

НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК [534.222.2:622.812]:001.891.57

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.10.401

**ОЦЕНКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН
В ПРОТЯЖЕННЫХ СООРУЖЕНИЯХ С УЧЕТОМ ДИССИПАЦИИ
ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ГАЗОВОГО ПОТОКА**

БЕЛИКОВ А. С.^{1*}, *д-р техн. наук, проф.*,
НАЛИСЬКО Н. Н.², *канд. техн. наук, доц.*,
БАРТАШЕВСКАЯ Л. И.³, *канд. ф.-м. наук, доц.*

^{1*} Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Дніпро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, Украина, тел. +38(0562) 47-16-01, e-mail: 59568@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

³ Кафедра физики, Национальный технический университет «Днепровская политехника», пр. Дмитрия Яворницкого, 19, Дніпро, Украина, 49005, тел. +38 (0562) 46-90-22, e-mail: bartashevskal.i@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0205-2245

Аннотация. Постановка проблемы. Одним из условий безопасности при аварийных взрывах газозвушнх смесей является прогнозирование последствий таких ситуаций и принятие адекватных решений по локализации возникающих разрушающих факторов. Одним из основных поражающих факторов взрыва газозвушнх смесей в условиях протяженных сооружений выступает ударная воздушная волна. Для расчета взрывозащитных сооружений существует нормативная база, которая опирается на экспериментальные данные. Однако проблема установления достоверных параметров распространения ударной воздушной волны остаётся актуальной. Одним из перспективных направлений в расчете задач резко нестационарных процессов является использование численных методов. В настоящее время предложено решение задачи распространения взрывных волн в протяженных каналах с использованием схем численного счета уравнений газодинамики модифицированным методом «крупных» частиц. В задаче учитывается фактор падения энергии движения газового потока за счет вовлечения в движение возрастающих с расстоянием воздушных масс и за счет действия сил трения потока газа о стенки выработки. Дальнейшее развитие математической модели процесса распространения ударных воздушных волн происходит путем обоснования методики расчета параметров их затухания с учетом теплоотдачи потока в стенки канала. **Методика.** Процессы формирования и распространения ударной воздушной волны исследовались методом математического моделирования с использованием законов и уравнений механики сплошнх сред и математической физики. Для численного решения дифференциальных уравнений, применялся метод крупных частиц (метод Давыдова). **Результаты.** Согласно результатам моделирования наибольшее относительное снижение происходит по параметру удельной полной энергии среды – на 5 %, давление на 3 %, плотность 2,5 %, падение скорости 2 %, при максимальном значении коэффициента теплообмена. Причем интенсивное нарастание теплопотерь происходит в зоне 3...5 длин участка газозвушной смеси, далее степень нарастания снижается и на всем остальном пути изменяется незначительно. При уменьшении коэффициента теплообмена вдвое зона нарастания коэффициента k_s увеличивается до 5...7 x/L_D . **Научная новизна.** Исследовано влияние теплообмена ударной воздушной волны со стенками канала, что позволяет учитывать баланс диссипации полной энергии нестационарного газового потока. Получены закономерности изменения параметров ударной воздушной волны, которая распространяется в протяженном сооружении, обусловленные теплообменом газового потока со стенкой сооружения. **Практическая значимость.** Расширены возможности процедур прогнозирования параметров распространения ударных воздушных волн с помощью многофакторной математической модели.

Ключевые слова: внутреннее течение потока; граничные условия III рода; ударная воздушная волна; численный расчет; тепловой поток; внутренняя энергия

**ОЦІНКА ПОШИРЕННЯ УДАРНИХ ПОВІТРЯНИХ ХВИЛЬ
У ПРОТЯЖНИХ СПОРУДАХ З УРАХУВАННЯМ ДИСПИПАЦІЇ
ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ ГАЗОВОГО ПОТОКУ**

БЕЛІКОВ А. С.^{1*}, *д-р техн. наук, проф.*,
НАЛИСЬКО М. М.², *канд. техн. наук, доц.*,

БАРТАШЕВСЬКА Л. І.³, канд. ф.-м. наук, доц.

^{1*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: 59568@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

³ Кафедра фізики, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (0562) 46-90-22, e-mail: bartashevskal.i@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0205-2245

Анотація. Постановка проблеми. Одна з умов безпеки під час аварійних вибухів газоповітряних сумішей - прогнозування наслідків таких ситуацій і прийняття адекватних рішень щодо локалізації виникаючих руйнівних факторів. Одним з основних вражаючих чинників вибуху газоповітряних сумішей в умовах протяжних споруд виступає ударна повітряна хвиля. Для розрахунку вибухозахисних споруд існує нормативна база, яка спирається на експериментальні дані. Однак проблема встановлення достовірних параметрів поширення ударної повітряної хвилі залишається актуальною. Перспективний напрямок у розрахунку завдань різко нестационарних процесів - це застосування числових методів. Наразі запропоновано розв'язання задачі поширення вибухових хвиль у протяжних каналах із використанням схем числового рахунку рівнянь газодинаміки модифікованим методом «великих» частинок. У задачі враховується фактор падіння енергії руху газового потоку за рахунок залучення в рух зростаючих із відстанню повітряних мас і за рахунок дії сил тертя потоку газу об стінки виробки. Подальший розвиток математичної моделі процесу поширення ударних повітряних хвиль відбувається шляхом обґрунтування методики розрахунку параметрів їх загасання з урахуванням тепловіддачі потоку в стінки каналу. **Методика.** Аналіз і узагальнення теоретичних досліджень, математичне моделювання газодинамічних процесів поширення вибухових повітряних хвиль у протяжних спорудах. Процеси формування і поширення ударної повітряної хвилі досліджувалися методом математичного моделювання з використанням законів і рівнянь механіки суцільних середовищ і математичної фізики. Для чисельного рішення диференціальних рівнянь, застосовувався метод великих часток (метод Давидова). **Результати.** Згідно з результатами моделювання найбільше відносно зниження відбувається по параметру питомої повної енергії середовища – на 5 %, тиск на 3 %, щільність 2,5 %, падіння швидкості 2 %, при максимальному значенні коефіцієнта теплообміну. Причому інтенсивне наростання тепловтрат відбувається в зоні 3...5 довжин ділянки газоповітряної суміші, далі ступінь наростання знижується і на всьому іншому шляху змінюється несуттєво. При зменшенні коефіцієнта теплообміну вдвічі зона наростання коефіцієнта k_s збільшується до 5...7 x/L_D . **Наукова новизна.** Досліджено впливу теплообміну ударної повітряної хвилі зі стінками каналу, що дозволяє враховувати баланс дисипації повної енергії нестационарного газового потоку. Отримано закономірності зміни параметрів ударної повітряної хвилі, яка поширюється у протяжній споруді, обумовлені теплообміном газового потоку зі стінкою споруди. **Практична значимість.** Розширено можливості процедур прогнозування параметрів поширення ударних повітряних хвиль за допомогою багатфакторної математичної моделі.

Ключові слова: внутрішня течія потоку; граничні умови III роду; ударна повітряна хвиля; числовий розрахунок; тепловий потік; внутрішня енергія

ASSESSMENT OF THE PROPAGATION OF SHOCK AIR WAVES IN EXTENDED STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT THE DISSIPATION OF THE INTERNAL ENERGY OF GAS FLOW

BIELIKOV A.S.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,

NALYSKO M.M.², Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.,

BARTASHEVSKA L.I.³, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Ass. Prof.

^{1*} Department of Life Safety, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Department of Life Safety State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: 59568@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

³ Department of Physics, National Technical University "Dnipro Polytechnic", 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (0562) 46-90-22, e-mail: bartashevskal.i@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0205-2245

Abstract. Purpose. One of the safety conditions for emergency explosions of gas-air mixtures is the prediction of the consequences of such situations and the adoption of adequate decisions on the localization of destructive factors. One of the main factors affecting the explosion of gas-air mixtures, in conditions of extended structures, is the shock air wave. For the calculation of explosion-proof facilities there is a regulatory framework that is based on experimental data. However, the problem of establishing reliable parameters of the propagation of a shock air wave remains relevant. One of the promising directions in the calculation of tasks of highly unsteady processes is the use of numerical methods. At present, a solution

has been proposed for the propagation of explosive waves in extended channels using the schemes of numerical calculation of the equations of gas dynamics by the modified method of “large” particles. The task takes into account the factor of the fall in the energy of motion of the gas flow due to the involvement in the movement of the air masses increasing with distance and due to the action of the friction forces of the gas flow against the walls. Further development of the mathematical model of the process of propagation of shock air waves occurs by substantiating the methodology for calculating the parameters of their attenuation, taking into account the heat transfer to the channel walls. **Methodology.** Analysis and synthesis of theoretical studies, mathematical modeling of gas-dynamic processes of propagation of explosive air waves in extended structures. The processes of formation and propagation of a shock air wave were investigated by the method of mathematical modeling using the laws and equations of continuum mechanics and mathematical physics. For the numerical solution of differential equations, the method of large particles was used (Davydov method). **Results.** According to the simulation results, the largest relative decrease occurs in the parameter of the specific total energy of the medium – by 5 %, pressure by 3 %, density 2.5 %, decrease in speed 2 %, with the maximum value of the heat exchange coefficient. Moreover, an intensive increase in heat loss occurs in the zone of 3...5 lengths of the gas-air mixture section, then the degree of increase decreases and on the rest of the way it changes insignificantly. If the heat transfer coefficient is reduced by half, the growth zone of the coefficient k increases to 5–7 x/L_D . **Scientific novelty.** The effects of heat exchange between the air shock wave and the channel walls are investigated, that allows to take into account the balance of dissipation of the total energy of an unsteady gas flow. The regularities of changes in the parameters of the shock air wave, which propagates in extended structure, due to the heat exchange of the gas flow with the wall of the structure are obtained. **Practical relevance.** The possibilities of procedures for predicting the parameters of the propagation of shock air waves have been expanded using a multifactor mathematical model.

Keywords: internal flow; boundary conditions of the 3 kind; shock air wave; numerical calculation; heat flow; internal energy

Постановка проблемы, ее связь с научными и практическими заданиями. Аварийные взрывы газоздушных смесей генерируют множество разрушающих факторов, основными из которых является ударные воздушные волны. Их особенность – свойство затекания в любые объемы и разветвления протяженных каналов и таким образом возможность распространения на значительные расстояния. Безопасность работ персонала при угрозах действия ударной волны обеспечивается защитными конструкциями устанавливаемых на пути ее распространения. На устойчивость таких конструкций, в том числе, влияет достоверность оценки нагрузки создаваемой ударной воздушной волной. Расчета взрывозащитных конструкций осуществляется на основе нормативной базы, которая была разработана во второй половине двадцатого столетия. Однако, проблема защиты от взрывов газоздушных смесей на промышленных объектах повышенной опасности и проблема минимизации последствий разрушительного действия воздушных ударных волн остаётся актуальной. Подтверждение этого могут быть случаи разрушения взрывозащитных конструкций при взрыве газа в подземных сооружениях и распространения ударной воздушной волны с опасной для человека амплитудой давления в места работы людей,

несмотря на соблюдение всех действующих методик определения безопасных расстояний.

Анализ последних исследований и публикаций, выделение нерешенной части проблемы. Действие ударной воздушной волны на взрывозащитные конструкции определяется двумя динамическими характеристиками: избыточным давлением во фронте волны и импульсом силы, который передается взрывозащитной конструкции за время ее действия. Снижение интенсивности ударной волны при ее движении вдоль протяженных галерей происходит за счет вовлечения в движение новых масс атмосферы, расхода энергии на разрушение препятствий, процессов внутреннего вязкого трения и трения газа о стенки выработки, а также за счет потерь энергии при теплообмене со стенками сооружения.

Численные методы решения газодинамических задач нестационарного течения воздуха и продуктов взрыва позволяют выявить закономерности влияния всех факторов на параметры ударной воздушной волны. Для проведения вычислительного эксперимента необходимо решать систему уравнений газовой динамики, кинетики химической реакции окисления метана и других компонентов метанового ряда. Очевидно, что подходы к решению такой задачи, основанные на использовании аналитических решений, могут

использоваться лишь для получения грубых оценочных результатов.

Для проведения вычислительного эксперимента требуется применение устойчивых, консервативных разностных схем, относительно простых в реализации и экономичных с точки зрения затрат вычислительных мощностей компьютеров. В работах [4; 8; 9] предложено решение задачи распространения ударной воздушной волны (УВВ) в подземных сооружениях с помощью схемы численного счета уравнений газовой динамики модифицированным методом Давыдова (крупных частиц). В задаче учитывается фактор падения энергии движения газового потока за счет вовлечения в движение возрастающих с расстоянием воздушных масс и за счет теплообмена потока газа со стенкой сооружения. На данном этапе в решении задачи не учитывалось действие сил трения газового потока в ударной волне со стенкой.

Значительные результаты в этом направлении получены исследования НИИГД «Респиратор». В работе [1; 2; 6] предложено решение задачи распространения УВВ, путем численного решения уравнений газовой динамики разностной схемой. Моделирование диссипации энергии потока производится за счет теплотерь от нагрева вовлекаемых в движение воздушных масс шахтного воздуха.

В совместных работах Томского политехнического института, РосНИИГД и приводится численное решение задач газовой динамики методом С.К. Годунова [5; 7; 11]. Для расчета теплового взаимодействия газового потока со стенками выработки используются математические зависимости механики движения жидкости и газа в каналах.

Применительно к решению задач теплообмена и теплопередач наиболее перспективным является использование программного комплекса ANSYS, пакет FLUENT или CFX, позволяющего провести, в том числе, численный эксперимент для турбулентных течений газа с различными режимами теплопереноса [3; 12]. Однако такая задача будет решена в общем виде, без особенностей, возникающих в условиях горных выработок.

Цель статьи. Развитие математической модели процесса распространения ударных воздушных волн в протяженных каналах путем обоснования методики расчета параметров их затухания с учетом теплоотдачи потока в стенки.

Основной материал. В работе [8; 9] математическая постановка задачи распространения ударной воздушной волны в сооружении 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» (рис. 1).

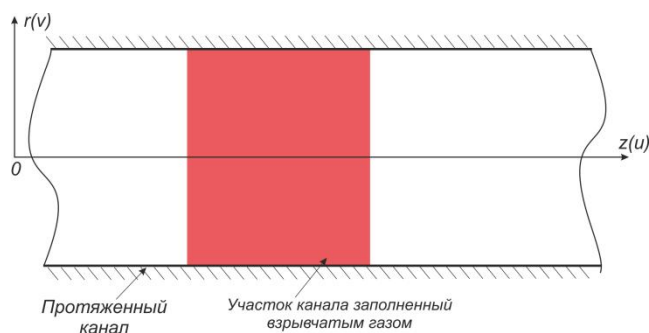


Рис. 1. Схема задачи / Fig. 1. Driving task

Для развитие математической модели распространения ударной воздушной волны по сети каналов и выработок необходимо в уравнениях Эйлера учесть тепловой поток в стенку канала от нагретых газов движущихся за фронтом ударной волны.

Моделирование теплового взаимодействия газового потока со стенками выработки предлагается следующим образом. В правой части уравнения энергии учитывается тепловое взаимодействие газового потока со стенками выработок в форме уравнения теплового баланса, основанное на законе сохранения энергии.

Вследствие конвективных и турбулентных течений газа в возмущенной среде скорость выравнивания температуры по сечению канала намного больше скорости ее изменения за счет теплоотвода в стенки канала. На основании этого, решение уравнений теплового баланса предлагается производить для всего объема газа в целом:

$$qPd z = Q S d z, \quad (1)$$

где q – плотность потока тепла в стенку, Дж/(м²·с); Q – удельная объемная скорость теплопотерь в газе, Дж/(м²·с); P – периметр канала, м; S – площадь поперечного сечения канала, м².

Температурное поле в расчетной области определяется на основании уравнения термодинамики:

$$T = j/C_m, \quad (2)$$

где T – температура газа, К; j – удельная внутренняя энергия газа, Дж/кг; C_m – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); $C_m = C_\mu/\mu$; C_μ – молярная теплоемкость газа, Дж/(моль·К); μ – молярная масса воздуха, кг/моль.

Передача тепловой энергии от газа стенке канала, происходит за счет конвективного и кондуктивного теплообмена. Вследствии интенсивного турбулентного перемешивания газов и конвективных потоков происходит выравнивание температуры газов по сечению канала. Таким образом, пристеночные тепловые эффекты можно опустить и уравнения Эйлера, в дивергентном виде, в цилиндрической симметрии можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{W}) &= 0, && \text{неразрывности;} \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0 \\ \text{и} \quad \text{и} &&& \text{движения;} \quad (3) \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \text{div}(\rho E \bar{W}) + \text{div}(PW) &= q\Pi && \text{энергии;} \end{aligned}$$

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; q – плотность теплового потока в стенку канала, Дж/(м²·с); Π – периметр канала, м.

Баланс тепловой энергии в теплообмене со стенкой канала, представленный в правой части уравнения энергии (3) членом $q\Pi$, будем учитывать граничными условиями III рода по теплопроводности, которые возможно

применить для данного вида теплообмена [13]:

$$q = \alpha_s (T_s - T) F \Delta t, \quad (4)$$

где α_s – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); T_s – температура стенки, К; T – средняя по сечению канала температура газа, К; F – площадь на которой происходит теплообмена, м²; Δt – время теплообмена, с.

Коэффициент теплообмена (теплоотдачи) α_s , который по определению является количеством теплоты, распространяющегося через единичную поверхность при единичной разности температур, определяют следующим образом [14]:

$$\alpha_s = \frac{N_u \cdot \lambda_n}{D_{\text{экв}}}, \quad (5)$$

где N_u – число Нуссельта; λ_n – коэффициент теплопроводности горных пород, Вт/(м·К);

$$N_u = 0,22 R_e^{0,5} P_r^{0,47} B, \quad (6)$$

где P_r – число Прандтля;

$$P_r = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda_g}, \quad (7)$$

где λ_g – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К); μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с; c_p – изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); R_e – число Рейнольдса, для цилиндрического канала определяется по формуле [15]:

$$R_e = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2}{k+1}} p \cdot \rho \frac{q D_{\text{экв}}}{\mu}, \quad (8)$$

где q – приведенный расход газа через расчетную ячейку; k – показатель адиабаты воздуха, $k = 1,4$; $D_{\text{экв}}$ – эквивалентный

диаметр канала, м, $D_{\text{экв}} = \frac{4 S}{\Pi}$; S – поперечное сечение канала, м²; B – поправочный коэффициент, учитывающий влияние шероховатости стенок на процесс теплообмена, определяется по следующей зависимости [15]:

$$\exp\left[\frac{\left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt}}{\left(\frac{l}{\delta}\right)}\right] \cdot \left(\frac{l}{\delta}\right) = 13 \quad (9)$$

где l – характерное расстояние между выступами шероховатости, м; δ – высота выступа, м.

Реализация учета теплопередачи от газового потока в стенку канала в численной схеме будет выглядеть следующим образом:

На Эйлеровом этапе (первый расчетный цикл):

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{i,j}^n &= u_{i,j}^n - \frac{P_{i+0,5,j}^n - P_{i-0,5,j}^n}{\Delta z} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \\ \tilde{v}_{i,j}^n &= v_{i,j}^n - \frac{P_{i,j+0,5}^n - P_{i,j-0,5}^n}{\Delta r} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \\ \tilde{E}_{i,j}^n &= E_{i,j}^n - \left[\frac{j P_{i,j+0,5}^n v_{i,j-0,5}^n - (j-1) P_{i,j-0,5}^n v_{i,j-0,5}^n}{(j-0,5) \Delta r} + \right. \\ &+ \left. \frac{P_{i+0,5,j}^n u_{i+0,5,j}^n - P_{i-0,5,j}^n u_{i-0,5,j}^n}{\Delta z} \right] \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n} + \\ &+ AL(T_0 - T_{i,j}^n) \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}. \end{aligned} \quad (11)$$

Для тестового расчета оценим значения коэффициента теплообмена газового потока, который движется за фронтом ударной волны со стенками канала подземного сооружения. Материалом стенки подземных сооружений, как правило, является кирпич, бетон, железобетон. В подземных выработках, в первом приближении, можно считать стенкой горную породу (песчаные, глинистые сланцы, песчаники).

Согласно формуле (5) определим число Прандтля на единичной длине канала, атмосфера – воздух при средней температуре в потоке 500 °С, коэффициенте теплопроводности 0,0574 Вт/(м·К):

$$Pr_r = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda_g} = \frac{2,17 \cdot 10^{-5} \cdot 1,003 \cdot 10^3}{0,0574} = 0,47$$

Для расчета числа Нуссельта нам необходимо знать критерий Рейнольдса в

сверхзвуковом потоке за фронтом ударной волны. Поскольку такие данные для ударных волн отсутствуют, по аналогии можно принять значения числа Рейнольдса в потоках газотурбинных авиационных двигателях. В них данный показатель в номинальных и форсажных режимах изменяется в пределах $2 \cdot 10^5 \dots 8 \cdot 10^7$ [16].

Так, поправочный коэффициент учитывающий влияние шероховатости определим для условий выработки подземного сооружения закрепленной арочной крепью из спецпрофиля СВП. Расстояние между рамами крепи 1 м, высота выступа 0,2 м. Тогда, согласно (9) отношение:

$$\left(\frac{l}{\delta}\right) = \left(\frac{1}{0,2}\right) = 5 < \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} = 13_{opt}$$

соответственно

$$\exp\left[\frac{\left(\frac{l}{\delta}\right)}{\left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt}}\right] = \exp\left[\frac{5}{13}\right] = 1,4$$

Тогда:

$$\begin{aligned} N_u &= 0,22 R_e^{0,5} P_r^{0,47} B = \\ &= 0,22 \cdot (5 \cdot 10^7)^{0,5} \cdot (0,47)^{0,47} \cdot 1,4 = 1524 \end{aligned}$$

Коэффициент теплопроводности для песчаника, который по теплофизическим свойствам близок к строительному бетону и находится близко к значению 2,18 Вт/(м·К).

В итоге, коэффициент теплоотдачи составит:

$$\alpha_s = \frac{N_u \cdot \lambda_n}{D_{экв}} = \frac{1524 \cdot 2,18}{1} = 3323 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Оценим работу численной схемы модифицированного метода крупных частиц учитывающей теплообмен ударной воздушной волны со стенками протяженного канала при изменении коэффициента теплообмена от 0 до 10000 Вт/(м²·К). Тестовая задача распад разрыва выполнена для условия расположения источника взрыва в тупиковой части секции высокого давления ударной трубы. Размер секции высокого давления 2 м, секция разгрузки 5 м (рис. 2).

Исходя из результатов численного эксперимента, влияние теплообмена газового потока со стенкой канала не имеет решающую роль в формировании параметров ударных воздушных волн, несмотря на

значительную оценочную величину коэффициента теплообмена порядка $3\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Это объясняется тем, что время контакта с большими градиентами температур между газом и стенкой находится в субмиллисекундных пределах, что и дает незначительную диссипацию тепловой энергии потока в стенку канала. Так, согласно графиков (рис. 2–5) основные параметры в ближней зоне за счет теплоотдачи снижаются не более чем на 1–5 %. Однако, существует двойная взаимосвязь степени снижения энергии ударной воздушной волны: с одной стороны, в ближней зоне при ограниченном времени с момента начала взрыва существует значительный градиент температур. Далее, по мере накопления времени контакта градиент температур снижается.

Для установления распределения коэффициента снижения энергии ударной воздушной волны в зонах ее распространения, за счет теплопотерь, нами был проведен численный эксперимент в условиях распространения волны на расстоянии до 300 м. Начальные условия: давление взрыва $P_n = 1\ \text{МПа}$, длина секции детонации $L_D = 2\ \text{м}$, диаметр канала $d_k = 1\ \text{м}$, начальная плотность продуктов взрыва $\rho_{\text{ПД}} = 1,1\ \text{кг}/\text{м}^3$. В секции разгрузки физические параметры среды приняты для характеристик воздуха.

Коэффициент снижения параметров k_s ударной волны (P, u, ρ, E) определяется как отношение:

$$k_s = 1 - \frac{f_p}{f}, \quad (12)$$

где f_p, f – амплитуда параметра во фронте ударной волны с учетом и без учета теплопотерь.

Результаты моделирования приведены на рисунке 6.

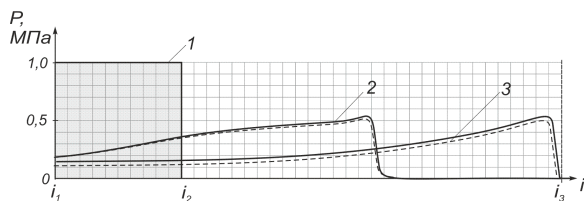


Рис. 2. Результат численного моделирования влияния теплообмена со стенкой канала: 1, 2, 3 – давление в момент времени 0; 3,1; 7,1 мс; сплошная линия $\alpha = 0\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, штриховая линия – $\alpha = 10\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ / Fig. 2. The results of numerical

simulation of the effect of heat exchange with the channel wall: 1, 2, 3 – pressure at time 0; 3,1; 7,1 ms; solid line $\alpha = 0\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, dashed line – $\alpha = 10\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

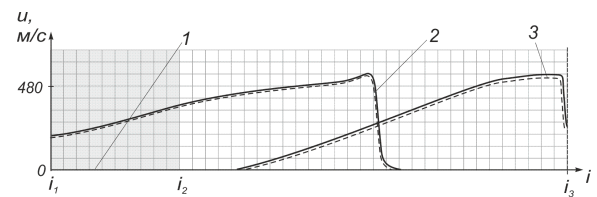


Рис. 3. Результат численного моделирования влияния теплообмена со стенкой канала: 1, 2, 3 – скорость газового потока на момент времени 0; 3,1; 7,1 мс; сплошная линия $\alpha = 0\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, штриховая линия – $\alpha = 10\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ / Fig. 3. The results of numerical simulation of the effect of heat exchange with the channel wall: 1, 2, 3 – velocity at time 0; 3,1; 7,1 ms; solid line $\alpha = 0\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, dashed line – $\alpha = 10\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

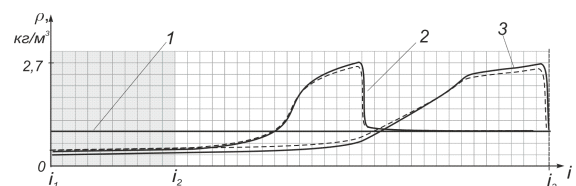


Рис. 4. Результаты численного моделирования влияние теплообмена со стенкой канала: 1, 2, 3 – плотность газового потока на момент времени 0; 3,1; 7,1 мс; сплошная линия $\alpha = 0\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, штриховая линия – $\alpha = 10\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ / Fig. 4. The results of numerical simulation of the effect of heat exchange with the channel wall: 1, 2, 3 – gas flow density at time 0; 3,1; 7,1 ms; solid line $\alpha = 0\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, dashed line – $\alpha = 10\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

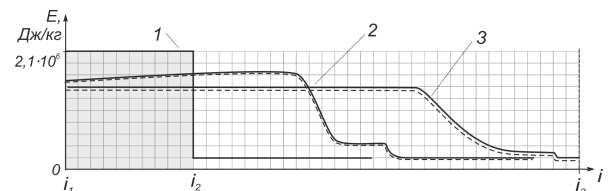


Рис. 5. Результаты численного моделирования влияние теплообмена со стенкой канала: 1, 2, 3 – удельная полная энергия газового потока на момент времени 0; 3,1; 7,1 мс; сплошная линия $\alpha = 0\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, штриховая линия – $\alpha = 10\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ / Fig. 5. The results of numerical simulation of the effect of heat exchange with the channel wall: 1, 2, 3 – specific energy flow of gas at time 0; 3,1; 7,1 ms; solid line $\alpha = 0\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, dashed line – $\alpha = 10\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

Согласно результатам моделирования наибольшее относительное снижение происходит по параметру удельной полной энергии среды – на 5 %, давление на 3 %, плотность 2,5 %, падение скорости 2 %, при максимальном значении коэффициента теплообмена. Причем интенсивное нарастание теплопотерь происходит в зоне 3...5 длин участка газозвушной смеси,

далее степень нарастания снижается и на всем остальном пути изменяется незначительно. При уменьшении коэффициента теплообмена вдвое зона нарастания коэффициента k_s увеличивается до $5 \dots 7 x/L_D$.

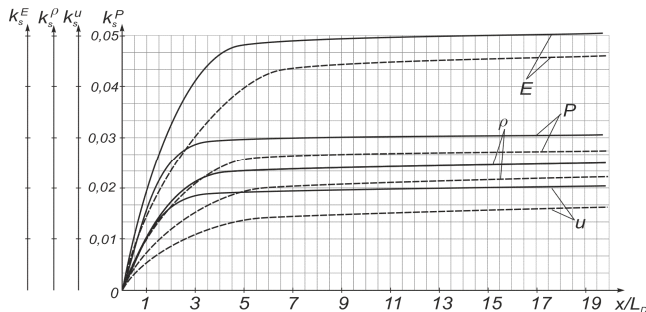


Рис. 6. Зависимость коэффициента снижения амплитуды параметров ударной воздушной волны от расстояния до эпицентра взрыва: сплошная линия $\alpha = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, штриховая линия –

$\alpha = 10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ / Fig. 6. Dependence of the coefficient of reduction of the amplitude of the parameters of a shock air wave from the distance to the explosion epicenter: solid line $\alpha = 5000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, dashed line – $\alpha = 10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Выводы. Таким образом, полученные путем численного моделирования коэффициенты снижения параметров k_s за счет теплотерь в ближней зоне (до $10 x/L_D$), в зависимости от размеров участка газозадушной смеси, можно аппроксимировать на весь путь распространения ударной воздушной волны. Это дает возможность уменьшить объемы вычислений для прогнозирования расстояний и зон поражения ударной воздушной волной при аварийных взрывах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агеев В. Г. Математическая модель формирования ударных волн в горных выработках при взрывах метана / В. Г. Агеев. // Горноспасательное дело. – 2010. – Вып. 47. – С. 5–10.
2. 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 р.). – Дніпропетровськ : НГУ, 2012. – С. 12–16.
3. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent : учеб. пособие / [О. В. Батурич, Н. В. Батурич, В. Н. Матвеев]. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 151 с.
4. Метод крупных частиц в газовой динамике : монография / [О. М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов]. – Москва : Наука, 1982. – 391 с.
5. Васенин И. М. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И. М. Васенин, Э. Р. Шрагер, А. Ю. Крайнов, Д. Ю. Палеев // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3, № 2. – С. 155–163.
6. Греков С. П. Методика расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли в шахтах / С. П. Греков, И. Н. Зинченко, В. С. Карманов // Горноспасательное дело. – 2010. – Вып. 47. – С. 17–25.
7. Лукашов О. Ю. О комплексном подходе к моделированию аварийной ситуации при взрыве газа в угольной шахте / О. Ю. Лукашов // Вестник Томского государственного университета. – 2014. – № 6(32). – С. 86–93.
8. Налісько Н. Н. Численный расчет динамической нагрузки от воздействия воздушных ударных волн на инженерные сооружения / Н. Н. Налісько // Высокоэнергетические системы, процессы и их модели. – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2013. – С. 255–266.
9. Налісько Н. Н. Взаимодействие ударных воздушных волн со стенками горных выработок / Н. Н. Налісько // Горноспасательное дело. – 2014. – Вып. 51. – С. 43–57.
10. Справочник по теплообменникам : в 2-х т., Т. 2 / Пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко и др. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
11. Чжан Ц. Оценки опасности взрывов смесей метана с воздухом в шахтах / Ц. Чжан, В. Ли, Б. Цинь, Ю. Дуань // Физика горения и взрыва. – 2010. – № 6. – С. 66–72.
12. ANSYS для инженеров : справ. пособие / [А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А.Ф. Смалюк]. – Москва : Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
13. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое : монография / [С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев]. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.
14. Численные методы теории конвективного теплообмена : монография / [В. Ю. Безуглый, Н. М. Беляев]. – Киев–Донецк : Вища школа, 1984. – 176 с.
15. Беляев Н. М. Нестационарный теплообмен в трубах : монография / Н. М. Беляев. – Киев–Донецк : Вища школа, 1980. – 216 с.
16. Виноградов Л. В. Исследования влияния числа Рейнольдса на характеристики радиального вентилятора / Л. В. Виноградов, И. В. Евтеев, М. Талавера // Вестник РУДН. Инженерные исследования. – 2000. – № 3. – С. 50–52.

REFERENCES

1. Ageev V.G. *Matematicheskaya model formirovaniya udarnykh voln v gornykh vyirabotkakh pri vzryivakh metana* [The mathematical model of the shock wave formation in the mines by the methane explosions]. *Gornospasatelnoe delo* [The mine rescue work]. 2010, issue 47, pp. 5–10. (in Russian).
2. Ageev V.G. and Zinchenko I.N. *Modelirovanie rasprostraneniya udarnykh voln pri mgnovennoy i tsepnoy reaktsiyah gorennya metana i pyili v gornykh vyirabotkakh* [Modeling of shock waves propagation at momentary and chain reaction of methane and dust combustion in mine working]. *Forum hirnykiv – 2012 : materialy mizhnarodnoi konferentsii* [Miners forum – 2012 : materials of the international conference]. 3–6 of October 2012, Dnipropetrovsk : National Mine University Publ., 2012, pp. 12–16. (in Russian).
3. Baturin O.V., Baturin N.V. and Matveev V.N. *Raschet techeniy zhidkostey i gazov s pomoschy universalnogo programmynogo kompleksa Fluent. Ucheb. posobie* [Calculation of flows of liquids and gases by means of a universal software package Fluent. Tutorial]. Samara : Samarskiy gosudarstvenniy aerokosmicheskiy universitet, 2009, 151 p. (in Russian).
4. Belotserkovskiy O.M. and Davydov J.M. *Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike* [The large particles method in the gas dynamics]. Moscow : Nauka Publ., 1982, 391 p. (in Russian).
5. Vasenin I.M., Schragar E.R., Krajnov A.J. and Paleev D.J. *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov ventilyatsii seti vyirabotok ugolnoy shahty* [The mathematical modeling of the non-stationary ventilation processes in the coal mines workings network]. *Kompyuternyye issledovaniya i modelirovanie* [The computer studies and modeling]. 2011, vol. 3, no. 2, pp. 155–163. (in Russian).
6. Grekov S.P., Zinchenko I.N. and Karmanov V.S. *Metodika rascheta parametrov vozdukhnykh udarnykh voln pri vzryivakh gaza i pyili v shahtah* [The calculation methodology of the of air shock waves parameters by the gas and dust explosions in mines]. *Gornospasatelnoe delo* [The mine rescue work]. 2010, issue 47, pp. 17–25. (in Russian).
7. Lukashov O.Yu. *O kompleksnom podhode k modelirovaniyu avariynoy situatsii pri vzryive gaza v ugolnoy shahte* [About the complex approach to the modeling the emergency situation by the gas explosion in a coal mine]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University]. 2014, no. 6(32), pp. 86–93. (in Russian).
8. Nalisko N.N. *Chislennyiy raschet dinamicheskoy nagruzki ot vozdeystviya vozdukhnykh udarnykh voln na inzhenernyye sooruzheniya* [The numerical account of the dynamic load from the air shock wave effect on the engineering buildings]. *Vysokoenergeticheskie sistemy, protsessy i ih modeli* [High-energy systems, processes and their models]. Dnepropetrovsk : National Mine University, 2013, pp. 255–266. (in Russian).
9. Nalisko N.N. *Vzaimodeystvie udarnykh vozdukhnykh voln so stenkami gornykh vyirabotok* [Interaction of shock air waves with walls of mine excavation]. *Gornospasatelnoe delo* [Mine rescue work]. 2014, issue 51, pp. 43–57. (in Russian).
10. Reference book on heat exchangers : in 2 vol. Vol. 2. Transl. from English under red. Martynenko O.G. and others. Moscow : Energoatomizdat Publ., 1987, 352 p. (in Russian).
11. Zhang C., Lee V., Cin B. and Duan J. *Otsenki opasnosti vzryivov smesey metana s vozduhom v shahtah* [The danger estimation of the methane and air mixture explosions in mines]. *Fizika gorennya i vzryiva* [The combustion and explosion physics]. 2010, no. 6, pp. 66–72. (in Russian).
12. Chigarev A.V., Kravchuk A.S. and Smalyuk A.F. *ANSYS dlya inzhenerov : sprav. posobie* [ANSYS for Engineers : Reference tutorial]. Moscow : Mechanical engineering-1 Publ., 2004, 512 p. (in Russian).
13. Kutateladze S.S. and Leontev A.I. *Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pogrannom sloe* [Heat and mass transfer and friction in a turbulent boundary layer]. Moscow : Energoatomizdat, 1985, 320 p. (in Russian).
14. Bezuglyiy V.Yu. and Belyaev N.M. *Chislennyye metody teorii konvektivnogo teploobmena* [Numerical methods of the theory of convective heat and mass transfer]. Kyiv–Donetsk : Vyscha shkola, 1984, 176 p. (in Russian).
15. Belyaev N.M. *Nestatsionarnyy teploobmen v trubah* [Unsteady heat transfer in pipes]. Kyiv–Donetsk : Vyscha shkola, 1980, 216 p. (in Russian).
16. Vinogradov L.V., Evteev I.V. and Talavera M. *Issledovaniya vliyaniya chisla Reynoldsa na harakteristiki radialnogo ventilyatora* [Studies on the effect of Reynolds number on the characteristics of a radial fan]. *Vesnik RUDN. Inzhenernyye issledovaniya* [Bulletin of RUDN. Engineering research]. No. 3, 2000, pp. 50–52. (in Russian).

Надійшла до редакції: 24.12.2018 р.