

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Сибирский государственный индустриальный университет»

ВК «Кузбасская ярмарка»

**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 9 - 2023

Главный редактор
д.т.н., проф. Фрянов В.Н.

Редакционная коллегия:
чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Клишин В.И., д.т.н., проф. Никитенко С.М.,
д.т.н. Павлова Л.Д. (технический редактор), д.т.н., проф. Домрачев А.Н.,
д.э.н., проф. Петрова Т.В.

Н 340 Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов : науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2023. - № 9. – 390 с.

Рассмотрены аспекты развития инновационных наукоемких технологий диверсификации угольного производства и обобщены результаты научных исследований, в том числе создание роботизированных и автоматизированных угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий, базирующиеся на использовании прорывных технологий добычи угля и метана, комплексной переработке этих продуктов в угледобывающих регионах и реализации энергетической продукции потребителям в виде тепловой и электрической энергии.

Журнал предназначен для научных и научно-технических работников, специалистов угольной промышленности, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

Номер подготовлен на основе материалов Международной научно-практической конференции «Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 6-9 июня 2023 г.).

Основан в 2015 г.
Выходит 1 раз в год

Учредитель - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УДК 622.2
ББК 33.1

1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	298
2 – ООО «Горэлектросеть», г. Новокузнецк, Россия	298
3 – ООО «Фаза», г. Новокузнецк, Россия	298
ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	301
ВЕРОЯТНОСТЬ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ В ЗОНЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО НАРУШЕНИЯ	303
д.т.н. Греков С.П., к.т.н. Головченко Е.А., Карасёва В.В.	303
НИИ «Респиратор» МЧС ДНР, г. Донецк, Донецкая народная республика, Россия	303
РАСЧЁТ ИЗОЛИНИЙ ТЕМПЕРАТУР И КОНЦЕНТРАЦИЙ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ НА ПОРОДНОМ ОТВАЛЕ	306
Пашковский О.П., к.т.н. Головченко Е.А.	306
НИИ «Респиратор» МЧС ДНР, г. Донецк, Донецкая народная республика, Россия	306
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ШАХТ ПРИ ПОЖАРАХ	309
д.т.н. Агеев В.Г., к.т.н. Агарков А.В., Мавроди А.В.	309
НИИ «Респиратор» МЧС ДНР, г. Донецк, Донецкая народная республика, Россия	309
ПОТЕРИ РАСХОДА АЗОТА ПРИ ИЗОЛЯЦИИ И ТУШЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ	313
Коврижкин О.И.	313
Оперативный военизированный горноспасательный отряд МЧС ДНР, г. Донецк, Донецкая народная республика, Россия	313
СПОСОБ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УВЛАЖЕНИЯ ПЛАСТА НА ИЗМЕНЕНИЯ ГАЗОКИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНОГО УГЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИННОВАЦИОННОГО ГОРНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА	317
к.т.н. Плаксин М.С., Родин Р.И., Рябцев А.А., Альков В.И.	317
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	317
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ ПО ВЫРАБОТКАМ И ЕЁ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ИНЖЕНЕРНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ	322
¹ к.т.н. Говорухин Ю.М., ^{1,2} д.т.н. Домрачев А.Н., ¹ к.т.н. Криволапов В.Г., ^{1,3} д.т.н. Палеев Д.Ю.	322
1 – Национальный горноспасательный центр, г. Новокузнецк, Россия	322
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	322
3 – Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия	322
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЛЩИНЫ ИЗОЛИРУЮЩИХ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК	333
¹ к.т.н. Говорухин Ю.М., ^{1,2} д.т.н. Домрачев А.Н., ¹ к.т.н. Криволапов В.Г., ^{1,3} д.т.н. Палеев Д.Ю.	333
1 – Национальный горноспасательный центр, г. Новокузнецк, Россия	333
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	333
3 – Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия	333
КОНТРОЛЬ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ЕСТЕСТВЕННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ	336
Мальшков С.Ю., к.т.н. Гордеев В.Ф., Поливач В.И.	336
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия	336
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ РАЗРЕЗА «АНГРЕНСКИЙ», КАК ОБЪЕКТЫ ПРОМЫШЛЕННО–ОХРАННОГО ЗНАЧЕНИЯ	341

13. Хашин В.Н. Увлажнение угольных пластов на шахтах Прокопьевского месторождения Кузбасса // Методы нагнетания воды в угольные пласты: сб. труд. всесоюз. науч.-техн. совещ., 3-4 июля 1963 г., Кемерово. – М.: Недра, 1965. – С. 122 – 129.

УДК 622.868:622.81:004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ ПО ВЫРАБОТКАМ И ЕЁ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ИНЖЕНЕРНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ

¹к.т.н. Говорухин Ю.М., ^{1,2}д.т.н. Домрачев А.Н., ¹к.т.н. Криволапов В.Г.,
^{1,3}д.т.н. Палеев Д.Ю.

1 – Национальный горноспасательный центр, г. Новокузнецк, Россия

2 – Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия

3 – Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

Аннотация. Выполнено газодинамическое моделирование процесса распространения ударной воздушной волны по горным выработкам. Численное моделирование проведено для трёхмерной и одномерной постановки задачи. Получены значения давлений во фронте ударной воздушной волны на расстоянии равном пяти длинам исходной зоны загорания при взрывах газозвушной смеси и угольной пыли. Подтверждена работоспособность формулы Крюссара – Измайлова для определения давлений отражения волны от перемычки для условий давлений, развиваемых при взрывах в подземных выработках шахт.

Ключевые слова: горные выработки, численное моделирование, взрыв газозвушной смеси и угольной пыли, ударная воздушная волна, изолирующие взрывоустойчивые перемычки, избыточное давление, взаимодействие.

Введение. При изоляции пожарного участка из-за нарушения проветривания существует опасность формирования зон взрывоопасных скоплений рудничных газов вблизи источника высокой температуры [1, 6, 10, 15]. При взрыве газозвушной смеси (далее – ГВС) и угольной пыли формируется фронт ударной воздушной волны (волны сжатия, далее – УВВ). С целью определения оптимальных параметров изолирующих взрывоустойчивых перемычек необходимо знать величину избыточного давления во фронте УВВ, подходящей к ним, а также величину давления отражения от них. В связи с этим выполнено моделирование соответствующих газодинамических процессов.

Математическая постановка задачи. Для проведения исследования использованы: открытая C++ библиотека OpenFOAM (The OpenFOAM Foundation Ltd.) [5-8, 12, 13, 21, 22], программа «Ударная волна» [1, 9, 15, 16], а также аналитический метод, разработанный для проектирования защитных сооружений гражданской обороны в подземных горных выработках [2, 14, 20], и ориентированный на расчёт максимального избыточного давления, оказываемого УВВ затекания на инженерные сооружения. Аналитический метод адаптирован А.М. Чеховских и В.М. Плотниковым по результатам экспериментальных исследований для условий взрывов ГВС и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт [3, 4, 18, 19].

При использовании пакета OpenFOAM решается следующая система трёхмерных осреднённых уравнений для сжимаемого газа:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i + \bar{\rho} \widetilde{u_j' u_i'}) + \delta_{ij} \bar{p} - \bar{\tau}_{ji} = 0, \quad (2)$$

$$\bar{\tau}_{ji} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu \frac{\partial u_m}{\partial x_m}, \quad (3)$$

$$\bar{\tau}_{t,ij} \equiv -\bar{\rho} \widetilde{u_j'' u_i''} = \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu_t \frac{\partial \tilde{u}_m}{\partial x_m} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{\rho} k, \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{2} \widetilde{u_i'' u_i''}, \quad \mu_t = C_\mu \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{E}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{H} + \bar{\rho} \widetilde{u_j'' H''} + \bar{q}_j - \tilde{u}_i \bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u_i'' - \bar{\rho} u_i'' (\widetilde{\tau_{ij}/\rho})'' \right] = 0, \quad (6)$$

$$\bar{\rho} \widetilde{u_j'' H''} = \bar{\rho} \widetilde{u_j'' h''} + \bar{\rho} \tilde{u}_k \widetilde{u_j'' u_k''} + \frac{1}{2} \bar{\rho} \widetilde{u_j'' u_k''^2}, \quad \frac{1}{2} \bar{\rho} \widetilde{u_j'' u_k''^2} = -\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}, \quad (7)$$

$$\widetilde{u_j'' h''} = -\frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} = -\frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} = -\lambda_t \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} = q_{t,j}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - [1 + \varphi(M_t)] \bar{\rho} \varepsilon, \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\rho} \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \varepsilon), \quad (10)$$

$$\tilde{E} = \tilde{e} + \frac{\tilde{u}_t^2}{2}, \quad \bar{q}_j = -\lambda \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j}, \quad \bar{p} = \bar{\rho} R_\gamma \tilde{T}, \quad R_\gamma = R/M, \quad (11)$$

где $\bar{\rho}$ – осреднённая плотность воздуха, кг/м³; t – время, с; \tilde{u}_i – средние массовые значения компонент вектора скорости по соответствующим осям декартовой системы координат (далее – ДСК), м/с (для $i, j, k, m = 1, 2, 3$); u_i'' – пульсационная составляющая вектора скорости по соответствующим осям ДСК, м/с; δ_{ij} – символ Кронекера; \bar{p} – осреднённое давление среды, Па; $\bar{\tau}_{ij}$ – осреднённый тензор вязких напряжений, Па; $\bar{\tau}_{t,ij}$ – тензор напряжений Рейнольдса; μ – молекулярная динамическая вязкость воздуха, Па·с; μ_t – турбулентная динамическая вязкость воздуха, Па·с; k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²; ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, м²/с³; \tilde{E} – среднее массовое значение полной энергии газа, Дж; \tilde{H} и H'' – среднее массовое значение полной энтальпии и её пульсационная составляющая; \bar{q}_j – осреднённый тепловой поток, Вт; \tilde{h} и h'' – среднее массовое значение энтальпии и её пульсационная составляющая, Дж; Pr_t – турбулентное число Прандтля; \tilde{T} – среднее массовое значение температуры среды, К; $q_{t,j}$ – дополнительный (турбулентный) тепловой поток, Вт; P_k – генерация турбулентной кинетической энергии; $\varphi(M_t)$ – функция, учитывающая влияние сжимаемости газа; $C_\mu=0,09$, $\sigma_k=1$, $\sigma_\varepsilon=1,3$, $C_{\varepsilon 1}=1,44$, $C_{\varepsilon 2}=1,92$ – числовые константы; \tilde{e} – осреднённая внутренняя энергия газа, Дж; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); R_γ – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К); R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); M – молекулярная масса, кг/кмоль; c_v – теплоёмкость при постоянной объёме, Дж/К; c_p – теплоёмкость при постоянном давлении, Дж/К; γ – показатель адиабаты.

Применение данной системы уравнений обусловлено сложностью ударно-волновых процессов, протекающих в выработках, в т. ч. при взаимодействии с перемычками, а также необходимостью учёта турбулентности и шероховатости стенок с точки зрения диссипации энергии. Процесс рассматривается адиабатическим. Интегрирование дифференциальных уравнений основывается на методе контрольных объёмов (далее – метод МКО). Для связи уравнений по скорости и давлению применён алгоритм PIMPLE (комбинация алгоритмов PISO и SIMPLE метода Патанкара [17]). При работе с OpenFOAM C++ библиотекой и обработке результатов моделирования использованы GNU/Linux, командная оболочка bash, Vim, GCC, Xfig и пакет LibreOffice Calc.

При использовании программы «Ударная волна» шахта представляется как пространственная сеть протяжённых выработок с сопряжениями, имеющими координаты x , y , z . Сеть выработок интерпретируется как пространственная система каналов с N прямолинейными участками, концы которых сопряжены с другими каналами, участками изменения конфигурации и сечения. При этом на прямолинейном участке выработки для расчёта пространства УВВ используются одномерные уравнения газовой динамики, в которых учтены процессы силового и теплового взаимодействия газового потока со стенками:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u S) = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_f u S) = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u S) + \frac{\partial}{\partial x}[(\rho u^2 + p)S] = -\tau_{тр}\Pi + p \frac{\partial S}{\partial x}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E S) + \frac{\partial}{\partial x}[(\rho E u + p u)S] = q\Pi, \quad (15)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2}{2}, \quad p = \rho R T, \quad (16)$$

$$\tau_{тр} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}, \quad (17)$$

$$q = \alpha(T_s - T), \quad Nu = 0,022 Re^{0,8} Pr^{0,47} B, \quad Pr = \frac{\mu c}{\lambda_g}, \quad Nu = \frac{\alpha D_{эКВ}}{\lambda_g}, \quad (18)$$

$$B = \begin{cases} \exp\left(\frac{(l/\delta)_{opt}}{(l/\delta)}\right), & \frac{l}{\delta} > \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} \\ \exp\left(\frac{(l/\delta)}{(l/\delta)_{opt}}\right), & \frac{l}{\delta} < \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} \end{cases} \quad \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} = 13, \quad (19)$$

где t – время, с; x – координата, м; ρ – плотность воздуха, кг/м³; ρ_f – плотность продуктов взрыва, кг/м³; p – давление, Па; T – температура, К; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); u – скорость, м/с; E – полная энергия, Дж/кг; S – площадь поперечного сечения выработки, м²; Π – её периметр, м; $\tau_{тр}$ – сила трения о стенки выработки, Па/м; q – тепловой поток в стенки выработки, Вт; c_v – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); c_f – коэффициент сопротивления, м⁻¹; Re – число Рейнольдса; Nu – число Нуссельта; Pr – число Прандтля; λ_g – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); c – теплоёмкость, Дж/(кг·К); B – поправочный коэффициент, который учитывает влияние шероховатости стенок на процесс теплообмена; l – характерное расстояние между выступами шероховатости, м; δ – характерная величина выступа шероховатости, м.

Трёхмерные уравнения газовой динамики при движении потока на сопряжениях:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f u_i) = 0, \quad (21)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j + p \delta_{ij}) = 0, \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i E + u_i p) = 0, \quad (23)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}, \quad p = \rho R T, \quad (24)$$

где u_i – компоненты вектора скорости, м/с.

Уравнения аналитического метода для проектирования защитных сооружений гражданской обороны в подземных горных выработках:

$$\Delta P_x = \Delta P_{фн} e^{-K_3 \frac{x}{R_{гидр}}}, \quad (25)$$

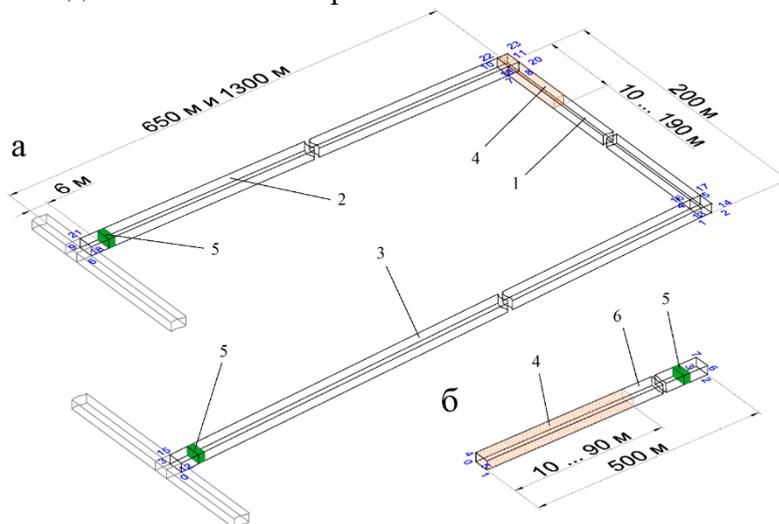
$$\Delta P_{пр} = K_{зат} \Delta P_{н}, \quad (26)$$

$$\Delta P_{отр} = 2\Delta P_{ф} + 6\Delta P_{ф}^2 / (\Delta P_{ф} + 7,2 \cdot P_0), \quad (27)$$

где ΔP_x – затухание избыточного давления во фронте УВВ на прямолинейном участке выработки, МПа; $\Delta P_{фн}$ – избыточное давление в месте отрыва УВВ от продуктов взрыва на прямолинейном участке выработки, либо в начальном её сечении после местного сопротивления, МПа; K_3 – коэффициент затухания, зависящий от коэффициента аэродинамического сопротивления выработки; x – расстояние от зоны отрыва УВВ от продуктов взрыва, либо начала выработки до поворота, её сужения и других изменений, м; $R_{гидр}$ – гидравлический радиус выработки, м; $\Delta P_{пр}$ – избыточное давление УВВ, после прохождения местного сопротивления, МПа; $K_{зат}$ – коэффициент затекания, учитывающий ослабление или увеличение интенсивности УВВ после прохождения сопряжений и углов поворота выработок; $\Delta P_{н}$ – начальное избыточное давление УВВ перед местным сопротивлением, МПа; $\Delta P_{отр}$ – давление отражения УВВ (максимальная нагрузка) при расположении преграды

перпендикулярно направлению её распространению, МПа; ΔP_{ϕ} – избыточное давление во фронте УВВ, подходящей к перемычке, МПа; P_0 – атмосферное давление, МПа.

Геометрия расчётной области, начальные и граничные условия. Для исследования процессов распространения УВВ от зоны взрыва и её взаимодействия с перемычками создано три базовых модели. Две модели выемочного участка с протяжённостью оконтуривающих штреков 650 м (далее – модель 1) и 1300 м (далее – модель 2) и одна – подготовительной выработки (длина – 500 м, далее – модель 3), приведённые на рис. 1. Модели предполагают возведение перемычек на устьях оконтуривающих выемочный столб горных выработок и на устье подготовительной выработки.



- 1 – очистной забой; 2 и 3 – вентиляционный и конвейерный штреки; 4 – зона взрыва (исходная зона загазования); 5 – изолирующие взрывоустойчивые перемычки;
б – подготовительная выработка

Рис. 1. Базовые модели выемочного участка (а) и подготовительной выработки (б), созданные для исследования ударно-волновых процессов

Модели выемочного участка составлены из 5, а подготовительной выработки – 1 блочного суперэлемента, каждый из которых декомпозируется на гексаэдры. Для снижения стоимости вычислений использованы приёмы оптимизации геометрии расчётной области, что не снижает адекватности результатов, т. к. они не имеют влияния на те свойства объекта исследования, которые исследуются. Числами синего цвета обозначены вершины суперэлементов. Максимальный размер ячейки – 0,25 м. Глубина декомпозиции расчётных областей, соответственно, 1422960 (модель 1), 2670960 (модель 2) и 140000 (модель 3) шестигранников. Оранжевым цветом показана зона взрыва (исходная зона загазования).

В табл. 1 приведены основные геометрические параметры моделей и аэродинамические характеристики выработок.

Для программы «Ударная волна» модель построена по соответствующим осевым линиям выработок, глубина декомпозиции расчётной области составляет 4 м. Численное моделирование методом МКО и в программе «Ударная волна» проведено для условий, указанных в табл. 2.

Настройка моделей в части начальных условий выполнена на основе результатов исследований, полученных в СПбГПУ (д.ф.-м.н. Л.Г. Лойцянский), а также в РосНИИГД, ФИЦ УУХ СО РАН, НИ ТГУ (д.т.н. Д.Ю. Палеев, д.ф.-м.н. И.М. Васенин, д.ф.-м.н. Э.Р. Шрагер, д.ф.-м.н. А.Ю. Крайнов и др.) [1, 11, 15]. Исходное давление в зоне взрыва определено для условий взрыва ГВС и угольной пыли.

Протяжённость зоны загазования (табл. 2) выбрана исходя из условия $V_3 \geq 5V_0$ (где V_3 – зона действия УВВ, оторвавшейся от продуктов взрыва; V_0 – длина исходной зоны загазования) [3, 4, 14, 18, 19]. Таким образом, в выработке до места установки инженерного сооружения формируется фронт УВВ.

Таблица 1

Геометрические параметры моделей и аэродинамические характеристики

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Ед. изм.	Значение		
				выемочный участок		подготовительная выработка
				очистной забой	выработки	
1	Ширина	w	м	3,5	5,0	5,0
2	Высота	h	м	3,0	3,0	3,5
3	Площадь сечения	S	м ²	10,5	15,0	17,5
4	Периметр	P	м	13,0	16,0	17,0
5	Длина	$l_{2,6}$	м	200	650 и 1300	500
6	Относительная шероховатость стенок выработок	$\varepsilon_{ш}$	-	0,03095	0,02667	0,02429
7	Коэффициент аэродинамического сопротивления	$\alpha \cdot 10^3$	Н·с ² /м ⁴	8,6976	8,1737	7,8806
8	Расстояние от устья горной выработки до места возведения перемычки	$l_{п}$	м	6,0		
9	Толщина перемычки	$w_{п}$	м	2,0		

Таблица 2

Начальные условия, для которых выполнено моделирование

Модель 1			Модель 2			Модель 3		
$L, м$	\bar{L}	$\Delta P_{ф.зв}, МПа$	$L, м$	\bar{L}	$\Delta P_{ф.зв}, МПа$	$L, м$	\bar{L}	$\Delta P_{ф.зв}, МПа$
10	3,10	0,22	10	3,10	0,22	10	2,43	0,21
30	9,3	0,33	30	9,3	0,33	30	7,29	0,29
50	15,5	0,45	50	15,5	0,45	50	12,14	0,38
70	21,7	0,58	70	21,7	0,58	70	17,00	0,48
90	27,9	0,71	90	27,9	0,71	90	21,86	0,58
110	34,1	0,86	110	34,1	0,86			
			130	40,2	1,02			
			150	46,4	1,20			
			170	52,6	1,38			
			190	58,8	1,58			

Примечание: L – длина зоны загазования, м; \bar{L} – приведённая длина подземной горной выработки; $\Delta P_{ф.зв}$ – избыточное давление в зоне взрыва, МПа.

Как видно из рис. 1, зона загазования задана от сопряжения очистного забоя с вентиляционным штреком и её протяжённость менее длины очистного забоя (модели 1 и 2), а также от забоя подготовительной выработки (модель 3). Для моделей 1 и 2 в программе «Ударная волна» зона загазования не включает сопряжение выработок ввиду специфики построения топологии шахтной вентиляционной сети (далее – ШВС).

Граничные условия поставлены в зависимости геометрических параметров выработок и их взаимного расположения (табл. 1, рис. 1) [1, 15]. Если граница стенка или изолирующая взрывоустойчивая перемычка, то относительно скорости используются условия не протекания и прилипания: $\partial u_i / \partial n = 0, u_i = 0$. Если выработка выходит на поверхность, на этой границе предполагается постоянство давления, плотности, температуры и скорости потока: $p = p_{атм}, \rho = \rho_{атм}, T = T_{атм}, \partial u_i / \partial x_i = 0$. Если выработка граничит с областью ветвления, в качестве граничных условий используются значения потоков массы, импульса и энергии,

определяемые из решения задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах газа: $M = M_1, I = I_1, E = E_1$.

Обработка результатов моделирования и выводы. Динамика избыточного давления во фронте ударной воздушной волны на прямолинейных участках подземных горных выработок.

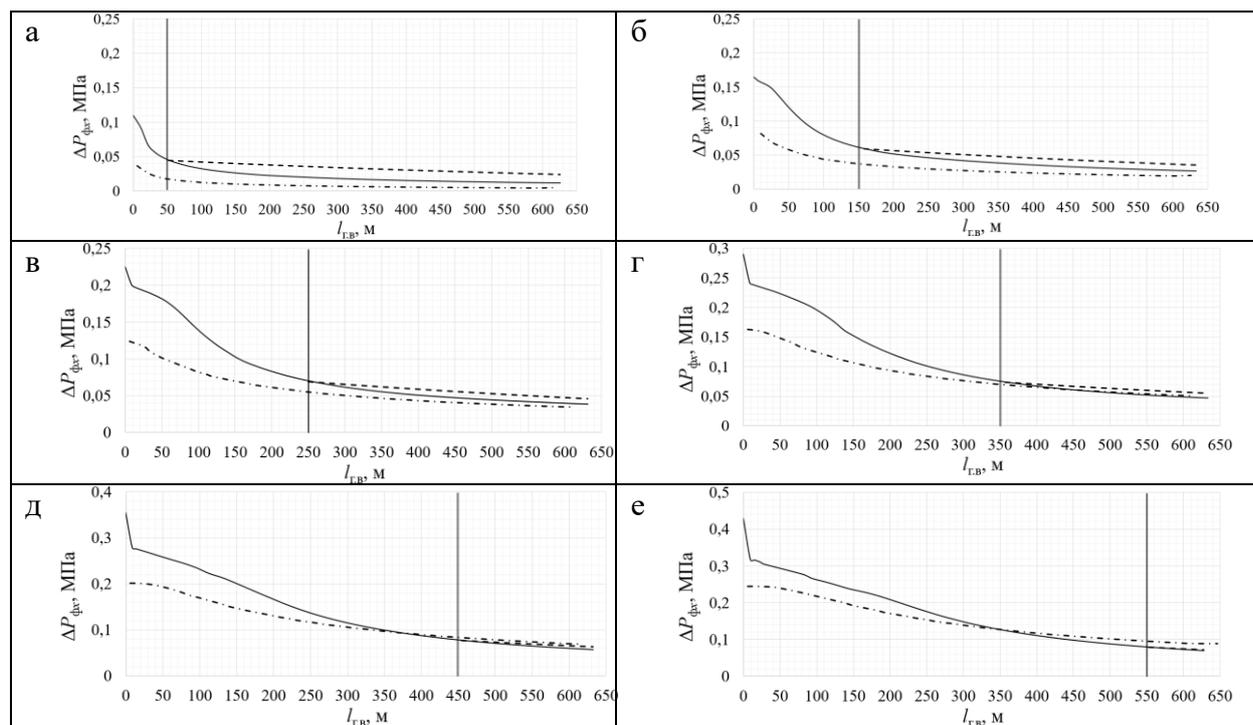
На рис. 2-4 приведены результаты моделирования в части динамики избыточного давления во фронте УВВ $\Delta P_{фв}$, МПа, вдоль вентиляционного штрека (модели 1 и 2), а также вдоль подготовительной выработки (модель 3). На приведённых рисунках использованы следующие обозначения результатов решения газодинамических задач:

сплошная линия – полученные методом МКО с использованием C++ библиотеки (трёхмерная постановка);

штрихпунктирная линия – полученные в программе «Ударная волна» (одномерная постановка);

пунктирная линия – расчёт динамики избыточного давления по аналитической методике, предложенной для проектирования защитных сооружений гражданской обороны (формула 25). В качестве начального избыточного давления $\Delta P_{фн}$ использовано давление, полученное в ходе газодинамического расчёта методом МКО;

двойная сплошная вертикальная линия – зона отрыва УВВ от продуктов взрыва по (на расстоянии от сопряжения с очистным забоем равном пяти длинам исходной зоны загазования $5V_0$).

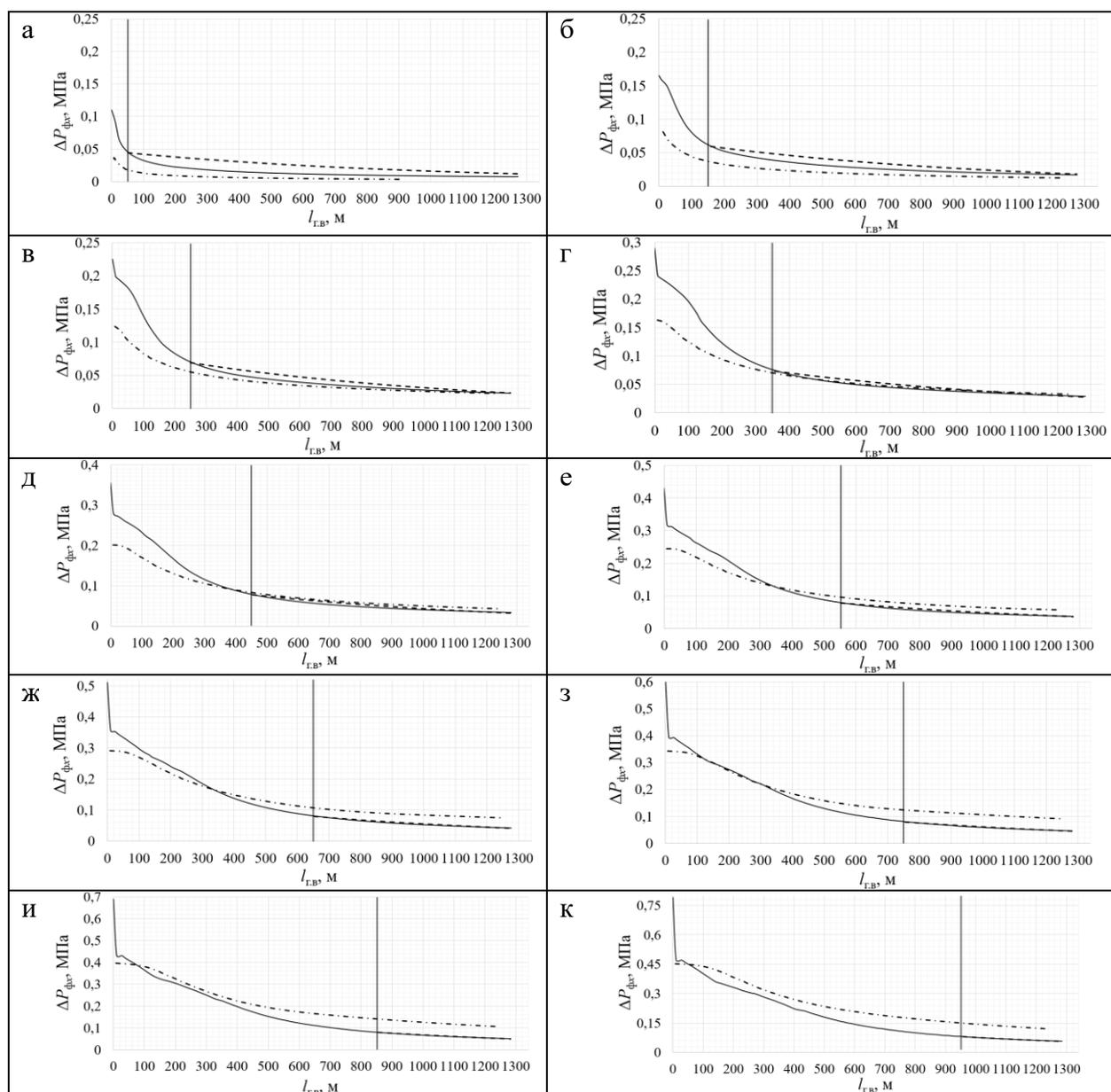


а – $\Delta P_{ф.зв} = 0,22$ МПа; б – $\Delta P_{ф.зв} = 0,33$ МПа; в – $\Delta P_{ф.зв} = 0,45$ МПа; г – $\Delta P_{ф.зв} = 0,58$ МПа; д – $\Delta P_{ф.зв} = 0,71$ МПа; е – $\Delta P_{ф.зв} = 0,86$ МПа

Рис. 2. Динамика избыточного давления во фронте УВВ на прямолинейном участке вентиляционного штрека (модель 1)

Как видно из приведённых рис. 2-4 результаты газодинамического расчёта в программе «Ударная волна» и с использованием C++ библиотеки OpenFOAM на участках $V_3 \geq 5V_0$ сопоставимы между собой, а аналитический метод гражданской обороны аналогично характеризует затухание УВВ. Для моделей 1 и 2 различие между результатами на начальном участке вентиляционного штрека обусловлено спецификой построения топологии ШВС и невозможностью использования сопряжений в качестве частей зоны загазования в

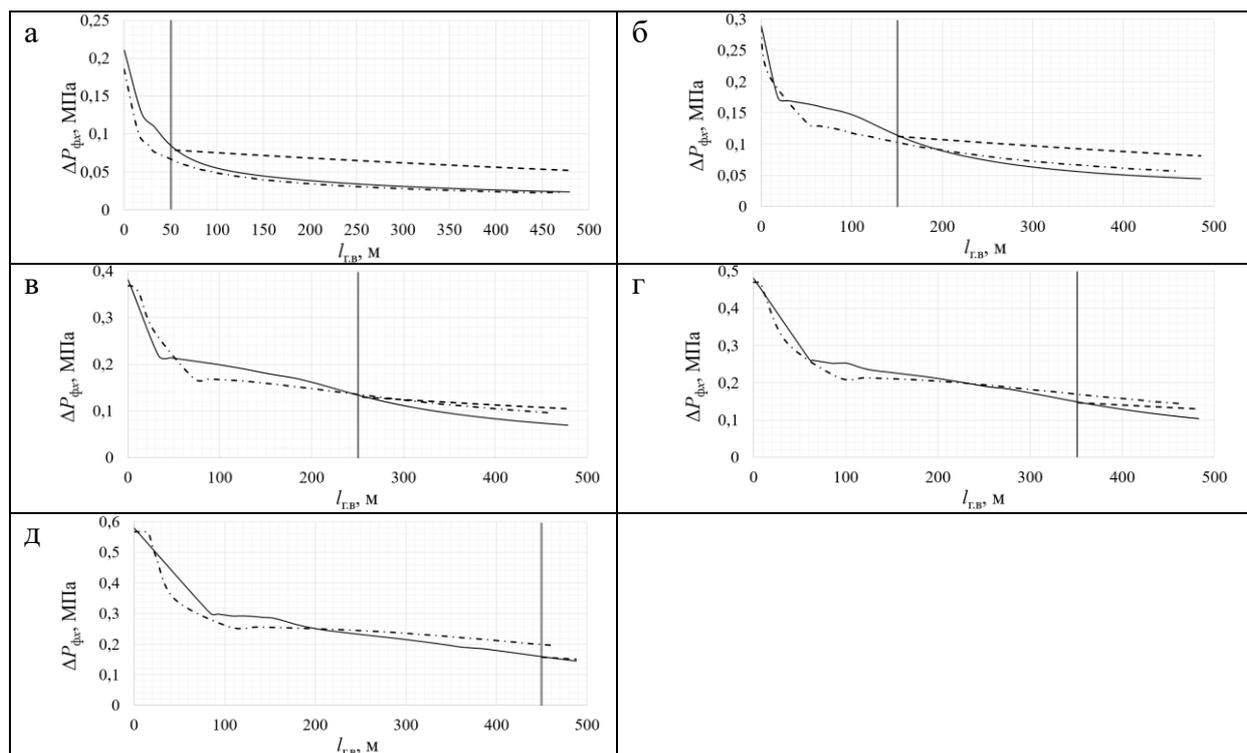
программе «Ударная волна» и наличием дополнительных эффектов отражения при протекании сложного ударно волнового процесса в сопряжении.



а – $\Delta P_{ф.зв} = 0,22$ МПа; б – $\Delta P_{ф.зв} = 0,33$ МПа; в – $\Delta P_{ф.зв} = 0,45$ МПа; г – $\Delta P_{ф.зв} = 0,58$ МПа;
 д – $\Delta P_{ф.зв} = 0,71$ МПа; е – $\Delta P_{ф.зв} = 0,86$ МПа ж – $\Delta P_{ф.зв} = 1,02$ МПа; з – $\Delta P_{ф.зв} = 1,20$ МПа;
 и – $\Delta P_{ф.зв} = 1,38$ МПа; к – $\Delta P_{ф.зв} = 1,58$ МПа

Рис. 3. Динамика избыточного давления во фронте УВВ на прямолинейном участке вентиляционного штрека (модель 2)

При небольших зонах загазования и, соответственно, исходных избыточных давлений, возникающих в результате процесса взрыва, значения давлений в зоне сформированной УВВ, полученных с использованием C++ библиотеки, превышают значения давлений, полученных в программе «Ударная волна». При повышении избыточного давления в исходной зоне загазования картина меняется на противоположную. Для модели 3, для построения которой не использовались какие-либо дополнительные сопряжения отмечается более точная сопоставимость результатов трёхмерного и одномерного моделирования.



а – $\Delta P_{\text{ф.зв}} = 0,21$ МПа; б – $\Delta P_{\text{ф.зв}} = 0,29$ МПа; в – $\Delta P_{\text{ф.зв}} = 0,38$ МПа; г – $\Delta P_{\text{ф.зв}} = 0,48$ МПа; д – $\Delta P_{\text{ф.зв}} = 0,58$ МПа

Рис. 4. Динамика избыточного давления во фронте УВВ на прямолинейном участке подготовительной выработки (модель 3)

Зона отрыва характеризуется окончанием процессов горения, формированием УВВ и её отрывом от продуктов взрыва. С данной зоны начинается физический процесс затухания УВВ, по мере которого она переходит в волну сжатия. В связи с этим важным является определение начальных давлений в этой зоне. В табл. 3 и 4 приведены значения полученных избыточных давлений УВВ в зоне отрыва (а – результаты, полученные методом МКО для трёхмерной постановки задачи, б – в программе «Ударная волна»), а на рис. 5 соответствующие им графики.

Таблица 3

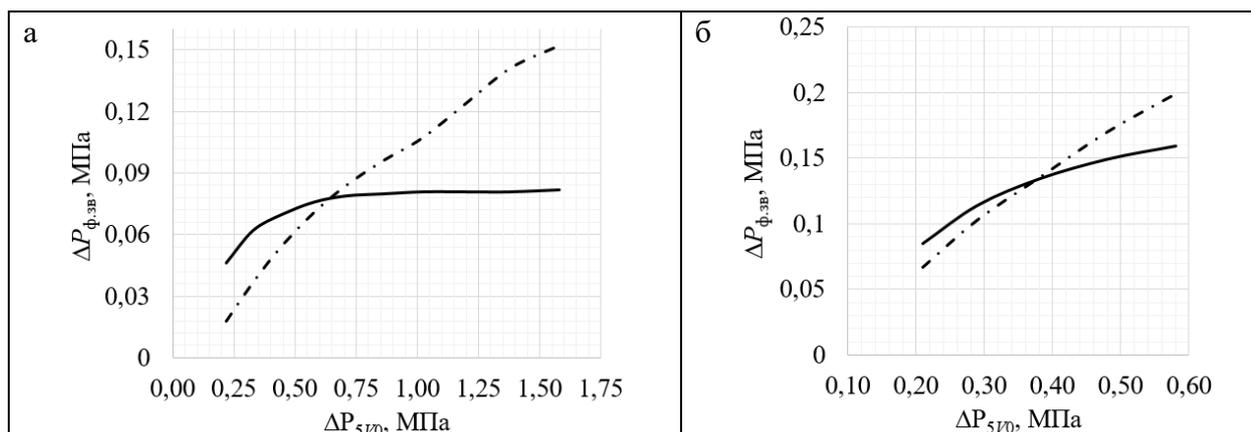
Избыточное давления ΔP_{5V0} , МПа, на расстоянии от зоны взрыва, равном пяти длинам исходной зоны загазования, для моделей 1 и 2

$\Delta P_{\text{ф.зв.}}$, МПа		0,220	0,330	0,450	0,580	0,710	0,860	1,020	1,200	1,380	1,580
Модель 1											
ΔP_{5V0} , МПа	а	0,046	0,062	0,070	0,076	0,078	0,080	-	-	-	-
	б	0,018	0,037	0,055	0,070	0,083	0,095	-	-	-	-
Модель 2											
ΔP_{5V0} , МПа	а	0,046	0,062	0,070	0,076	0,079	0,080	0,081	0,081	0,081	0,082
	б	0,018	0,037	0,055	0,071	0,084	0,096	0,107	0,124	0,141	0,152

Таблица 4

Избыточное давления ΔP_{5V0} , МПа, на расстоянии от зоны взрыва, равном пяти длинам исходной зоны загазования, для модели 3

Модель 3						
$\Delta P_{\text{ф.зв.}}$, МПа		0,210	0,290	0,380	0,480	0,580
ΔP_{5V0} , МПа	а	0,085	0,114	0,134	0,149	0,159
	б	0,067	0,103	0,135	0,170	0,199



а – для моделей 1 и 2; б – для модели 3

сплошная линия – результаты, полученные при использовании C++ библиотеки методом МКО; штрихпунктирная – в программе «Ударная волна»

Рис. 5. Значения полученных избыточных давлений УВВ в зоне отрыва

Как видно из рис. 5 избыточное давление в зоне отрыва, при использовании газодинамического метода в трёхмерной постановке задачи (OpenFOAM), при повышении избыточного давления в исходной зоне загазования, плавно возрастает и стабилизируется возле некоторого приблизительно постоянного значения: для выемочного участка, когда существует возможность расширения продуктов взрыва в, как минимум, две стороны, – 0,08 МПа; для подготовительной выработки – 0,16 МПа. Результаты, полученные в программе «Ударная волна», показывают рост со следующими максимальными значениями: выемочный участок – 0,15 МПа; подготовительная выработка – 0,20 МПа.

Таким образом, исходя из анализа полученных результатов, при взрывах ГВС и угольной пыли и при определении параметров изолирующих взрывоустойчивых перемычек, предлагается использовать полученные максимальные избыточные давления с двукратным коэффициентом запаса прочности, т. е.: для выемочного участка – 0,30 МПа; для подготовительных выработок – 0,40 МПа.

Максимальное избыточное давление при отражении УВВ от изолирующих взрывоустойчивых перемычек. Воздействие УВВ на перемычки определяется двумя основными параметрами: избыточным давлением отражения $\Delta P_{отр}$ фронта УВВ от преграды и величиной времени действия избыточного давления τ_t (фазой сжатия) на неё. Согласно результатам исследований, приведённым в [3, 4, 15], УВВ в горных выработках имеют большую длину и воздействуют на перемычку более 1 с, что можно охарактеризовать как гидростатическое, а не динамическое, воздействие на инженерное сооружение.

Давление во фронте отражённой волны возможно определить по формуле Крюссара – Измайлова (27). Данная формула базируется на соотношении для расчёта давления во фронте УВВ, нормально отражённой от абсолютно жёсткой преграды и получена по результатам исследований, приведённых [20]. Эта зависимость показывает приемлемую для практики точность при $\Delta P_{ф} \leq 4,0$ МПа.

Посредством газодинамических расчётов с использованием численных методов выполнена проверка работоспособности данной формулы в области определения давлений, развиваемых в горных выработках угольных шахт при взрывах ГВС и угольной пыли, в зоне действия УВВ, оторвавшейся от продуктов взрыва. В табл. 5 приведено сравнение результатов численного моделирования процессов взаимодействия УВВ с инженерным сооружением со значениями, полученными по формуле Крюссара – Измайлова (27). В качестве избыточного давления во фронте УВВ, подходящей к перемычке использован параметр $\Delta P_{ф}$, МПа, соответствующего результата моделирования. Как видно из табл. 5, максимальное расхождение не превышает 10 %.

Сравнение результатов численного моделирования процессов отражения УВВ от перемычки со значениями, полученными по формуле Крюссара – Измайлова (27)

Газодинамический метод (трёхмерная постановка с использованием C++-библиотеки OpenFOAM)					Газодинамический метод (одномерная постановка задачи с использованием программы «Ударная волна»)				
t, c	$\Delta P_{\phi}, MPa$	$\Delta P_{отр}, MPa$	Формула (27)	$\Delta, \%$	t, c	$\Delta P_{\phi}, MPa$	$\Delta P_{отр}, MPa$	Формула (27)	$\Delta, \%$
Модель 1									
1,700	0,011	0,023	0,024	2,86	1,691	0,005	0,011	0,011	3,32
1,575	0,027	0,058	0,059	1,63	1,572	0,020	0,041	0,043	2,62
1,475	0,038	0,086	0,088	2,28	1,446	0,034	0,078	0,078	0,24
1,400	0,047	0,110	0,112	1,74	1,346	0,051	0,121	0,123	1,18
1,325	0,057	0,137	0,140	2,10	1,273	0,069	0,171	0,173	1,44
1,250	0,070	0,165	0,178	7,12	1,197	0,089	0,230	0,236	2,60
Модель 2									
3,525	0,008	0,015	0,016	5,37	-	-	-	-	-
3,325	0,017	0,035	0,036	1,91	3,228	0,013	0,028	0,026	3,66
3,175	0,023	0,050	0,051	1,72	3,053	0,023	0,051	0,050	2,03
3,075	0,029	0,063	0,064	1,27	2,900	0,033	0,075	0,074	1,35
2,975	0,033	0,074	0,075	1,30	2,754	0,043	0,102	0,101	0,89
2,875	0,037	0,084	0,086	2,59	2,621	0,057	0,139	0,138	1,61
2,775	0,042	0,095	0,097	2,38	2,495	0,075	0,192	0,192	0,66
2,700	0,047	0,108	0,110	1,62	2,350	0,091	0,242	0,244	1,31
2,625	0,052	0,122	0,124	1,77	2,229	0,106	0,289	0,292	2,38
2,550	0,057	0,137	0,139	1,84	2,103	0,122	0,341	0,349	5,29
Модель 3									
1,200	0,023	0,048	0,051	5,45	1,133	0,023	0,049	0,050	3,17
1,050	0,044	0,102	0,104	2,43	0,951	0,057	0,135	0,138	2,05
0,900	0,070	0,159	0,176	9,63	0,825	0,096	0,249	0,260	5,91
0,800	0,104	0,275	0,286	3,56	0,726	0,144	0,408	0,431	5,33
0,725	0,144	0,401	0,432	7,26	0,648	0,195	0,617	0,640	3,49

Примечание: t – время подхода фронта УВВ к перемычке после начала расчёта, с; ΔP_{ϕ} – избыточное давление во фронте УВВ, подходящей к перемычке, МПа; $\Delta P_{отр}$ – избыточное давление отражения УВВ от преграды, МПа; Δ – расхождение результатов численного моделирования со значением, полученным по формуле Крюссара – Измайлова (27), %.

Вывод. По результатам численного моделирования процессов распространения УВВ по подземным горным выработкам предлагается, при определении параметров изолирующих взрывоустойчивых перемычек, использовать максимальные избыточные давления на расстоянии, равном пяти исходным зонам загазования при взрывах ГВС и угольной пыли: для выемочного участка – 0,30 МПа; для подготовительных выработок – 0,40 МПа. Подтверждена работоспособность формулы Крюссара – Измайлова в области определения давлений, развиваемых в горных выработках угольных шахт, в зоне действия УВВ, оторвавшейся от продуктов взрыва.

Список литературы

1. О введении в действие Методики газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли : распоряж. Ростехнадзора от 27.04.2004, № Р-

7. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=331468#019248400577640212>

2. СНиП 2.01.54-84. Защитные сооружения гражданской обороны в подземных горных выработках / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2001. – 20 с.

3. Устав ВГСЧ по организации и ведению горно-спасательных работ (Устав ВГСЧ). – М.: Недра, 1986. – 254 с.

4. Устав военизированной горноспасательной части (ВГСЧ) по организации и ведению горноспасательных работ на предприятиях угольной и сланцевой промышленности. – М., 1997. – 201 с.

5. Программирование на языке C++ в среде Qt Creator / Е.Р. Алексеев, Г.Г. Злобин, Д.А. Костюк и [др.]. – М.: ALT Linux, 2015. – 448 с.

6. Моделирование газодинамических процессов при изоляции выработок аварийных участков с использованием гидрозатворов / Ю.М. Говорухин, В.Г. Криволапов, М.Г. Коряга, Д.Ю. Палеев // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С.376-380.

7. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. Использование CFD-пакетов при решении задач вентиляции шахт и подготовке горных инженеров // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. – 2019. – № 5. – С. 453-458.

8. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. Исследование аэродинамических особенностей тупиковых выработок, проветриваемых за счёт турбулентной диффузии // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 392-400.

9. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. О способе внесения в модель топологии объёмов загазования в закреплённом пространстве выемочных участков при расчётах взрывобезопасных расстояний // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 373-375.

10. Криволапов В.Г., Говорухин Ю.М. Взаимодействие ударно-воздушной волны с водяными заслонами при возведении изолирующих противопожарных перемычек // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов : сб. науч. статей. / Под общей редакцией В.Н. Фрянова. – 2007. – С. 198-203.

11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

12. Миньков Л.Л. Моисеева К.М. Численное решение задач гидродинамики с помощью вычислительного пакета Ansys Fluent: учеб. пособие. – Томск: СТУ, 2017. – 122 с.

13. Молчанов А.М. Математическое моделирование задач газодинамики и теплообмена. – М.: Издательство МАИ, 2013. – 208 с.

14. Мясников А.А., Миллер Ю.А., Комаров Н.Е. Вентиляционные сооружения в угольных шахтах. – М.: Недра, 1983. – 270 с.

15. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах / Д.Ю. Палеев, И.М. Васенин, В.Н. Костеренко [и др.]. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 312 с.

16. Компьютерные технологии для решения задач плана ликвидации аварий / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, В.Н. Костеренко [и др.]. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 160 с.

17. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 312 с.

18. Плотников В.М. Обеспечивается ли безопасность труда горноспасателей при угрозе взрыва газа и пыли в угольных шахтах? // Безопасность труда в промышленности. – 1992. – № 1. – С. 29-33.

19. Чеховских А.М., Гладков Ю.А. О выборе безопасных мест ведения горноспасательных работ при угрозе взрыва газов и пыли в шахтах // Безопасность труда в промышленности. – 1992. – № 1. – С. 33-34.

20. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 312 с.
21. Jasac H. Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Application to Fluid Flows : Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College. – June 1996. – 396 p.
22. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab. – Springer, 2016. – 817 p.

УДК 622.868:622.81

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЛЩИНЫ ИЗОЛИРУЮЩИХ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК

¹к.т.н. Говорухин Ю.М., ^{1,2}д.т.н. Домрачев А.Н., ¹к.т.н. Криволапов В.Г.,
^{1,3}д.т.н. Палеев Д.Ю.

1 – Национальный горноспасательный центр, г. Новокузнецк, Россия

2 – Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия

3 – Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

Аннотация. Сформирована методика расчёта толщины изолирующих взрывоустойчивых перемычек, возводимых при изоляции пожарных участков, на основе действующих на них избыточных давлений во фронте падающей и отражённой ударной воздушной волны.

Ключевые слова: горные выработки, взрыв газовоздушной смеси и угольной пыли, ударная воздушная волна, давление, взаимодействие, перемычка.

С целью обеспечения промышленной безопасности и предотвращения разрушения действующих горных выработок ударной воздушной волной (далее – УВВ), образующейся при взрывах газовоздушных смесей (далее – ГВС) и угольной пыли, возводятся изолирующие взрывоустойчивые перемычки, способные воспринимать без разрушения повышенные ударные воздействия. Согласно требованиям федеральных норм и правил в области промышленной безопасности [1, 2] данные инженерные сооружения на горных предприятиях опасных по газу и/или пыли возводятся при изоляции:

- действующих пожаров;
- газодренажных выработок и выработанных пространств выемочных участков, проветриваемых по схемам с изолированным отводом метана с помощью газоотсасывающих установок;
- горных выработок на шахтах, разрабатывающих пласты угля, склонные к самовозгоранию.

Это обусловлено тем, что в изолируемых пространствах, вследствие сокращения расхода воздуха на объектах проветривания или полного прекращения их проветривания, существует угроза формирования зон взрывоопасных скоплений газов (метана, оксида углерода, предельных и непредельных углеводородов) вблизи источников высокой температуры [8, 9]. При потенциальной опасности возникновения взрыва основным параметром, определяющим взрывоустойчивость перемычки, является её толщина. В связи с этим авторами предлагается следующая методика для расчёта данного параметра от действующих на них избыточных давлений.

Место установки перемычки не должно быть от зоны взрыва ближе пяти длин исходной зоны загазования, которую можно определить согласно [7, 10]. Желательно в зону

Научное издание

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Под общей редакцией профессора В.Н. Фрянова

Компьютерная верстка Л.Д. Павловой

Подписано в печать 23.05.2023 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 23,18 Уч.-изд. л. 24,74 Тираж 1000 экз. Заказ 114

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ