

6. Збірник інструкцій до правил безпеки у вугільних шахтах: В 2 т. – К.: Держнаглядохоронпраці, 2003. – Т.1. – 480 с.; Т.2. – 416 с.
7. Бреслер П.И. Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение / П.И. Бреслер. – Л.: Энергия, 1980. – 342 с.
8. Кирин Б.Ф. Борьба с пылевыведением в шахтах / Б.Ф. Кирин, В.П. Журавлев, Л.И. Рыжих – М.: Недра, 1983. – 213 с.
9. Шифрин К.С. Коэффициент рассеяния света на больших частицах / К.С. Шифрин // Известия АН СССР. – Серия геофизическая и географическая, 1950. – №1, 14. – С. 64-69.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Колесником В.Є.  
Надійшла до редакції 17.10.2014*

УДК 622.8:331.4:614.8

© Н.Н. Налисько

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ СОПРЯЖЕНИЯ ВЫРАБОТОК**

Обоснована методика численного эксперимента определения коэффициента затухания ударной воздушной волны в сопряжениях каналов. По результатам численного эксперимента показана динамика ударно-волновой картины в области сопряжения выработок. Однозначно установлены значения коэффициента затухания в зависимости от давления во фронте ударной волны.

Обґрунтована методика чисельного експерименту визначення коефіцієнта загасання ударної повітряної хвилі в сполученнях каналів. За результатами чисельного експерименту показана динаміка ударно-хвильової картини у межах сполучення виробок. Однозначно встановлені значення коефіцієнта загасання залежно від тиску у фронті ударної хвилі.

The technique of numerical experiment determining the damping factor of the shock wave in the air interfaces of channels. According to the results of the numerical experiment shows the evolution of the shock-wave pattern in the coupling openings. Definitely set the value of attenuation factor depending on the pressure in the shock front.

**Вступление.** Основные поражающие факторы газовых взрывов в выработках шахтах и рудников (протяженных подземных сооружениях) являются тепловое воздействие и ударная воздушная волна (УВВ). Последняя распространяется по сети выработок на значительные расстояния и представляет основную опасность для персонала и горноспасателей, выполняющих работы по ликвидации аварий. Поэтому проблема установления достоверных параметров распространения ударных воздушных волн в конкретных условиях весьма актуальна.

Одной из задач определения параметров распространения ударной воздушной волны является установление степени ослабления ударной волны при её прохождении через сопряжения выработок, где может происходить изменение

направления распространения, изменение сечения выработки, ответвления части потока. Ослабления ударной волны (изменение амплитуды, скорости, время действия положительной фазы  $\tau_+$ , импульса) в большинстве исследований рассматривают как уменьшение избыточного давления во фронте волны. Степень уменьшения амплитуды волны выражается в виде коэффициента затухания (ослабления):

$$k_3 = \Delta P_2 / \Delta P_1, \quad (1)$$

где  $k_3$  – коэффициент затухания;  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$  – избыточное давление во фронте ударной волны до и после сопряжения выработок.

Для условий угольных шахт степень ослабления ударной волны на сопряжениях, в виде коэффициента затухания, исследовалась в Донецком и Карагандинском отделении ВНИИГД [1]. По результатам исследований, на основе шахтных экспериментов, были установлены эмпирические коэффициенты для некоторых видов сопряжений выработок. Для условий массовых взрывов при отбойке руды, результаты исследований распространения ударной волны в выработках рудников отражены в работах Гурина А.А., Малый П.С., Савенко С.К. Полученная методика выбора или расчета коэффициента затухания, основанная на эмпирических выражениях, используется в руководящих документах при расчете защитных подземных сооружений гражданской обороны [2].

Аналитические исследования в этом вопросе в последнее время были представлены в работах Донецкого НИИГД "Респиратор" [3] и Института угля и углехимии Сибирского отделения РАН совместно с ОАО "Сибирская угольная энергетическая компания" [4]. В результате этих исследований были получены расчетные коэффициенты затухания или эмпирические формулы расчета относительного давления для 13 типичных случаев сопряжения выработок.

Несмотря на значительный объем исследований, вопрос о степени ослабления ударной воздушной волны на сопряжениях выработок окончательно не решен, т.к. наблюдается значительные расхождения в величинах этих коэффициентов и закономерностях их изменений для различных условий. Например, для сопряжения двух выработок под прямым углом (Г-образный поворот) и одинаковых сечениях до и после сопряжения коэффициенты затухания составят: по экспериментальным данным [4] – 0,67; расчет [4] – 0,8; расчет [3] – 0,82-0,99. Аналогично для У-образного сопряжения при переходе УВВ в ответвление под острым углом: 0,42/0,40/0,61-0,66; для тупого угла: 0,3/0,28/0,53-0,7; крестообразное сопряжение, поворот под прямым углом: 0,16/0,2/0,42-0,50. В работе [3] проанализированы соотношения коэффициентов для 177 вариантов параметров 13-ти типов сопряжений. В некоторых случаях сходимость была удовлетворительной, но в большинстве случаев расхождения существенны.

Кроме этого, в руководящих документах по расчету защитных укрытий гражданской обороны [2] учитывается то, что при прохождении некоторых видов сопряжений, в относительно слабых УВВ амплитуда волны может увеличи-

ваться. Там же учитывается влияние на степень ослабления величина избыточного давления во фронте волны. Оба этих факта не отражены в нормативных документах для угольных шахт несмотря на то, что физически это единый процесс.

**Цель работы.** Исследование поведения фронта ударной воздушной волны при его распространении через сопряжение выработок, установление закономерностей изменения амплитуды волны на основании численного эксперимента в CFD модели газового потока в канале.

**Изложение основного материала исследований.** В настоящее время, наиболее перспективным методом изучения газодинамических процессов является математическое моделирование путем численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений газовой динамики. На основании этих методов разработаны эффективные CFD модели, позволяющие детально изучить физические процессы.

В работе, процесс распространения фронта ударной воздушной волны через сопряжение выработок рассмотрен на примере опытного участка Г-образного поворота выработки под прямым углом, с соотношением сечений первой и второй ветви равным единице. Выработка прямоугольного сечения размером 1х1 м, длина выработки до сопряжения 5 м – ветвь 1, после сопряжения 20 м – ветвь 2 (рис. 1). Ударная воздушная волна в ветви 1 генерируется источником мгновенного объемного взрыва в тупиковой части выработки длиной 1 м.

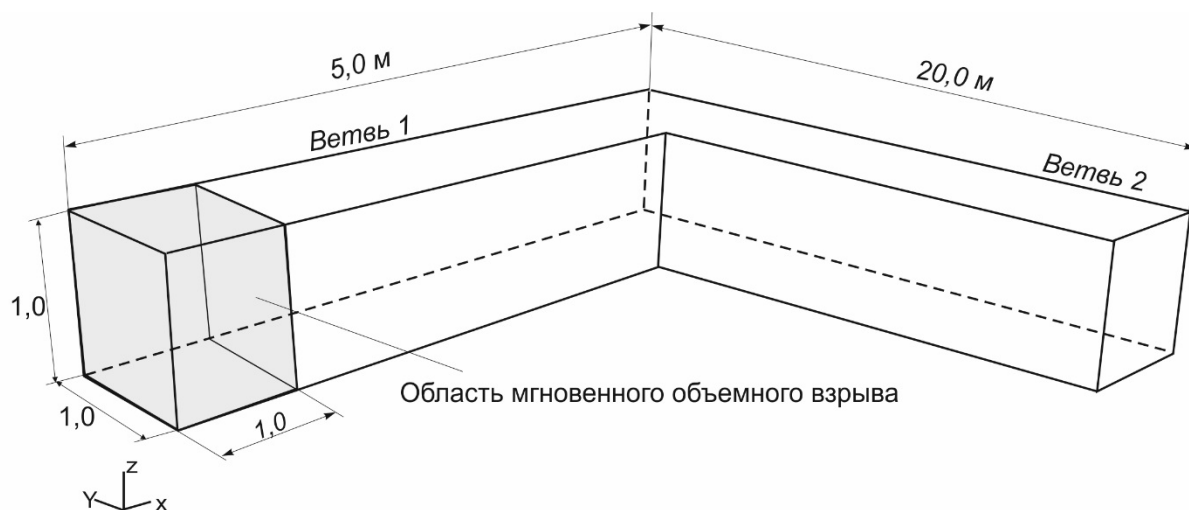


Рис. 1. Схема опытного участка сопряжения горных выработок

Для решения задачи используется система математического моделирования движения жидкости и газа FlowVision 2.5.4 [5]. В программном комплексе численная реализация задачи производится методом конечных объемов – методом интегрирования систем дифференциальных уравнений в частных производных. В качестве последних используется уравнения соответствующей модели

турбулентного внутреннего течения полностью сжимаемой среды, а именно:

– уравнение Навье-Стокса

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \Delta(\rho V \otimes V) = -\nabla P + [(\mu + \mu_1)(\nabla V + (\nabla V)^T)] + S; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0; \quad (3)$$

где  $S = (\rho - \rho_{\text{нуд}})g + \rho B + R$ ;

– уравнение состояния

$$P_{\text{abs}} = \frac{\rho R_0 T_{\text{abs}}}{M}; \quad (4)$$

– уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho V h) = \nabla \left( \left( \frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q; \quad (5)$$

где  $\nabla$  – оператор Гамильтона,  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $t$  – время,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\rho$  – плотность,  $P$  – давление,  $\vec{v} = (v^1 \dots v^n)$  – векторное поле скоростей,  $C_p$  – удельная теплоемкость,  $\lambda$  – молекулярная теплопроводность,  $M$  – молекулярный вес,  $\mu_t$  – турбулентная динамическая вязкость,  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля,  $R_0$  – универсальная газовая постоянная,  $Sc$  – число Шмидта,  $Sc_t$  – турбулентное число Шмидта,  $Q$  – теплота,  $\mu$  – молекулярная динамическая вязкость.

Неизвестные  $P$  и  $\vec{v}$  являются функциями времени  $t$  и координаты  $x$ ,  $x \in \Omega$ , где  $\Omega \subset R^n$ ,  $n=2, 3$  – трехмерная область, в которой движется газ.

Уравнения (2)–(5) замыкаются уравнениями стандартной  $k$ – $\epsilon$  модели турбулентности.

Математическая постановка задачи следующая (рис. 2). Рассматривается течение полностью сжимаемой жидкости в прямоугольном канале постоянного сечения. Геометрия канала в плоскости  $XU$  имеет поворот под углом 90 град. Стенки канала абсолютно жесткие. Начальные условия: давление газа в канале  $P_0=0,1$  МПа, скорость газа  $v=0$  м/с, физические характеристики газа соответствуют атмосферному воздуху.

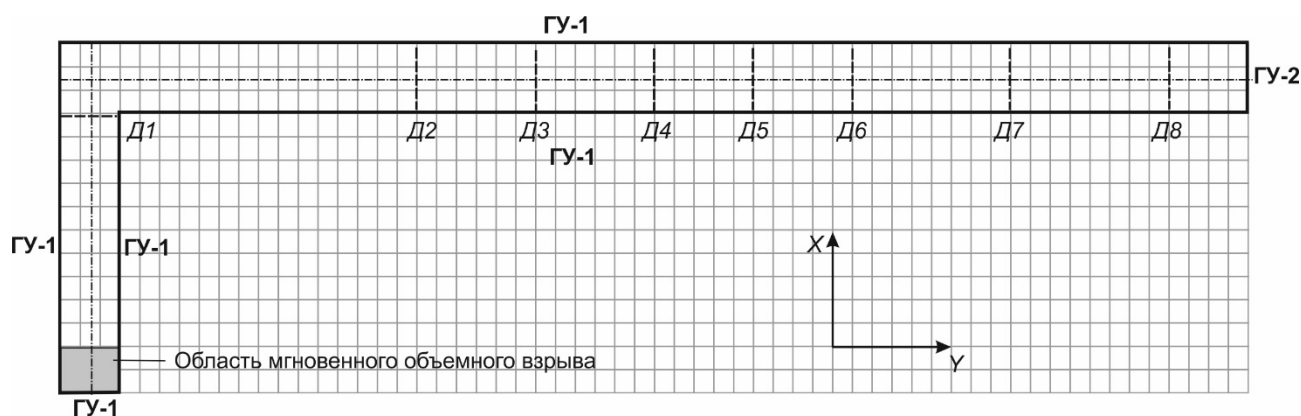


Рис. 2. Схема математической постановки задачи: ГУ-1– граничные условия стенки, ГУ-2– граничные условия свободный выход, Д1...Д8 – датчики

давления, регистрирующие давление на поперечной оси выработки

Источник объемного мгновенного взрыва расположен в тупиковой части ветви 1, на расстоянии 3 м от сопряжения. Расстояние устанавливалось из условия формирования устойчивого фронта ударной волны и минимизации размера расчетной области.

Для исследования процесса в системе FlowVision 2.5.4 был разработан вариант решения задачи (рис. 2). Контроль параметров распространения УВВ по каналу производился в 10 слоях (плоскостных сечениях): два слоя – вдоль продольных осей ветви 1, 2 и восемь поперечных слоев – датчики 1...8 (рис. 2). В этих слоях производилось построение графика и регистрация давлений в каждый шаг (итерация) по времени. Численное интегрирование уравнений массопереноса производился с помощью неявной разностной схемы расщепления.

На рис. 3 показаны этапы численного эксперимента – распространение ударной воздушной волны: а) вхождение ударной волны в сопряжение, б) переход прямой волны во вторую выработку, в) возникновение отраженной волны от стенки ветви 2 и формирование на её основе дополнительного фронта ударной волны в канале 2.

В случае небольших избыточных давлений отраженная на сопряжении волна может усиливать фронт, прошедший за сопряжение.

Как видно из эксперимента процесс имеет сильно выраженный ударно-волновой характер. При этом в ветви 2 возникает сложная волновая картина, связанная косым отражением падающих и отраженных УВВ. По этой причине, за сопряжением, максимум амплитуды во фронте ударной волны, возникает поочередно у левой и правой стенки (рис. 4).

С течением времени, распространяясь по выработке фронт выравнивается. Такое выравнивание может происходить на достаточно больших расстояниях. Например, для условий эксперимента и давления во фронте при входе в сопряжение (входное давление) 0,5 МПа расстояние составляет не менее 10 м, для 1 МПа не менее 20 м (рис. 5).

В ранее проведенных шахтных экспериментах (А.М. Чеховских, И.А. Пономарев, Н.Д. Зрелый), по результатам которых определяли коэффициент затекания (1),  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$  измеряли за 2-3 м до сопряжения и через 3-4 м после сопряжения.

Как видно из численного эксперимента такой подход не совсем верно отражает степень влияния непосредственно сопряжения на уменьшение амплитуды и это происходит по нескольким причинам: 1) в зависимости от расстояния между точками измерения  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$  коэффициент затухания будет меняться из-за изменения пути пройденного волной (изменяется объем вовлекаемого в движение воздушных масс); 2) на уменьшение амплитуды оказывает влияние шероховатость стенок выработки, поэтому при увеличении расстояния между точками замера или величины шероховатости стенок коэффициент затекания в большей степени будет состоять из влияния самой шероховатости, что не допустимо

по определению коэффициента; 3) сложная ударно-волновая картина за сопряжением выработок сильно влияет на точность измерения  $\Delta P_2$  особенно, как видно из численного эксперимента, вблизи поворота.

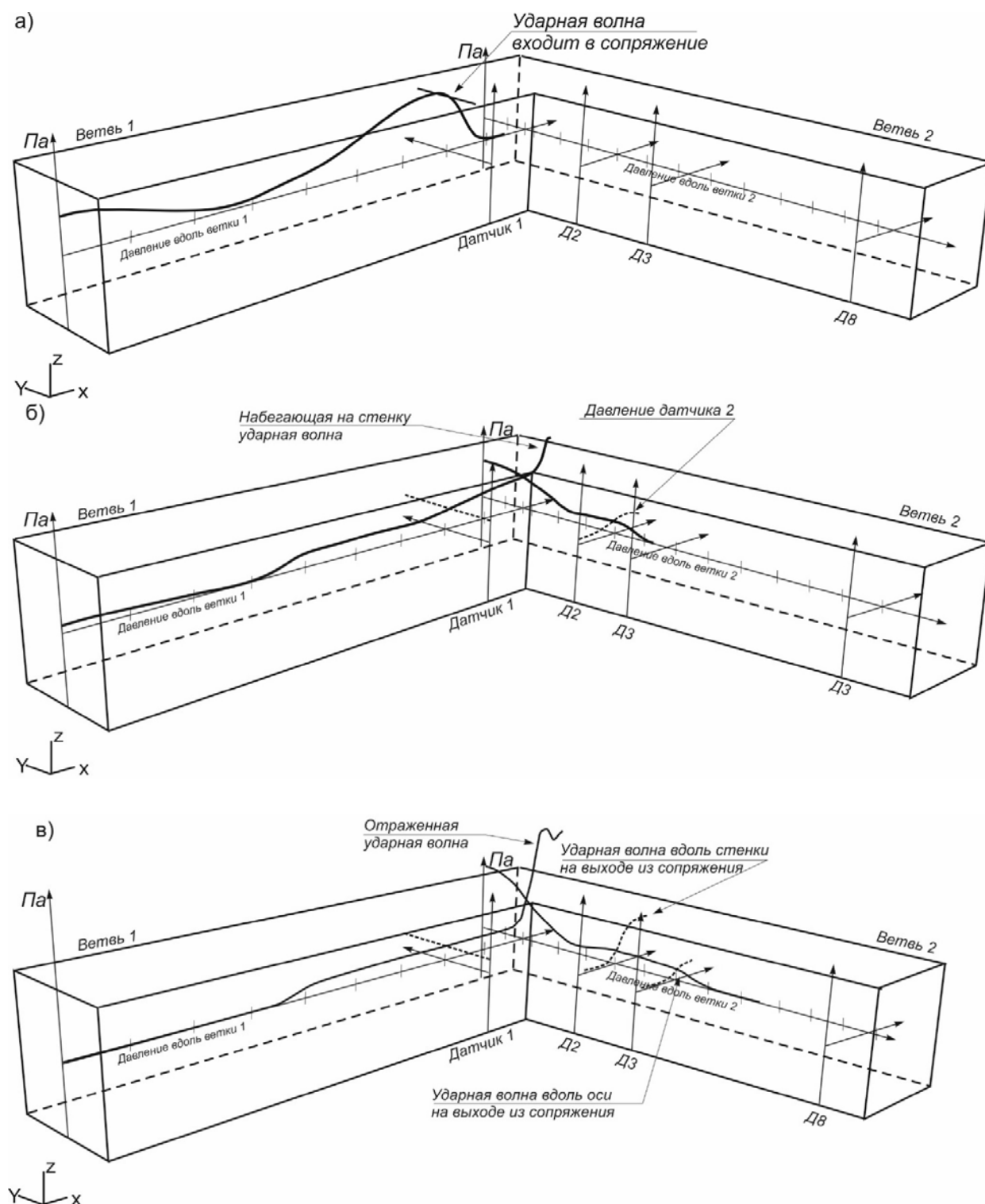


Рис. 3. Распространение ударной воздушной волны в виде продольных и поперечных двумерных графиков в различные моменты времени: а) 6 мс, б) 10 мс, в) 15 мс (датчики Д4..Д7 не показаны)

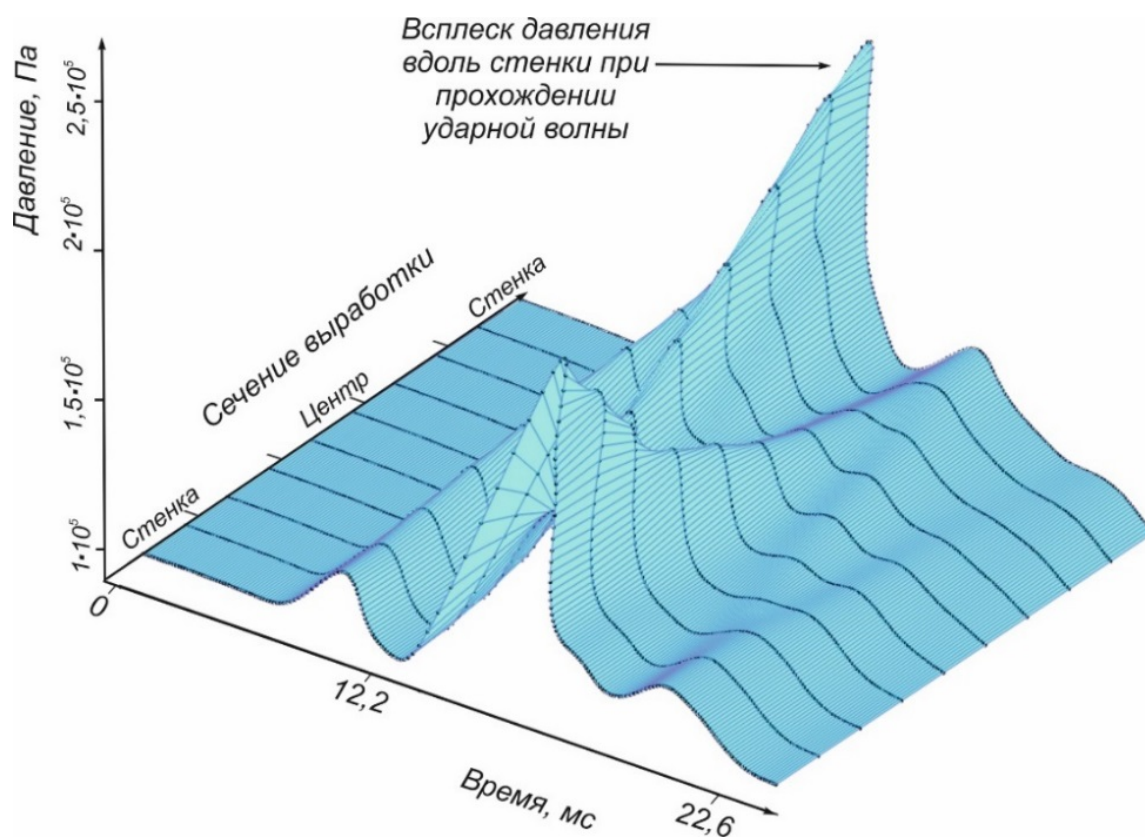


Рис. 4. Динамика поля избыточного давления в виде поверхности в сечении датчика Д2

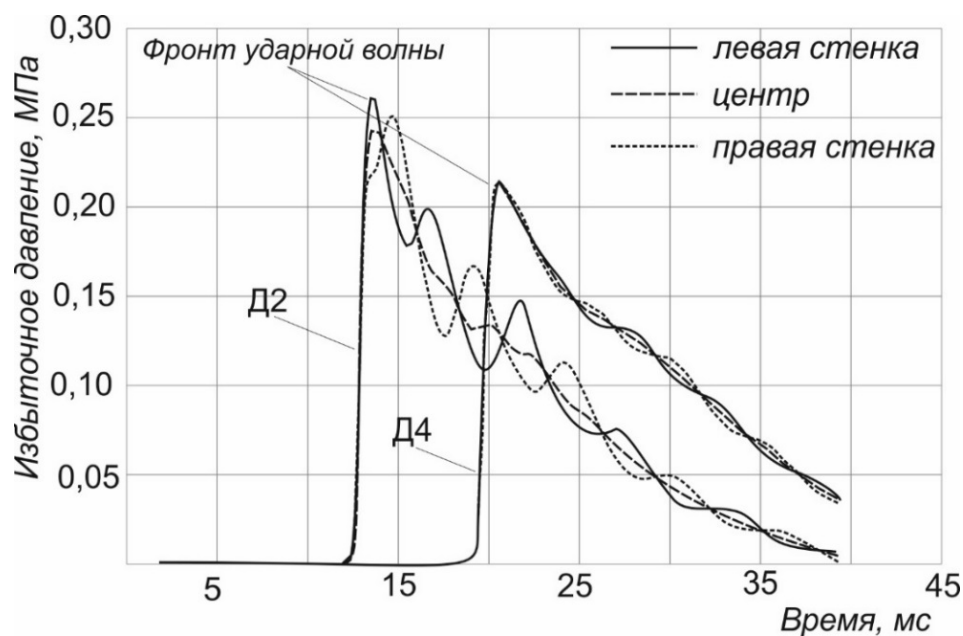


Рис. 5. Динамика выравнивания фронта ударной волны: избыточное давление за сопряжением выработок в сечении датчика Д2 и Д4



Датчики давления по своим физическим размерам в сравнении с поперечными размерами фронта УВВ являются точкой и зафиксировать максимум амплитуды, который распространяется в этой области под переменным углом к оси выработки весьма сложно. Перенос датчика в зону выработки, где фронт волны выравнивается до плоского (по оценкам на 10-20 м), невозможно т.к. по первым двум причинам влияние непосредственно сопряжения на ослабления волны станет меньшим чем влияние других факторов.

Все вместе эти причины вносят погрешность в определение коэффициента затухания, и поэтому однозначно определить его в этих условия невозможно, можно только в диапазоне. Вероятно, эти причины привели к существенным разбросам значений  $k_3$  в ранее проведенных исследованиях.

В связи с этим возникает вопрос: как же определить коэффициент затекания что бы избежать влияния посторонних факторов? Первое предположение, которое возникает при рассмотрении этого вопроса, установить точки измерения входного и выходного давления на геометрической границе входа и выхода в сопряжение. Однако такой подход не работает в случае смежных границ т.к. течение газового потока является непрерывным и возникновение избыточного давления на границе входа сразу вызывает практически такие же изменения на выходе (рис. 6а, 6б). В случае сопряжения без ответвлений, граница входа и выхода вообще совпадает (рис. 6в).

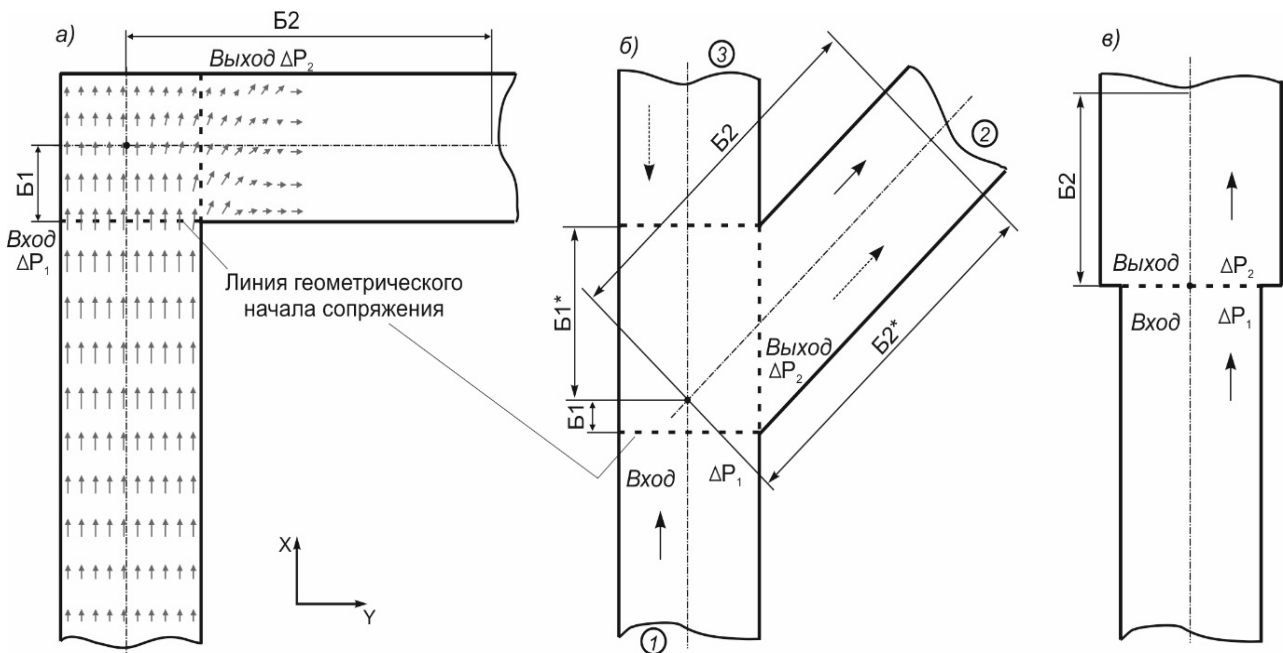


Рис. 6. Течение газового потока на смежных геометрических границах входа в сопряжение выработок и выхода из него: а) поворот  $90^0$ ; б) Y-образное сопряжение, показано два варианта направлений потока  $1 \rightarrow 2$  и  $3 \rightarrow 2$ ; в) прямое сопряжение без ответвлений



С целью нивелирования влияния факторов, не связанных с прохождением УВВ через сопряжения выработок, в работе предлагается следующая методика численного эксперимента. Основная идея методики — это определение отношения величины амплитуды УВВ после прохождения сопряжения, к величине амплитуды в параллельном эксперименте, где УВВ проходит такой же путь на линейном участке выработки, в идентичных условиях, но без сопряжения, т.е. без изменения направления, сечения, ответвлений и др. факторов характерных для сопряжения (рис. 7). Идентичные условия в параллельном опыте подразумевают условия выработки за сопряжением (ветви 2). Таким образом будет выделено чистое влияния сопряжения на ослабления амплитуды.

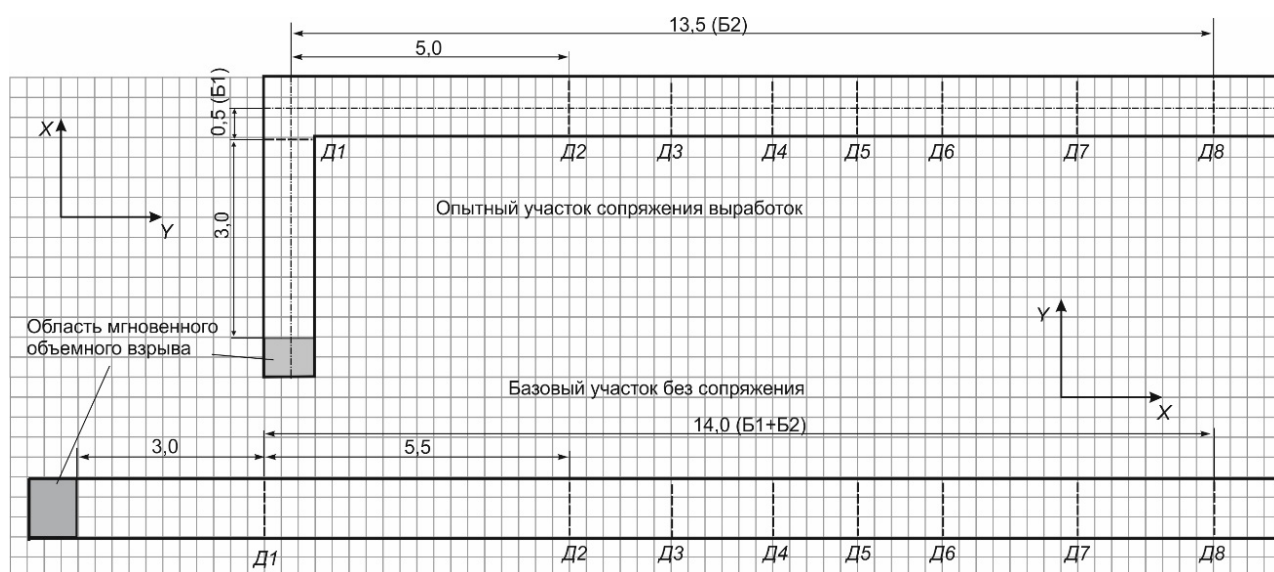


Рис. 7. Схема проведения параллельного эксперимента для установления степени влияния сопряжения на ослабления ударной воздушной волны

Коэффициент ослабления в этом случае определяется из соотношения:

$$k_{\text{зат.}} = \Delta P_2^{\text{опыт}} / \Delta P_2^{\text{база}}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_2^{\text{опыт}}$  — избыточное давление во фронте ударной волны после прохождения через сопряжения выработок;  $\Delta P_2^{\text{база}}$  — избыточное давление во фронте в параллельном эксперименте (ударная волна распространяется в аналогичных условиях, но без сопряжения).

Для реализации этой методики введены следующие понятия (рис. 6): линия входа ударной волны — это линия геометрического начала сопряжения, база — это длина пути, пройденная УВВ в границах сопряжения и после него на некоторое расстояние. Базовое расстояние состоит из двух частей (измеряется по осям выработок): расстояния от геометрического начала сопряжения до точки пересечения осей выработок (Б1, Б1\*) и расстояния от точки пересечения осей

выработок до границы базового участка (Б2, Б2\*). Это же расстояние устанавливаются в параллельном численном эксперименте (рис. 7). На участке Б2 производится регистрация амплитуды УВВ при помощи нескольких датчиков. Датчик – это точка в которой регистрируется распределения параметра в поперечной плоскости, в каждый момент времени эксперимента. В связи со сложной волновой картиной и дискретном течении численного эксперимента во времени, на участке Б2 располагается несколько датчиков на трех разных расстояниях (Д2–Д8). Это позволяет зарегистрировать пространственно-временное поле давления в выработке, затем путем статистической и графической обработки выделить фронт УВВ и амплитуду избыточного давления на этом участке (рис. 4, 5).

Датчик Д1 служит для регистрации входного давления во фронте УВВ ( $\Delta P_{вх}$ ). В параллельных экспериментах значение  $\Delta P_{вх}$  устанавливается одинаковым. Так же устанавливаются идентичными условия в выработке до сопряжения. Это дает возможность производить сравнения результатов экспериментов.

Таким образом, по приведенной методике было выполнено несколько серий численных экспериментов для входящего значения избыточного давления в ударной волне  $\Delta P_{вх} = 0,093; 0,185; 0,527; 0,784; 1,14$  МПа (значения зафиксированы датчиком Д1). В этих сериях была произведена регистрация избыточного давления во фронте УВВ для эксперимента на опытном участке и в параллельном базовом эксперименте. На основании этого, для каждого опыта и датчика был определен коэффициент затухания (2). Данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты серии численных экспериментов с избыточным давлением во фронте УВВ  $\Delta P_{вх} = 0,784$  МПа

Датчик	База, м	Выходное макс. давление после сопряжения, Па	Выходное макс. давление на прямолинейном участке (база), Па	$k_3$	Размах амплитуды давления в поперечном сечении выработки
Д2	5,5	361352	454530	0,795	0,84
Д3	7,5	310564	392621	0,791	0,93
Д4	9,5	275509	347864	0,792	0,98
Д5	10,5	263035	332534	0,791	0,99
Д6	11,5	250364	312955	0,800	1,00
Д7	13,0	212302	258904	0,820	1,00
Д8	14,0	199465	242658	0,822	1,00
	Среднее			0,801	

Флуктуации значений  $k_3$  по данным различных датчиков (табл. 1) вызваны дискретностью численного счета (рис. 8). Величина погрешности, вызванная

этим флуктуациями, была оценена в дополнительных экспериментах, где на одной точке регистрации устанавливалась серия датчиков с шагом 0,01 м: один в соответствующей точке и по три датчика до и после точки регистрации, всего 7 датчиков. В обычных экспериментах эти флуктуации нивелируются путем определения среднего значения  $k_3$ . Погрешность расчета не превышает 1%

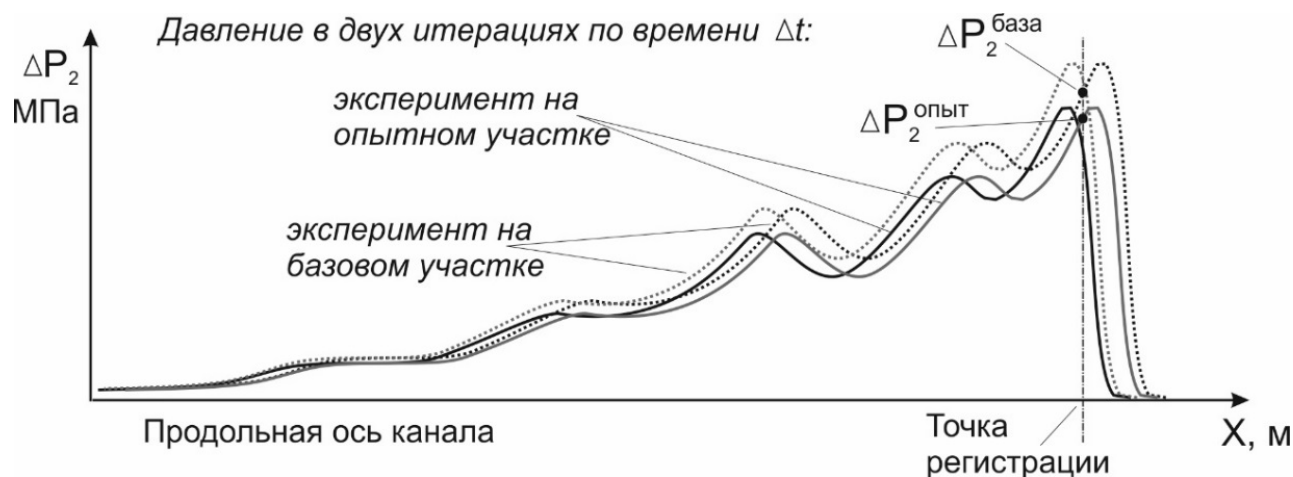


Рис. 8. Схема возникновения флуктуация в численном эксперименте

В табл. 1 величина размаха амплитуды УВВ показывает соотношения минимального ее значения к максимальному в поперечном сечении выработки, что характеризует степень выравнивания фронта относительно ее оси. При значении 1,0 фронт становится плоским.

Значения коэффициента затухания в остальных сериях численного эксперимента представлены в табл. 2. Для сравнения, в табл. приведены  $k_3$  по данным предыдущих исследований.

Таблица 2

Результаты серии численных экспериментов для сопряжения каналов одинакового сечения, под углом  $90^0$

Входное давление, $\Delta P_{вх}$ МПа	$k_3$	Значения $k_3$ по данным ранее проведенных исследований		
		[1, 3]	[4]– эксперимент	[4]– расчет
0,093	0,96	0,82–0,99	0,67	0,80
0,185	0,95			
0,527	0,87			
0,784	0,81			
1,140	0,74			
2,030	0,65			

Как видно из табл. 2 предложенная методика однозначно определяет степень ослабления УВВ в местах сопряжения выработок и выявляет зависимость коэффициента затухания от величины избыточного давления во фронте волны. Причем с уменьшением избыточного давления степень ослабления волны уменьшается. Это подтверждается проведением параллельного численного эксперимента – течение потока газа без волновых возмущений.

Для возможности использования полученных результатов в условиях произвольных значений  $\Delta P_{вх}$  найдена функциональная зависимость  $k_3 = f(\Delta P_{вх})$  (достоверность аппроксимации  $R^2=0,997$ ):

$$k_3 = 0,052\Delta P_{вх}^2 - 0,276\Delta P_{вх} + 0,994$$

**Выводы.** Разработана методика численного эксперимента определения коэффициента затухания УВВ по падению избыточного давления, при ее распространении через сопряжения каналов. Методика позволяет выделить влияние только сопряжения и нивелировать влияние других факторов на степень ослабления волны. По результатам численного эксперимента показана динамика ударно-волновой картины в области сопряжения выработок. Однозначно установлены значения  $k_3$  в зависимости от давления во фронте ударной волны.

Автор выражает благодарность д.т.н., проф. Поздееву С.В. за предоставленное, для исследований, лицензионное АРМ FlowVision 2.5.4 на базе Академии пожарной безопасности им. Героев Чернобыля МЧС Украины.

#### Список літератури

1. Греков С.П. Расчет коэффициентов затухания воздушных ударных волн в горных выработках шахт/ С.П. Греков, И.Н. Зинченко// Горноспасательное дело.– 2012.– Вып. 49.– С. 10-14;
2. СНиП 2.01.54-84 Защитные сооружения гражданской обороны в подземных горных выработках/ Минземстрой России — М.: ГУП ЦПП, 1998. — 20 с.
3. Агеев В.Г. Расчет параметров воздушных ударных волн в сети горных выработок/ В.Г. Агеев // Горноспасательное дело.– 2014.– Вып. 51.– С. 7-15;
4. Палеев Д.Ю. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. Библиотека горного инженера. Т. 6. Промышленная безопасность [Текст] / Д.Ю. Палеев, В.Н. Костеренко, И.М. Васенин.– М.: Издательство «Горное дело»; ООО «Киммерийский центр», 2011.– 312 с.
5. Аксенов А.А. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision [Текст]/ А.А. Аксенов, В.И. Похилко, А.А. Дядькин, А. Сельвачев. – Москва: ООО “ТЕСИС”, 2007. – 265 с;

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Соболевим В.В.  
Надійшла до редакції 27.11.2014*