фактором. Так же формула (3) применяется в ограниченном интервале числа Рейнольдса ( $\text{Re} = 10^5 \dots 10^6$ ), что может приводить к погрешностям в сквозном счете, так как в численной схеме во всей расчетной области используется единый алгоритм для возмущенных и невозмущенных областей.

Для надежного расчета коэффициента сопротивления трения Фаннинга  $c_f$  необходимо использовать специальные номограммы [5], по которым в технически неограниченном диапазоне можно определить искомую величину в зависимости от  $\text{Re}$  и относительной шероховатости  $h/D_{\text{экв}}$ , где  $h$  – характерный (средний) размер выступа крепи на стенке, м;  $D_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр выработки, м.

В качестве критерия адекватности рассмотренной методики расчета параметров торможения газового потока в ранее разработанной схеме численного счета [4] была принята сходимость результатов расчета с известными экспериментальными данными. В связи с тем, что в расчете учитываются не все факторы, влияющие на распространение ударных воздушных волн, а также не полное подобие взрывов конденсированных ВВ и газовых смесей, сопоставления можно выполнять по относительным значениям параметров ударных воздушных волн: степени изменения амплитуды на единичных участках выработки, в ближней и дальней зоне действия ударных воздушных волн. Абсолютные значения амплитуды избыточного давления и импульса ударных воздушных волн могут служить для ориентиров в оценке.

В работе [4] приводятся результаты лабораторных экспериментальных взрывов конденсированных ВВ в ударной трубе, выполненных А.А. Гуриным, П.С. Малым, С.К. Савенко (см. рисунок).



Графики изменения давления во фронте ударной воздушной волны в ударной трубе при различной шероховатости ее стенок:

- 1, 2, 3 – экспериментальные кривые при  $\beta=0,01$ ,  $\beta=0,03$ ,  $\beta=0,05$ ;  
 $1_p$ ,  $2_p$ ,  $3_p$  – расчетные кривые для тех же значений начальных  $\Delta P$

Для сопоставления результатов проведена серия численных экспериментов, в которых начальное избыточное давление задавали в диапазоне, соответствующем условиям лабораторных взрывов (на рисунке – ось ординат): 0,85; 0,95; 1,5 МПа. Графики, отражающие результаты (линии .....), наложены сверху на графики экспериментальных данных об ударной трубе. Более светлые копии расчетных линий показывают падение избыточного давления без учета потерь энергии ударной воздушной волны на трение. Для сопоставимости результатов в численном расчете относительная шероховатость  $h/D$  задавалась таким образом, чтобы она соответствовала коэффициенту шероховатости  $\beta$ , который определяется «от обратного» по падению избыточного давления.

Графики численного эксперимента имеют более пологое убывание из-за отсутствия на данный момент учета теплообмена и других факторов торможения газового потока.

**Выводы.** Таким образом, используя в схеме численного счета [4] рассмотренную методику, можно определить близкие к реальным значениям параметры торможения газового потока за счет трения о стенки выработки. Эти параметры учитывают диссипацию энергии потока газа на контакте со стенкой, дополнительное торможение от неровностей (выступы крепи), увеличение тормозящего эффекта при турбулизации потока.

#### Список литературы / References

1. Агеев В.Г. Моделирование распространения ударных волн при мгновенной и цепной реакциях горения метана и пыли в горных выработках / В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко // Форум гірників – 2012: матер. Міжнар. конф., 3-6 жовтня 2012 г., Дніпропетровськ, Україна. – Дніпропетровськ: НГУ, 2012. – С. 12 – 17.

Ageyev, V.G. and Zinchenko, I.N. (2012), *Modelirovanie rasprostraneniia udarnykh voln pri mgnovennoi i tsepnoi reaktsiiaakh goreniiia metana i pyli v gornykh vyrabotkakh* [The modeling of spread of shock waves by hair-trigger and chain reactions of the methane and dust burning in mine workings], NGU, Dnepropetrovsk, Ukraine.

2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

Loytsyansky, L.G. (2003), *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of fluid and gas], Drofa, Moscow, Russia.

3. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов, Д.Ю. Палеев и др. // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3, № 2. – С. 155–163.

Vasenin, I.M., Shragger, E.R., Kraynov, A.Yu., Paleyev, D.Yu. etc (2011), *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov ventilatsii seti vyrabotok ugolnoi shakhty* [Mathematical modeling of ventilation transient processes of the network of mine workings of the coal mine], *Kompiuternye issledovaniia i modelirovanie*, vol. 3, no. 2, pp. 155-163.

4. Чернай А.В. Обоснование разработки новых подходов к расчету параметров распространения воздушных ударных волн в горных выработках / А.В. Чернай, Н.Н. Налисько // Техногенні катастрофи: матер. 3-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 22-24 травн. 2013 г., Дніпропетровськ, Україна. – Дніпропетровськ: НГУ, 2013. – С. 132 – 143.

Chernay, A.V. and Nalisyko, N.N. (2013), *Obosnovanie razrabotki novykh podkhdov k raschotu parametrov rasprostraneniia vozdushnykh udarnykh voln v gornykh vyrabotkakh* [Sudstantiation of the working-out of new approaches to calculation of parameters of spread of air shock waves in mine workings], NGU, Dnepropetrovsk, Ukraine.

5. Широков Н.Н. Введение в механику жидкости и газа / Н.Н. Широков, Э.Н. Вознесенский. – М.: МФТИ, 2007. – 324 с.

Shirokov, N.N. and Voznesensky, E.N. (2007), *Vvedenie v mekhaniku zhidkosti i gaza* [Introduction in the mechanics of fluid and gas], MFTI, Moscow, Russia.

*Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Н. Зинченко.  
Дата поступления рукописи 18.07.2014*

**Ціль.** Обґрунтування методики розрахунку параметрів загасання ударних повітряних хвиль по фактору взаємодії газового потоку зі стінками гірничих виробок.

**Методика.** Критичний аналіз та узагальнення теоретичних досліджень. Чисельний експеримент з поширення ударних повітряних хвиль, аналіз результатів експерименту.

**Результати.** Розроблено методику розрахунку параметрів гальмування газового потоку за рахунок тертя об стінки виробки, яка придатна для використання в схемі чисельного рахунку.

**Наукова новизна.** Обґрунтовано методику розрахунку параметрів гальмування газового потоку за рахунок тертя об стінки виробки, яка максимально відображає дійсні фізичні процеси течії газів у шорсткому каналі.

**Практична значущість.** Прийнята методика розрахунку втрат енергії ударних повітряних хвиль дозволяє визначити найбільш близькі до реальних значень параметри гальмування газового потоку за рахунок тертя об стінки виробки.

**Ключові слова:** газовий потік, коефіцієнт шорсткості, сила тертя, гальмування, чисельні розрахунки, нестационарний процес.

**Purpose.** Substantiation of the methods for calculation of parameters of attenuation of the air shock waves according to the factor of interaction of the gas flow with the walls of the mine workings.

**Methodology.** Critical analysis and generalization of theoretical investigations. Numerical experiment on spread of the air shock waves, analysis of the results of this experiment.

**Results.** The methods of calculation of the parameters of the gas flow braking at the expense of friction against the walls of the working suitable for application in the numerical calculation outline have been worked out.

**Scientific novelty.** The methods of calculation of the parameters of the gas flow braking at the expense of friction against the walls of the working that reflect the real physical processes of the gas flow in the rough canal as much as possible have been substantiated.

**Practical value.** The methods of calculation of the energy losses of the air shock wave accepted allow us to determine the nearest to real values parameters of braking the gas flow at the expense of friction against the walls of the working.

**Keywords:** gas flow, friction factor, friction force, braking, numerical calculation, transient process.