

ПАРАМЕТРЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ СОПРЯЖЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ КАНАЛОВ

© N. Nalisko

PARAMETERS OF THE IMPACT OF SHOCK AIR WAVES THROUGH THE CONNECTION OF EXTENDED CHANNELS

Цель. Установление количественных значений изменения параметров ударной воздушной волны при ее распространении через сопряжение каналов подземных сооружений, на основании численного эксперимента в CFD модели разрывного течения газового потока.

Методика. Исследования выполнялись на основании поиска и анализа публикаций по теме работы, применялся анализ объекта исследования для математической постановки задачи и обоснования граничных условий и параметров численного моделирования. Для нахождения точки формирования плоского фронта ударной воздушной волны выполнялось аналитическое решение задачи о взаимодействии волновых фронтов в протяженных каналах. Путем численного моделирования получены коэффициенты затекания ударных воздушных волн в сопряжения каналов и выработок

Результаты исследования. Анализ результатов численного моделирования распространения ударных воздушных волн через сопряжения каналов позволил выявить ряд качественных и количественных закономерностей движения фронтов волны и пульсации газового потока непосредственно за сопряжением: при вхождении ударной воздушной волны в геометрию сопряжения фронт распадается на два прямых направления, первый движется за сопряжение второй отражаясь от стенки поперечной выработки формирует отраженную волну. Аналитическое решение задачи о взаимодействии волновых фронтов за сопряжением позволило установить критерий оптимального расположения точки регистрации параметров ударной волны и в полной мере применить методику нахождения коэффициентов затекания ударной волны в сопряжения. Проведя численные эксперименты для 10 типов сопряжений получены таблицы коэффициентов затекания.

Научная новизна. Обоснованы параметры численного моделирования распространения ударной воздушной волны через сопряжения каналов в среде моделирования FlowVision. Произведено аналитическое решение задачи о взаимодействии волновых фронтов за сопряжением позволило установить критерий оптимального расположения точки регистрации параметров ударной волны. Установлены закономерности изменения параметров ударной воздушной волны при ее распространении через сопряжения каналов.

Практическое значение. Полученные таблицы коэффициентов затекания ударной воздушной волны в сопряжения позволяют актуализировать и усовершенствовать методику расчета параметров ударных волн в нормативных документах строительной отрасли и горнодобывающей промышленности.

Ключевые слова: ударные воздушные волны, подземные сооружения, сопряжение каналов, коэффициент затекания, численный эксперимент, таблица коэффициентов.

Актуальность. Из общего количества аварий на шахтах Украины, аварийные взрывы в горных выработках составляют немалую их часть и дают наиболее тяжелые последствия [1]. Основным фактором вызывающим значительные

разрушения, травмирование и гибель людей является возникновение ударной воздушной волны (УВВ), которая в условиях ограниченного пространства распространяется на значительные расстояния по сети горных выработок. Наибольшая вероятность возникновения аварийных взрывов возникает в условиях ликвидации подземных пожаров, когда эндогенные процессы пирометаморфизма угольной массы способствуют загазированию аварийных участков и заперемыченных пространств, в т.ч. тяжелыми углеводородными газами. Горноспасатели, выполняющие работы по ликвидации последствий аварий, подвергаются значительным опасностям в случаях возникновения взрывов таких загазированных участков. Для снижения опасностей применяется защита расстоянием при выполнении работ по изоляции участка взрывозащитными сооружениями. Надежность такой защиты зависит от правильного расчета параметров формирования и распространения УВВ, при максимальном учете факторов влияющих на этот процесс [2]. Объективное решение данной задачи также позволяет повысить надежность расчета нагрузки от действия УВВ на взрывоустойчивые перемычки под защитой которых выполняются работы по ликвидации последствий пожаров и аварийных взрывов.

Аналогичная задача возникает в защитных подземных сооружениях гражданской обороны при затекании УВВ образованных мощными взрывами [3]. При этом происходит деформация и разрушение входных коммуникаций, газоздушных трактов, воздухозаборных и газовыххлопных систем. На сегодняшний день отсутствуют надежные теоретические и инженерные решения совокупности задач, определяющих процесс распространения УВВ в сложной системе состоящей из каналов постоянного и переменного сечения, камер, замкнутых и полужамкнутых объемов, помещений, различных устройств и приспособлений. Существующая приемлемая точность расчета прочности конструкций не всегда может быть реализована из-за неопределенности закладываемых в них исходных данных по нагрузке, создаваемой затекающей УВВ. В результате отставании теории распространения УВВ сложной системе каналов решение отдельных задач происходило в основном по экспериментальному пути.

Анализ последних исследований и публикаций. В области подземной разработки исследование проблем защиты от УВВ при аварийных взрывах широко представлена в работах зарубежных научных центров [4], Донецкого и Карагандинского отделения ВНИИГД [5]. По результатам исследований последних, 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. (Криворожский национальный университет). Полученная методика выбора или расчета коэффициента затухания, основанная на эмпирических выражениях, используется в руководящих документах при расчете защитных подземных сооружений гражданской обороны. В этой же области основные исследования

проводились и отражены в работах специализированного научного центра АО «ЦНИИПромзданий» [6] и работах МГСУ [3].

Выделение нерешенной части проблемы. Несмотря на значительный объем исследований, вопрос о степени ослабления ударной воздушной волны на сопряжениях горных выработок или каналов подземных сооружений окончательно не решен, т.к. наблюдается значительные расхождения в величинах этих коэффициентов и закономерностях их изменений для различных условий. Такое положение возможно связать с различными условиями в случае экспериментальных исследований и эмпирических зависимостей. В аналитических решениях это обусловлено значительными упрощениями в постановки задачи. В работе [5] проанализированы соотношения коэффициентов затухания для 177 вариантов параметров 13-ти типов сопряжений. В некоторых случаях сходимость была удовлетворительной, но в большинстве случаев расхождения существенны.

Настоящая работа является продолжением [7] и направлена на исследование ударно-волновых течений на сопряжениях протяженных каналов.

Цель. Установление количественных значений изменения параметров ударной воздушной волны при ее распространении через сопряжение каналов подземных сооружений, на основании численного эксперимента в CFD модели разрывного течения газового потока.

Изложение основного материала. Наиболее распространенной теорией связывающей газодинамические параметры сверхзвукового газового потока с волновыми процессами распространения ударной воздушной волны представлена в работах Ф.А. Баум, К.П. Станюковича. Полученные в них зависимости основаны на законе сохранения массы, импульса и энергии в газе до возникновения возмущения и после прохода УВВ. Однако, все имеющиеся решения являются в основном одномерными и их применение для газовых потоков с резко меняющимися направления на сопряжениях практически невозможно.

Одно из последних аналитических решений по определению степени изменения УВВ на сопряжениях каналов представлено в работе [3]. Для рассматриваемой задачи предлагается аналитическое решение системы девяти алгебраических уравнения динамической совместимости параметров газового потока при переходе через плоскость разрыва (фронт ударной волны) (рис. 1).

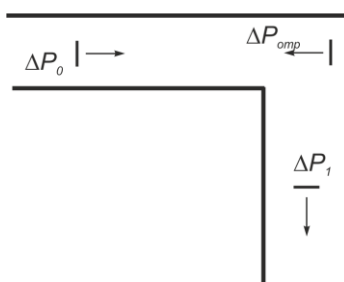


Рис. 1. Схема волновых фронтов: индексы 0 – исходная (падающая) волна, $отр$ – отраженная волна, 1 – волна прошедшая через сопряжение каналов

Полученное решение в виде уравнения (1) устанавливает связь между P , U , ρ в зависимости от коэффициента скорости ψ .

$$\Delta P_1 = \psi \sqrt{\frac{\kappa_0}{\kappa_0 - 1} \cdot \frac{P_{omp} \cdot [(\kappa_0 - 1)P_{omp} + (\kappa_0 + 1)P_0]}{\rho_1 [(\kappa_0 + 1)P_{omp} + (\kappa_0 - 1)P_0]}} \cdot \sqrt{\left[1 - \left(\frac{P_1}{P_{omp}}\right)^{\frac{\kappa_1 - 1}{\kappa_1}}\right] \cdot [(\kappa_2 + 1)P_1 + (\kappa_2 - 1)P_a]} \cdot \rho_{ак}, \quad (1)$$

где ψ – коэффициент скорости, учитывает аэродинамические потери в вихревой зоне и зоне удара струи о стенку;

P_0 , P_{omp} , P_1 , P_a – давление в исходной, отраженной, прошедшей ударной волне и атмосферное давление;

ρ_1 , $\rho_{ак}$ – плотность газового потока в прошедшей волне и в невозмущенном газе;

κ_0 , κ_1 , κ_2 – показатель адиабаты газа в исходной ударной волне, в переходной зоне и ударной волне прошедшей через сопряжение:

$$\kappa_1 = \frac{\kappa_0}{\kappa_0 - (\kappa_0 - 1)\psi^2}.$$

Поскольку уравнение (1) получено в неявном виде то производится его численное решение. Неопределенным остается основной член уравнения ψ от которого зависят все параметры ударной волны в канале. Недостатком решения является то, что этот параметр задается через гидравлический коэффициент сопротивления ξ (2), который используется в практике аэродинамических расчетов и характеризует стационарные потоки, в то время как процесс перехода УВВ через сопряжение с резко меняющимся направлением имеет высокую степень нестационарности.

$$\psi = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi}} \quad (2)$$

Коэффициент ξ определяется по гидравлическим и аэродинамическим справочникам с учетом его зависимости от числа Рейнольдса Re и Маха M . Однако, априори в расчетном потоке, за сопряжением они неизвестны и более того их значение значительно изменяется, поэтому коэффициент ξ , в условиях неопределенности, предлагается принимать как const в значениях 1,4 (с учетом трения) и 1,15 (без учета трения), что сразу переводит задачу из динамической в квазистационарное решение.

Для возможности аналитического решения, в задаче также приняты существенные упрощающие допущения в постановке: плоский фронт прошедшей ударной волны формируется в непосредственной близости за сопряжением каналов и определяется лишь потоком прямой ударной волны (рис. 1). Однако, можно предположить, что при возникновении резких изменений в направлении движения газового потока и наличие упругих свойств сильносжимаемой среды (рудничной атмосферы) должна существовать значительная зона пульсаций и неустановившегося направления движения потока (т.е. не совпадающего с осью канала), которая сильно влияет на диссипацию энергии потока. Степень пульсаций зависит от соотношения параметров газового потока (скорости, плотно-

сти, амплитуды волны) и параметров геометрии сопряжения (формы, размеров, угла изменения направления распространения).

Также, как показано в работе [7], при наличии отражающих поверхностей, в точке отражения возникает источник, волна от которого распространяется в обе ветви сопряжения. В данном случае возникает нерегулярное отражение УВВ. В канале из которого приходит прямая волна, отраженная волна быстро затухает из-за встречного движения потоков, а в канале за сопряжением отраженная волна будет двигаться вслед за прямой образуя результирующую и усиливая фронт прямой волны, т.е. будет работать принцип взаимодействия и эффект увеличения скорости волны в более плотной среде. В предложенном решении учитывается лишь отраженная волна которая распространяется в обратном направлении от сопряжения (рис. 1).

В настоящее время для изучения динамических и нестационарных процессов газовой динамики которые математически описаны системой дифференциальных уравнений широко используются численные методы их решения. В работе [3], для установления степени изменения параметров УВВ при ее распространении через сопряжение каналов, обоснована возможность применения численного решения методом конечных объемов, которая реализована в системе математического моделирования движения жидкости и газа FlowVision 2.5.

В математической постановке задачи, распространения УВВ по системе каналов моделируется внутренним турбулентным течением полностью сжимаемой среды, которое можно представить в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных:

– уравнение Навье-Стокса

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \Delta(\rho V \otimes V) = -\nabla P + [(\mu + \mu_1)(\nabla V + (\nabla V)^T)] + S; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0; \quad (4)$$

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

– уравнение состояния

$$P_{\text{abs}} = \frac{\rho R_0 T_{\text{abs}}}{M}; \quad (5)$$

– уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho V h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q; \quad (6)$$

где ∇ – оператор Гамильтона, Δ – оператор Лапласа, t – время, ν – коэффициент кинематической вязкости, ρ – плотность, P – давление, $\vec{v} = (v^1 \dots v^n)$ – векторное поле скоростей, C_p – удельная теплоемкость, λ – молекулярная теплопроводность, M – молекулярный вес, μ_t – турбулентная динамическая вязкость, Pr_t – турбулентное число Прандтля, R_0 – универсальная газовая постоянная, Sc – число Шмидта, Sc_t – турбулентное число Шмидта, Q – теплота, μ – 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 (3)–(6) замыкаются уравнениями стандартной k – ε модели турбулентности.

Данный метод позволяет моделировать систему каналов с внутренним турбулентным течением. Система каналов может быть, как линейная так и разветвленная, любой формы сечения канала (рис. 2).

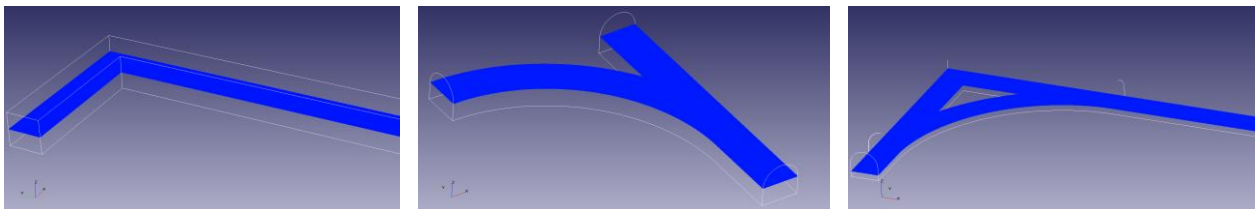


Рис. 2. Примеры вариантов сопряжений каналов

Рассмотрим вариант распространения УВВ через Γ -образное (90°) сопряжения каналов равного сечения, прямоугольной формы. Построение расчетной области в виде геометрической трехмерной модели сопряжения производится в программном комплексе Solid Works. Для разбиения области расчета расчетной сеткой применим прямоугольную адаптивную локально измельченную сетку (рис. 3). Возможность адаптации этой сетки позволяет разрешать малые детали геометрии в угловых областях и высокие градиенты рассчитываемых величин, в частности, движение сверхзвукового потока вдоль стенки канала. В расчете принят третий уровень адаптации вдоль поверхности стенок каналов (рис. 4).

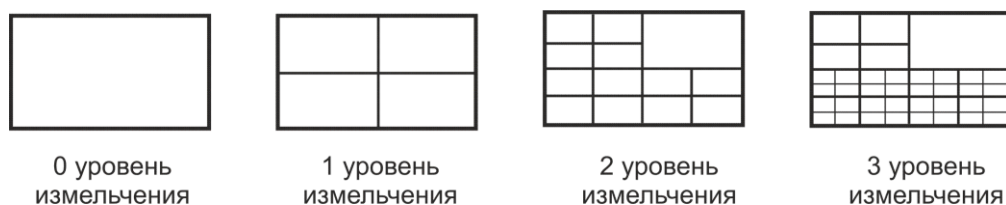


Рис. 3. Адаптивная сетка с локальным измельчением

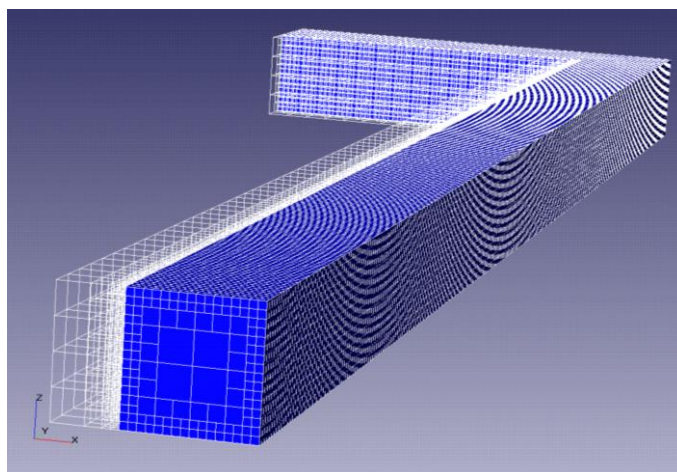


Рис. 4. Адаптивная сетка расчетной области сопряжения каналов с локальным измельчением третьего уровня вдоль стенок

Одной из сложностей решения рассматриваемой задачи являлось постановка корректных условий на искусственных границах расчетной области. Вектор скорости потока, при задании граничных условий раскладывается на нормальную и тангенциальную составляющую, при этом нормаль направлена внутрь расчетной области (рис. 5).

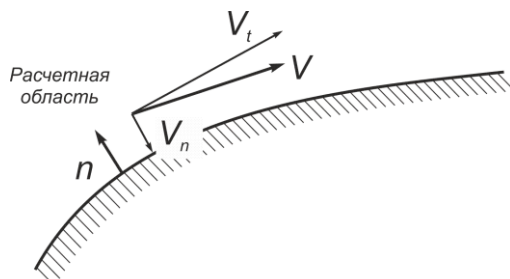


Рис. 5. Схема компонент скорости на границе расчетной области

Граничные условия для выбранной модели следующие.

1) Условие непротекания и пристеночные условия:

$$- V_n = 0, V_t = 0;$$

$$- \tau_w = \mu \frac{\partial U}{\partial y} \Big|_{y=0}, y_R - \text{значение шероховатости.}$$

2) Условия на неотражающих границах расчетной области:

$$- T = T_\infty, V = \{V_x, V_y, V_z\}_\infty, P = P_\infty;$$

На границе полагаются выполненными следующие соотношения:

$$V_{n,b} = \frac{1}{2}(R_1 + R_2) \quad c_b = \frac{1}{4}(R_1 - R_2)(\gamma_b - 1)$$

где $R_1 = V_{n,cell} + \frac{2c_{cell}}{\gamma_{cell} - 1}$ если $V_{n,cell} + c_{cell} < 0$ – сверхзвуковой выход;

$R_2 = V_{n,\infty} - \frac{2c_\infty}{\gamma_\infty - 1}$ если $V_{n,cell} - c_{cell} > 0$ – сверхзвуковой вход;

$$\gamma_b = \sqrt{\gamma_\infty \gamma_{cell}};$$

R_1, R_2 – инварианты Римана;

γ – показатель адиабаты;

c – скорость звука;

Индексы: ∞ – значение на бесконечности; b – значение на границе; $cell$ – значение в центре масс ячейки $n-1$ слоя.

В процессе расчета точность численного решения уравнения конвективного переноса (3) сильно зависит от ориентации потока относительно расчетной сетки. Наиболее сильно схемные искажения решения проявляются при диагональном, "скошенном" потоке жидкости относительно ячеек сетки. В задаче данные потоки возникают в вихревой зоне сопряжения. Для повышения точности расчета применяется "скошенная" расчетная схема. Применение этой схемы

увеличивает время расчета уравнения конвективного переноса примерно на половину.

Параметры метода для расчета разрывных течений значительно отличаются от расчета стационарных процессов. Один из лимитирующих параметров по условию устойчивости первых является шаг по времени τ , который ограничен условием Куранта-Фридрихса-Леви (CFL):

$$\tau_{\text{exp}} < \tau_{\text{min}} = \min_{k,i=1..3} \frac{h_{ki}}{u_{ki}},$$

где τ_{min} – минимальный шаг по времени, полученный в результате обхода всех расчетных ячеек;

h_{ki}, u_{ki} – размер k -ой ячейки и скорость в направлении оси x_i .

Выбор шага по времени осуществляется через задания явного и неявного числа Куранта-Фридрихса-Леви $CFL_{\text{exp}}, CFL_{\text{impl}}$. По мере увеличения энтропии системы временной шаг итераций при заданных числах CFL должен увеличиваться. В процессе отладочных расчетов устойчивая сходимость получена в значениях $CFL_{\text{exp}} \leq 0,2$ и $CFL_{\text{impl}} \leq 1$, при этом тенденция роста шага имеет вид приведенный на рис. 5.



Рис. 5. Тенденция временного шага итераций при устойчивой сходимости

Моделирование УВВ производилось источником теплового взрыва который находился перед сопряжением на расстоянии достаточном для формирования плоского фронта УВВ. Численный эксперимент проводился по методике изложенной в работе [7], в диапазоне избыточного давления во фронте УВВ, на входе в сопряжение изменялся от 0,09 до 2,03 МПа.

Анализ численного моделирования распространения УВВ через Г-образное сопряжения каналов позволяет выявить ряд качественных и количественных закономерностей движения фронтов УВВ и пульсации газового потока непосредственно за сопряжением, что необходимо для установления критерия правильного расположения точки регистрации параметров УВВ.

При вхождении УВВ в геометрию сопряжения (рис. 6а, сечение 1-1) фронт распадается на два прямых направления: первый (P_{np}^I) движется за сопряжение через сечение 2-2, второй (P_{np}^{II}) отражаясь от стенки поперечной выработки формирует отраженную волну.

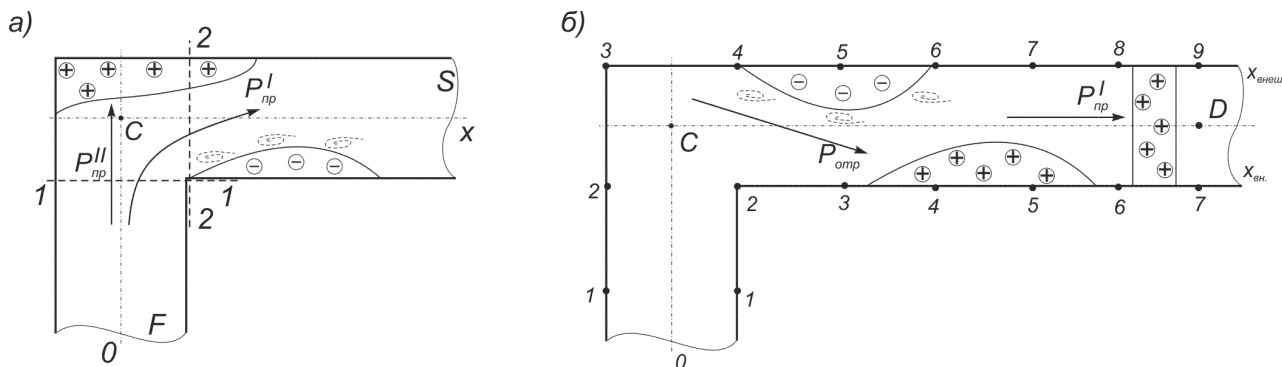
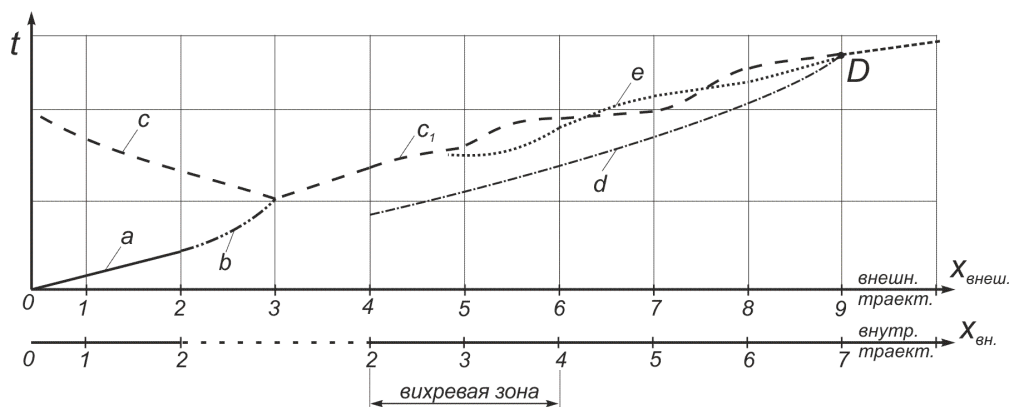


Рис. 6. Схема движения фронта УВВ в сопряжении:
(+) - скачек давления, (-) - разрежение

На рис. 6б приведена схема пульсаций давления за счет поочередных отражений в поперечной выработке за сопряжением. Волновая диаграмма этих пульсаций показана на волновой диаграмме (рис. 7). На графике совмещены две диаграммы движения фронта УВВ вдоль внешней границы сопряжения – точки 1..9 и внутренней – точки 1..7 (рис. 6б).



- a- первичная падающая УВВ;
- b- проходящая УВВ вдоль внешней траектории канала;
- c, c₁- отраженная УВВ вдоль внешней траектории канала;
- d- проходящая УВВ вдоль внутренней траектории канала;
- e- отраженная УВВ вдоль внутренней траектории канала.

Рис. 7. Волновая диаграмма движения фронта УВВ в и за сопряжением

Сложная волновая картина нерегулярного отражения дополненная образованием вихревых зон, на некотором расстоянии за сопряжением переходит в плоскую волну и в точке D происходит слияние прямой и отраженной волны. Таким образом в этой точке окончательно формируется фронт УВВ вышедший из узла и только в ней методически верно производить измерения избыточного давления в численных и натуральных экспериментах.

Произведем аналитическую оценку положения точки D относительно сопряжения по фактору слияния прошедшей прямой и отраженной волны. Движение этих фронтов примем прямолинейным, прямая волна выходит из сечение 2-2 (рис. 6а) (примем за начало), отраженная волна из точки С. Поскольку при

движении волны, за счет диссипации энергии скорость ее уменьшается то можно записать расстояние до точки D :

$$S = \int V(x) dx.$$

Скорость движения УВВ имеет известную зависимость от избыточного давления на ее фронте, для прямой волны, учитывая, что $x = f(P, t)$, можно записать:

$$S = v_1 \sqrt{\frac{\Delta P_{II}}{v_1 - v_2}} t_{II}, \quad (1)$$

где ΔP_{II} – избыточное давление в прямой волне;

v_1, v_2 – удельный объем для газа перед фронтом и за фронтом волны, $v = 1/\rho$;
 t_{II} – время движения фронта прямой волны до точки D .

Для определения S_{omp} для отраженной волны воспользуемся решением задачи для избыточного давления в отраженной волне. Известно несколько решений данной задачи в работах Г. Куранта, К.П. Станюковича и решение Власова-Измайлова. Применим последнее, тогда:

$$S_{omp} = S + \Delta S = v_3 \sqrt{2\Delta P_{II} + \frac{(k+1)\Delta P_{II}^2}{(k-1)\Delta P_{II} + 2kP_a} \cdot \frac{1}{v_2 - v_3}} (t_{II} - \Delta t), \quad (2)$$

где ΔS – расстояние между точками начала движения за сопряжением прямой и отраженной волны;

Δt – время между началом движения прямой и отраженной волны;

k – показатель адиабаты;

v_3 – удельный объем для газа за фронтом отраженной волны, $v = 1/\rho$.

Выразим t_n из (2) и подставим в (1):

$$S = v_1 \sqrt{\frac{\Delta P_{II}}{v_1 - v_2}} \cdot \left[\frac{(S + \Delta S)}{v_3 \sqrt{2\Delta P_{II} + \frac{(k+1)\Delta P_{II}^2}{(k-1)\Delta P_{II} + 2kP_a} \cdot \frac{1}{v_2 - v_3}}} + \Delta t \right]; \quad (3)$$

Сделав преобразования получим:

$$S \cdot \left[1 - \frac{v_1 \sqrt{\frac{\Delta P_{II}}{v_1 - v_2}}}{v_3 \sqrt{2\Delta P_{II} + \frac{(k+1)\Delta P_{II}^2}{(k-1)\Delta P_{II} + 2kP_a} \cdot \frac{1}{v_2 - v_3}}} \right] =$$

$$= v_1 \sqrt{\frac{\Delta P_{II}}{v_1 - v_2}} \left[\frac{\Delta S}{v_3 \sqrt{2\Delta P_{II} + \frac{(k+1)\Delta P_{II}^2}{(k-1)\Delta P_{II} + 2kP_a} \cdot \frac{1}{v_2 - v_3}}} + \Delta t \right]; \quad (4)$$

В результате:

$$S = \frac{v_1 \sqrt{\frac{\Delta P_{II}}{v_1 - v_2}} \cdot \left[\frac{\Delta S}{v_3 \sqrt{2\Delta P_{II} + \frac{(k+1)\Delta P_{II}^2}{(k-1)\Delta P_{II} + 2kP_a} \cdot \frac{1}{v_2 - v_3}}} + \Delta t \right]}{1 - \sqrt{\frac{\Delta P_{II}}{v_1 - v_2}} \cdot \frac{v_1}{v_3 \sqrt{2\Delta P_{II} + \frac{(k+1)\Delta P_{II}^2}{(k-1)\Delta P_{II} + 2kP_a} \cdot \frac{1}{v_2 - v_3}}}} \quad (5)$$

Значение ΔS для типовых сечений колеблется в пределах 1,5...3,5 м. Значение Δt можно определить, как время прохода прямой волны от точки С до стенки поперечной выработки и время обратного движения отраженной волны на это же расстояние, т.е. $\Delta t \approx 8,5...20$ мс. Таки образом, при избыточном давлении УВВ от 0,1 до 2 МПа точка D будет находится на расстоянии 7-30 м.

На данное расстояние – CD (рис. 6) кроме избыточного давления во входящем фронте, влияет геометрия сопряжения и геометрия канала выходящего из него. Для учета этого обстоятельства предлагается использовать следующий корректирующий относительный показатель k : отношения избыточного давления во входном канале к соотношению сечений выходного и входного канала:

$$\frac{\Delta P_{ex}}{\delta} = k \cdot d_{np}^{ex}, \quad (6)$$

где d_{np}^{ex} – приведенный диаметр канала выходного канала; $\delta = S/F$.

На основании численного эксперимента были получены значения k для Г-образного сопряжения (рис. 8).

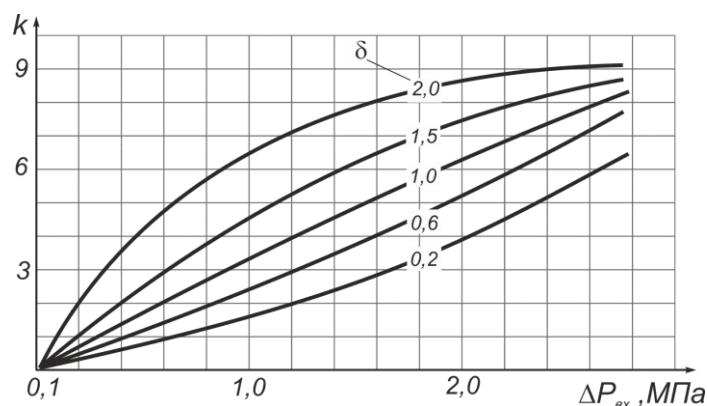


Рис. 8. Показатель размера зоны стабилизации потока за сопряжением

Поскольку на показатель сильное влияние оказывает геометрия перехода, то его необходимо определять для каждого типа сопряжения. С рациональной точки зрения, более точно параметры разрывного газового потока за сопряжением можно получать применяя систему моделирования индивидуально в каждом проекте или фактическом сооружении. В этом случае имеется возможность

учесть особенности целого узла состоящего из нескольких элементарных сопряжений, например приведенного на рис. 9.

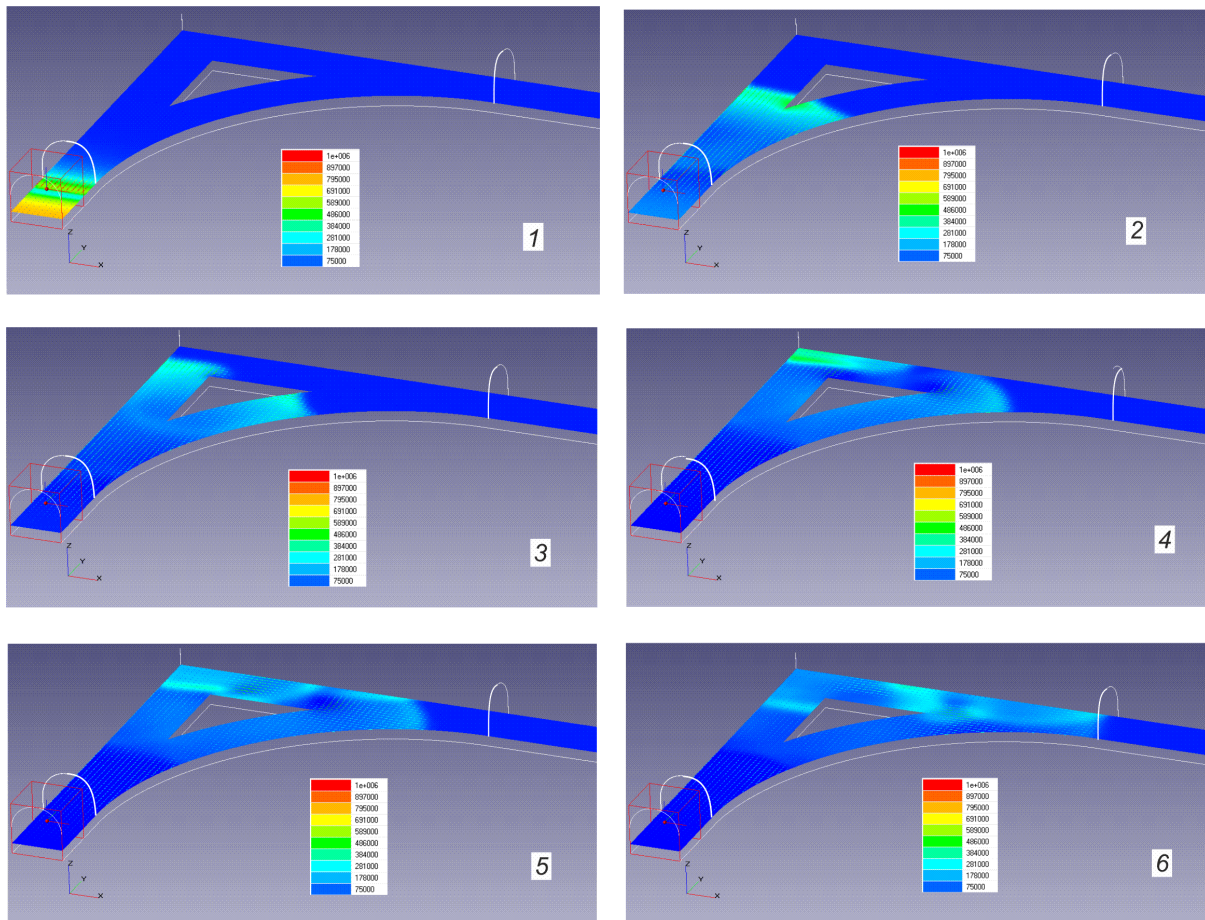


Рис. 9. Динамика распространения ударной воздушной волны через узел сопряжения выработок, в различные моменты времени: 1 – 1,6 мс; 2 – 14,8 мс; 3 – 25,1 мс; 4 – 37,2 мс; 5 – 42,1 мс; 6 – 54,2 мс

На рис. 9 показаны этапы численного эксперимента: 1) формирование ударной воздушной волны; 2) вхождение ударной волны в первое сопряжение; 3) выход левого фронта волны из прямой выработки; 4) отражение левого фронта ударной волны от стенки поперечной выработки и выход правого фронта из диагональной выработки; 5) движение отраженной волны левого фронта к сопряжению диагональной выработки и отражение правого фронта от поперечной стенки; 6) взаимодействие двух фронтов отраженных волн и формирование нового фронта за узлом сопряжения.

Таки образом, эксперимент показал наличие взаимодействия волновых фронтов в канале примыкающем к близко расположенным нескольким простым сопряжениям еще на этапе до выхода из геометрии узла. Поэтому отдельный расчет каждого сопряжения сложных узлах является не вполне корректным.

С целью практического применения полученных результатов исследований предлагается усовершенствование методики расчета коэффициентов изменения избыточного давления во фронте ударной воздушной волны в сопряже-

ниях каналов сооружений гражданской обороны и подземных горных выработок. Данные методики применяются в нормативных документах строительной отрасли и горнодобывающей промышленности: приложение 1 в СНиП 2.01.54-84 [8] и приложение 19 в Уставе ГВГСС [9]. Нормативы действуют в Украине с 1997-98 гг. и нуждаются в актуализации по множественным причинам, в т.ч. и методическим, например, в первом, в расчете разветвленного сопряжения каналов (у-образного, +-образного и т.п.) учитываются только сечения каналов главного направления движения УВВ, а сечения смежных каналов в расчет не принимается (рис. 10), хотя эти ответвления оказывают сильное влияние на распределение потока. Во-втором нормативном документе в расчетах коэффициента затухания на сопряжениях сечения каналов вообще не учитывается, принимается во внимание только величина угла поворота или ответвления выработки.

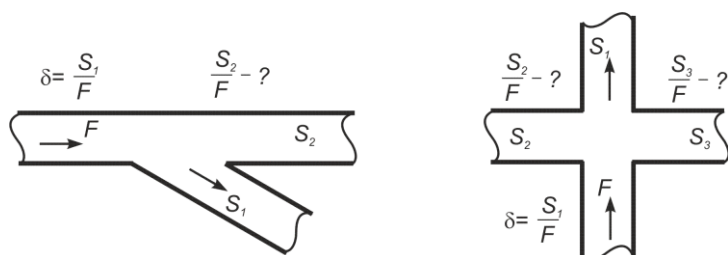


Рис. 10. Отсутствие учета сечений каналов в смежных направления движения потока

Изменение интенсивности ударной волны (амплитуды, скорости, время действия положительной фазы τ_+ , импульса) в большинстве исследований рассматривают как уменьшение избыточного давления во фронте волны. Степень уменьшения амплитуды волны выражается в виде коэффициента затекания:

$$k_3 = \Delta P_2 / \Delta P_1, \quad (7)$$

где k_3 – коэффициент затекания; ΔP_1 , ΔP_2 – избыточное давление во фронте ударной волны до и после сопряжения выработок.

Детально методика определения k_3 в численном эксперименте приведена в работе [7]. С использованием данной методики рассчитаны коэффициент затекания для наиболее типичных сопряжений каналов подземных сооружений и горных выработок (табл.). Для сравнения в таблице указаны значения данного коэффициента полученных в работах *– [10] по данным эксперимента, **– [10] расчетные значения, ***– [5] расчетные значения.

Таблица. Коэффициенты затекания ударных воздушных волн на сопряжениях каналов и выработок

Вид сопряжен. $\delta=F/S$	P, МПа	1	2	3 (45°)	4	5 (45°)	6 (45°)	7	8	9	10	
0,2		1,24* / 1,33**	1,41 / 1,24	0,72 / 0,69	0,47 / 0,46	0,43 / 0,37	0,93 / 0,94	0,95 / 0,96	0,39 / 0,43	0,92 / 0,92	0,55 / 1,18	
		1,34-1,64**	1,65-1,66	0,83-0,9	0,75-0,90	0,67-0,9	0,9-0,91	0,9-0,91	0,69-0,83	0,83	0,75-1,41	
	2,030	1,15	1,12	0,58	0,25	0,21	0,94	0,97	0,27	0,93	1,18	
	1,140	1,20	1,15	0,63	0,32	0,28	0,94	0,97	0,31	0,93	1,18	
	0,784	1,25	1,19	0,67	0,38	0,35	0,94	0,97	0,36	0,93	1,2	
0,6		1,24	1,22	0,70	0,44	0,42	0,94	0,97	0,41	0,93	1,22	
		1,185	1,34	0,75	0,58	0,51	0,94	0,97	0,50	0,93	1,27	
		0,093	1,52	0,79	0,67	0,58	0,94	0,97	0,60	0,93	1,37	
			0,89 / 1,03	1,22 / 1,12	0,55 / 0,54	0,33 / 0,4	0,34 / 0,31	0,83 / 0,82	0,89 / 0,87	0,23 / 0,28	0,85 / 0,76	0,48 / 0,79
			1,02-1,23	1,24-1,25	0,70-0,76	0,64-0,76	0,57-0,76	0,76-0,77	0,76-0,77	0,56-0,62	0,62	0,63-0,9
1		0,92	1,04	0,40	0,24	0,22	0,82	0,89	0,16	0,77	0,89	
		1,140	1,05	0,47	0,29	0,27	0,82	0,89	0,2	0,77	0,92	
		0,784	1,07	0,52	0,34	0,3	0,82	0,89	0,25	0,77	0,96	
		0,527	1,09	0,58	0,40	0,38	0,82	0,89	0,29	0,77	0,98	
		0,185	1,12	0,63	0,51	0,48	0,82	0,89	0,37	0,77	1,02	
1,5		1,18	1,19	0,67	0,57	0,56	0,82	0,89	0,44	0,77	1,07	
			0,67 / 0,8	1,0 / 1,0	0,42 / 0,40	0,25 / 0,3	0,27 / 0,25	0,79 / 0,73	0,16 / 0,2	0,82 / 0,6	0,41 / 0,51	
			0,82-0,99	0,99-1,0	0,61-0,66	0,55-0,66	0,50-0,66	0,66-0,67	0,42-0,50	0,5	0,53-0,66	
			0,65	1,0	0,22	0,2	0,18	0,7	0,8	0,6	0,63	
			1,140	1,0	0,29	0,25	0,23	0,7	0,8	0,15	0,6	
2,0		0,8	1,0	0,37	0,31	0,29	0,7	0,8	0,18	0,6	0,7	
		0,527	1,0	0,43	0,35	0,33	0,7	0,8	0,21	0,6	0,72	
		0,185	0,94	0,49	0,45	0,4	0,7	0,8	0,26	0,6	0,74	
			0,98	1,0	0,52	0,5	0,48	0,7	0,28	0,6	0,74	
			0,51 / 0,62	0,76 / 0,77	0,32 / 0,31	0,19 / 0,23	0,22 / 0,2	0,76 / 0,55	0,84 / 0,62	0,12 / 0,16	0,8 / 0,46	0,36 / 0,43
2,030		0,66-0,79	0,8-0,81	0,49-0,58	0,42-0,57	0,37-0,57	0,50-0,57	0,5-0,57	0,34-0,4	0,4	0,43-0,57	
		0,56	0,69	0,14	0,12	0,08	0,55	0,7	0,10	0,4	0,46	
		1,140	0,58	0,17	0,14	0,11	0,55	0,7	0,12	0,4	0,49	
		0,784	0,61	0,74	0,22	0,18	0,16	0,55	0,7	0,155	0,4	
		0,527	0,63	0,76	0,28	0,21	0,19	0,55	0,7	0,18	0,51	
0,185		0,65	0,79	0,33	0,26	0,23	0,55	0,7	0,22	0,4	0,55	
			0,69	0,36	0,3	0,28	0,28	0,55	0,7	0,23	0,55	
			0,41 / 0,53	0,59 / 0,63	0,26 / 0,25	0,15 / 0,19	0,19 / 0,16	0,76 / 0,46	0,83 / 0,50	0,09 / 0,12	0,79 / 0,38	0,30 / 0,35
			0,56-0,67	0,67-0,68	0,37-0,49	0,34-0,50	0,30-0,5	0,41-0,50	0,41-0,50	0,29-0,33	0,29	0,35-0,50
			0,48	0,55	0,12	0,02	0,01	0,4	0,6	0,08	0,2	0,38
1,140		0,50	0,58	0,14	0,04	0,03	0,4	0,6	0,10	0,2	0,41	
		0,784	0,52	0,16	0,07	0,06	0,4	0,6	0,13	0,2	0,43	
		0,527	0,54	0,63	0,21	0,12	0,09	0,4	0,15	0,2	0,44	
		0,185	0,56	0,67	0,26	0,15	0,13	0,4	0,19	0,2	0,44	
		0,093	0,57	0,69	0,29	0,19	0,16	0,4	0,20	0,2	0,44	

Выводы. Проведенные исследования позволяют обосновать параметры численного моделирования в среде FlowVision для эффективного расчета параметров распространения ударных воздушных волн через сопряжения выработок. Установленные закономерности изменения коэффициента затекания ударных волн в сопряжения и узлы сопряжений каналов, в виде таблиц могут быть использованы для совершенствования и актуализации нормативных документов строительной отрасли и горнодобывающей промышленности.

Перечень ссылок

1. Булат, А.Ф., Фичев, В.В. & Ященко, И.А. (2005). *Состояние техники безопасности и эффективности функционирования противоаварийной защиты угольных шахт*. Днепропетровск: ООО «Норд-Компьютер», 266 с.
2. Булат, А.Ф., Бунько, Т.В. & Кокоулин, И.Е. (2012). Неопределенность в системах противоаварийной защиты угольных шахт. *Геотехническая механика: межвед. сб. научн. трудов*, (64), 21-30.
3. Мишуев, А.В. (2015). *Воздушная ударная волна в сооружениях*. Москва: МГСУ, 408 с.
4. Zhou, A., Wang, K. & Wu, Z. (2014). Propagation law of shock waves and gas flow in cross roadway caused by coal and gas outburst. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24, 23-29.
5. Греков, С.П. & Зинченко И.Н. (2012). Расчет коэффициентов затухания воздушных ударных волн в горных выработках шахт. *Горноспасательное дело*, (49), 10-14;
6. РД (2000). *Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок*. Москва: АО «ЦНИИПромзданий», 122 с;
7. Налисько, Н.Н. (2015). Численное исследование распространения ударной воздушной волны через сопряжения выработок. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (49), 264-276.
8. СНиП 2.01.54-84 (1998). *Защитные сооружения гражданской обороны в подземных горных выработках*. Минземстрой России. – Москва: ГУП ЦПП, 20 с.
9. ДНАОП 1.1.30–4.01.97 (1997). *Статут ДВГРС по організації і веденню гірничорятувальних робіт*. Київ: Мінвуглепром, 445 с.
10. Палеев, Д.Ю., Костеренко, В.Н. & Васенин, И.М. (2011). *Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. Библиотека горного инженера. Т. 6. Промышленная безопасность*. Москва: Издательство «Горное дело», ООО «Киммерийский центр», 312 с.

АНОТАЦІЯ

Мета. Встановлення кількісних значень зміни параметрів ударної повітряної хвилі при її поширенні через сполучення каналів підземних споруд, на підставі чисельного експерименту в CFD моделі розривного течії газового потоку.

Методика. Дослідження виконувались на підставі пошуку та аналізу публікацій по темі роботи, застосовувався аналіз об'єкта дослідження для математичної постановки задачі і обґрунтування граничних умов і параметрів чисельного моделювання. Для знаходження точки формування плоского фронту ударної повітряної хвилі виконувалося аналітичний розв'язок задачі про взаємодію хвильових фронтів в протяжних каналах. Шляхом чисельного моделювання отримані коефіцієнти затікання ударних повітряних хвиль в сполучення каналів і виробок

Результати. Аналіз чисельного моделювання поширення ударних повітряних хвиль через сполучення каналів дозволив виявити ряд якісних і кількісних закономірностей руху фронтів хвилі і пульсації газового потоку безпосередньо за сполученням: при входженні ударної повітряної хвилі в геометрію сполучення фронт розпадається на два прямих напрямки, перший рухається за сполучення другий відбиваючись від стінки поперечної вироблення формує відбиту хвилю. Аналітичне рішення задачі про взаємодію хвильових фронтів за сполученням дозволило встановити критерій оптимального розташування точки реєстрації параметрів ударної хвилі і в повній мірі застосувати методику знаходження коефіцієнтів затікання ударної хвилі в сполучення. Провівши чисельні експерименти для 10 типів сполучень отримані таблиці коефіцієнтів затікання.

Наукова новизна. Обґрунтовано параметри чисельного моделювання поширення ударної повітряної хвилі через сполучення каналів в середовищі моделювання FlowVision. Виконано аналітичний розв'язок задачі про взаємодію хвильових фронтів за сполученням дозволило встановити критерій оптимального розташування точки реєстрації параметрів ударної хвилі. Встановлено закономірності зміни параметрів ударної повітряної хвилі при її поширенні через сполучення каналів.

Практичне значення. Отримані таблиці коефіцієнтів затікання ударної повітряної хвилі в сполучення дозволяють актуалізувати і вдосконалити методику розрахунку параметрів ударних хвиль в нормативних документах будівельної галузі та гірничодобувної промисловості.

Ключові слова: ударні повітряні хвилі, підземні споруди, пару каналів, коефіцієнт затікання, чисельний експеримент, таблиця коефіцієнтів.

ABSTRACT

Purpose. Determination of the quantitative values of the change in the parameters of the shock air wave during its propagation through the conjugation of channels of underground structures, based on a numerical experiment in CFD simulations of the discontinuous flow of a gas stream.

The methodology. The research was carried out on the basis of search and analysis of publications on the topic of the work, an analysis of the research object was used for the mathematical formulation of the problem and the justification of the boundary conditions and parameters of numerical simulation. To find the point of formation of the plane front of a shock air wave, an analytical solution of the problem of the interaction of wave fronts in extended channels was performed. By numerical simulation, the coefficients of flowing of shock air waves in the interface of channels and excavations.

Findings. An analysis of the numerical simulation of the propagation of shock air waves through channel conjugation has made it possible to reveal a number of qualitative and quantitative laws of motion of the wave fronts and the pulsation of the gas flow immediately after coupling: when a shock air wave enters the conjugate geometry, the front breaks up into two direct directions, the first moves beyond the conjugation of the second reflecting from the wall of the transverse formation forms a reflected wave. An analytic solution of the problem of the interaction of wave fronts behind conjugation made it possible to establish a criterion for the optimal location of the point of registration of the parameters of the shock wave and to fully apply the technique of finding the coefficients of the shock wave to flow into the conjugation. Having carried out numerical experiments for 10 types of interfaces, tables of coefficients of leakage were obtained.

The originality. The parameters of the numerical simulation of shock air wave propagation through channel matings in the FlowVision modeling environment are substantiated. An analytical

solution of the problem of the interaction of wave fronts behind coupling has been made possible, it has been possible to establish a criterion for the optimal location of the point of registration of the parameters of the shock wave. The regularities of the change in the parameters of a shock air wave during its propagation through channel conjugation are established.

Practical implications. The obtained tables of coefficients of the air-blast airflow into the conjugation allow me to update and improve the technique for calculating the parameters of shock waves in the regulatory documents of the construction industry and the mining industry.

Keywords: *shock air waves, underground structures, channel conjugation, leakage coefficient, numerical experiment, coefficient table.*

УДК 621.926

© Н.С. Прядко, Л.В. Музыка, Е.В. Терновая

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ СТРУЙНОЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С АКУСТИЧЕСКИМ МОНИТОРИНГОМ

© N. Pryadko, L. Muzyka, E. Ternova

REGRESSION ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL RESULTS OF THE JET MILL OPERATION WITH ACOUSTIC MONITORING

Цель - построение на основании полученных экспериментальных результатов регрессионной модели струйного измельчения материала и выявление влияния основных параметров процесса на эффективность измельчения.

Методика. На основании полученных экспериментальных результатов измельчения шамота лабораторной газоструйной измельчительной установкой с акустическим мониторингом процесса построена регрессионная модель струйного измельчения с использованием прикладного пакета обработки статистических данных Statgraphics Plus. Проведено кодирование факторов и построено план-матрица экспериментов. Построены трехмерные графики зависимости производительности от факторов и Парето-график для функции отклика, показывающий взаимное влияние факторов.

Результаты. Исследованы основные факторы, влияющие на эффективность струйного измельчения материалов. Установлено преобладающее влияние степени загрузки помольной камеры на ее производительность. Использован новый подход для контроля производительности измельчения. На базе применения результатов акустического мониторинга для анализа режимов и дисперсности продуктов измельчения показана зависимость амплитуды акустических сигналов зоны измельчения от технологических параметров процесса, что подтверждает установленные ранее связи характеристик акустических сигналов рабочих зон мельницы с технологическими параметрами измельчения. Необходимо уточнить возможность разработки системы контроля качества продуктов измельчения на основе анализа характеристик записанных сигналов акустического мониторинга процесса