

ПАРАМЕТРЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН С УЧЕТОМ ИХ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО СТЕНКАМИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Н.Н. Налисько, Стахановский учебно-научный институт горных и образовательных технологий Украинской инженерно-педагогической академии, Украина

Обоснована методика расчета параметров торможения газового потока за счет трения о стенки выработки максимально отражающая действительные физические процессы течения газов в шероховатом канале. Предложенная методика пригодная для использования в схеме численного счета. Приведены результаты численного эксперимента по распространению ударных воздушных волн, с учетом трения.

Состояние вопроса, выделение нерешенной части проблемы. Проблема локализации взрывов метана в угольных шахтах продолжает оставаться актуальной в комплексе мероприятий по обеспечению безопасности работ. К числу задач, вытекающих из указанной проблемы, относится задача установления достоверных параметров распространения ударных воздушных волн (УВВ) 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 УВВ, в т.ч. и учета силового взаимодействия УВВ со стенками выработок.

Одним из перспективных направлений в решение задач резко нестационарных процессов является использование численных методов расчета. В работе [1] предложено решение задачи распространения УВВ 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 нагрев возрастающих с расстоянием воздушных масс. На данном этапе в решении задачи не учитывалось действие сил трения потока газа о стенки выработки.

Значительные результаты в этом направлении получены исследования НИИГД «Респирактор». В работе [2] предложено решение задачи распространения УВВ, 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 твердым 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 силового взаимодействия газового потока со стенками выработки используются математические зависимости механики движения жидкости и газа в каналах.

Цель статьи. Постановка задачи. Развитие математической модели процесса распространения УВВ по горным выработкам путем обоснования методики расчета параметров затухания ударных воздушных волн по фактору силового взаимодействия газового потока со стенками горных выработок.

Основной материал. В работе [1] математическая постановка задачи распространения УВВ 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 описывается уравнениями Эйлера (в дивергентном виде):

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

где ρ – плотность; P – давление; W – скорость; u, v – компоненты скорости W по оси z и r соответственно; z, r – цилиндрические координаты; $E = J + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$ – полная энергия; τ_{mp} – сила трения газового потока о стенки выработки; q – плотность теплового потока в стенку выработки, Дж/(м²·с); Π – периметр выработки, м.

В правой части уравнения движения учитывается силовое взаимодействие газового потока со стенками выработок в форме торможения потока за счет силы трения τ_{mp} . 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 стенки, а прилипает к ней. Это в конечном итоге вызывает торможение всего потока. В численном расчете этот фактор учитывается в граничных условиях: $u = 0$, где u – компонента скорости газового потока направленная вдоль стенки канала. Однако, такой подход является недостаточным для моделирования нестационарных процессов, т.к. 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 [4].

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 УВВ за счет шероховатости стенки не получено. В известных исследованиях коэффициент трения определялся экспериментальным путем. Например, в работе [6] коэффициент шероховатости исследовался на модели ударной трубы. Шероховатость стенок выработки моделировалась стальной спиралью с различным шагом и толщиной прутка. В этих работах получены эмпирические значения коэффициента шероховатости для определенных условий.

Для учета в численном расчете [1] состояния стенки выработки и нестационарности процесса предлагается использовать зависимости теории гидродинамики для течения жидкости и газов в шероховатых каналах [7]. Такой подход реализован в работе [3]. Сила трения потока о стенки определяется из выражения:

$$\tau_{\partial \delta} = f \rho u^2, \quad (2)$$

где ρ, u – соответственно плотность и скорость потока, кг/м³; м/с;
 f – коэффициент сопротивления трения воздуха о стенки.

В работе [3] коэффициент f определяется по формуле: $f = \frac{1}{8} \tilde{n}_f$, где c_f – коэффициент сопротивления трения Фаннинга. Однако эта формула может давать значительную погрешность, т.к. 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 $\frac{1}{2}$ [8].

Одним из способов расчета коэффициента сопротивления трения Фаннинга является использование формул, основанных на полуэмпирических теориях. В работе [3] используется формула Никурадзе [5]:

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

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

μ – динамическая вязкость газа, Па·с;


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

Для условия горных выработок соотношение (3) применять не совсем корректно, т.к. в нем учитывается только характеристика потока газа (через число Рейнольдса) 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, т.к. в численной схеме во всей расчетной области используется единый алгоритм для возмущенных и не возмущенных областей.

Для надежного расчета коэффициента сопротивления трения Фаннинга (c_f) необходимо использовать данные [8], где по номограмме в технически неограниченном диапазоне можно определить искомую величину в зависимости от 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 [1] была принята сходимость результатов расчета с известными экспериментальными данными. В связи с тем, что в расчете учитываются не все факторы, влияющие на распространение УВВ, а также не полное подобие взрывов конденсированных ВВ и газовых смесей, сопоставления можно выполнять по относительным значениям параметров УВВ: степени изменения амплитуды на единичных участках выработки, в ближней и дальней зоне действия УВВ. Абсолютные значения амплитуды избыточного давления и импульса УВВ могут служить для ориентиров в оценке.

В работе [6] приводятся результаты лабораторных (в ударной трубе) экспериментальных взрывов конденсированных ВВ (рис. 1).

Для сопоставления результатов, была проведена серия численных экспериментов, в которых начальное избыточное давление задавалась в диапазоне соответствующем условиям лабораторных взрывов (рис. 1, ось ординат): 0,85; 0,95; 1,5 МПа. Графики результатов (линии ) наложены сверху на графики экспериментальных данных по ударной трубе. Более светлые копии расчетных линий показывают падение избыточного давления без учета потерь энергии УВВ на трение. Для сопоставимости результатов, в численном расчете относительная шероховатость h/D задавалась таким образом, чтобы она соответствовала коэффициенту шероховатости β , который в работе [6] определяется «от обратного» по величине падения избыточного давления.

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

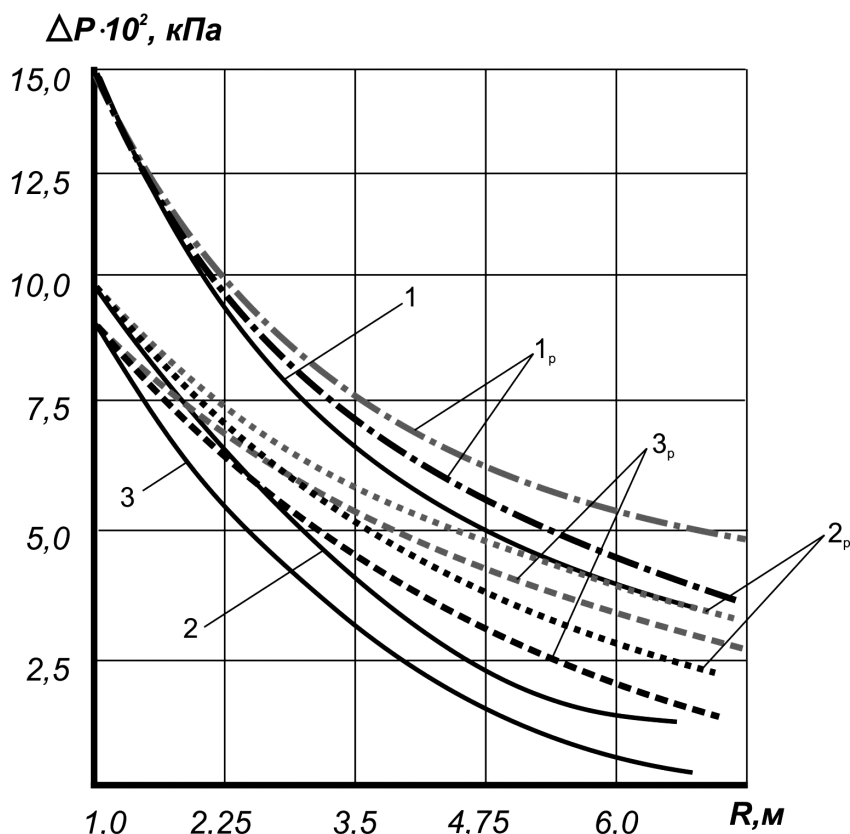


Рис.1. Графики изменения давления на фронте УВВ в ударной трубе при различной шероховатости ее стенок: 1, 2, 3 — экспериментальные кривые при $\beta=0,01$, $\beta=0,03$, $\beta=0,05$; 1_p , 2_p , 3_p — расчетные кривые для тех же значений начальных ΔP ;

Выводы. Таким образом, используя в схеме численного счета [1] 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, учитывают дополнительное торможение от неровностей (выступы крепи), учитывается увеличение тормозящего эффекта при турбулизации потока.

Список литературы

1. Чернай А.В., Налышко Н.Н. Обоснование разработки новых подходов к расчету параметров распространения воздушных ударных волн в горных выработках / Техногенні катастрофи: матеріали 3-ї міжнародної наук.-техн. конференції, 22-24 травн. 2013 г., Дніпропетровськ, Україна.— Дніпропетровськ: ДВНЗ «НГУ», 2013.— С. 132-143.
2. Агеев В.Г., Зинченко И.Н. Моделирование распространения ударных волн при мгновенной и цепной реакциях горения метана и пыли в горных выработках / Форум гірників — 2012: матеріали міжнародної конференції, 3-6 жовтня 2012 г., Дніпропетровськ, Україна.— Дніпропетровськ: НГУ, 2012.— С. 12-16.
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.
4. Денисов С. В. О коэффициенте трения в нестационарных течениях. — «Инженерно-физический журнал». 1970, т. XVIII, № 1, С. 118–123.
5. Широков Н.Н., Вознесенский Э.Н. Введение в механику жидкости и газа. — М.: МФТИ, 2007. — 324 с.
6. Гурин А.А., Малый П.С., Савенко С.К. Ударные воздушные волны в горных выработках.— М.: Недра, 1983.— 223 с;
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа.— М.: Дрофа, 2003.— 840 с;
8. Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Т.2/ пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др.— М.: Энергоатомиздат, 1987.— 352 с.