

ВЛИЯНИЯ ОБЪЕМОВ ЗАГАЗИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ИМПУЛЬС УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ, ПЕРЕДАВАЕМЫЙ ВЗРЫВОЗАЩИТНОМУ СООРУЖЕНИЮ

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

Представлено анализ влияния объемов и длины загазирования горных выработок на импульс ударной авоздушной волны, передаваемый взрывозащитному сооружению при взрыве газа на изолированных аварийных участках. Анализ выполнен путем проведения численного эксперимента методом «крупных» частиц (метод Давыдова) взрыва газовой смеси в цилиндрическом канале.

Введение. Во время ведения работ на аварийных и изолированных участках шахт опасность для спасателей представляют повторные взрывы рудничной атмосферы, возникающие в заперемыченных пространствах. В настоящее время накоплен большой опыт работы ГВГСС в области изоляции подземных пожаров. Однако до сих пор и при изоляции подземных пожаров и после ее иногда имеют место взрывы в изолированном пространстве с разрушениями взрывозащитных сооружений и тяжелыми последствиями для рабочих занимающихся ликвидацией пожара. Так на шахте им. А.Ф. Засядько в 2008 году произошло два взрыва в таких зонах, которые привели к разрушению взрывозащитных сооружений и гибели горноспасателей. Одной из причин такого состояния – недостаточная точность в прогнозировании параметров действия ударной воздушной волны на взрывозащитные сооружения.

Анализ последних достижений. В аварийных ситуациях при потенциальной угрозе взрыва, силовое воздействие на взрывозащитное сооружение рассчитывают по специальной методике. Согласно Устава ГВГСС [1], безопасное расстояние и соответственно место установки взрывозащитных сооружений определяют по действию ударной воздушной волны (УВВ) на человека, и только лишь по величине избыточного давления УВВ в момент прихода ее фронта в точку установки сооружения.

На основании опыта ведения спасательных работ и анализа аварийных ситуаций горноспасатели сформулировали критических замечаний к действующей методике [2, 3]: не учитывается влияние полной энергии взрыва, что приводит к ситуации, когда величина безопасного расстояния не зависит от объёма загазирования; при расчете нагрузки на защитное сооружение не учитывается действие отраженной ударной волны и величина полного импульса силы действующего на перемычку, а расчет устойчивости сооружения производится на статическую нагрузку от падающей волны.

Для решения этой задачи последнее время рядом организаций проводились работы по уточнению действующей методики расчета безопасных расстояний и параметров воздушных ударных волн на аварийных участках. Было принято несколько стандартов организаций по расчету параметров распространения воздушных ударных волн в горных выработках. Но в новых документах, в части расчета амплитуд и параметров распространения УВВ по сети горных выработок использовался старый подход, основанный на результатах экспериментальных взрывов и полученных на их основе эмпирических зависимостях [6].

В Украине большая работа по совершенствованию методов расчета параметров распространения УВВ в горных выработках и изучению других эффектов сопровождающих этот процесс проводится в НИИ горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респира-тор». В исследованиях этого института представлены аналитические решения для расчета избыточного давления в момент формирования УВВ, как для выработок загазированных по всему сечению так для слоевых скоплений метана [5, 6]

В России, в совместных работах Томского политехнического института, РосНИИГД и Института угля СО РАН проводятся исследования по математическому моделированию распро-

странения УВВ в сети горных выработок [7, 8]. Численное решение задач газовой динамики в этих работах производится методом Годунова. В постановке задачи используется одномерная схема течения газа в протяженной выработке и лишь на сопряжениях задача решается в трехмерной постановке. Используемый метод Годунова является сильно затратным с точки зрения объема вычислительных операций. Это связано с весьма сложной линеаризованной схемой необходимой для возможности счета разрывов параметров с большими градиентами в соседних точках, что возникает во фронте ударной волны. Несмотря на высокую производительность современных ЭВМ затраты машинного времени на решения одной задачи таким методом могут быть значительными и представлять проблему в оперативности и точности расчетов.

Постановка задачи. В работе [9] приводятся результаты исследований РосНИИГД для шахтных взрывозащитных сооружений. Показано, что результат воздействия на конструкцию давления меняющегося со временем, зависит от соотношения времени действия сил τ и времени релаксации системы t . Для упругих систем время релаксации обычно заменяется периодом собственных колебаний T_0 . Анализ импульсных воздействий на элементы конструкций свидетельствует о том, что если $\tau/T_0 > 1$, то смещения и деформации системы пропорциональны действующей силе. При $\tau / T_0 < 1$ деформации и смещения пропорциональны импульсу УВВ. Таким образом, определение абсолютного значения импульса УВВ и время действия импульсной нагрузки является условием прогнозирования устойчивости взрывозащитных сооружений. Нерешенным, на сегодняшний день, остается теоретическая задача взаимосвязи между объемом газозаполненной смеси в изолированном пространстве и величины импульса УВВ действующей на взрывозащитное сооружение.

Основной материал статьи. В настоящее время, в действующих в Украине нормативных документах по определению параметров воздушных ударных волн при взрывах шахтной атмосферы, силовое воздействие на взрывозащитное сооружение определяется только амплитудой избыточного давления в приходящей УВВ, которая в свою очередь при прочих равных условиях зависит от длины загазированного участка и сечения выработки [1]. В соответствии с этой длиной сопоставляется величина избыточного давления, которое возникает на границе участка загазирования. Это соответствие имеет предел нарастания с увеличением длины участка. При длине участка свыше 65 м (или 15 м, в зависимости от условий) максимальное избыточное давление далее не дифференцируется и устанавливается равным 2,8 МПа. Данные соотношения были получены путем проведения экспериментальных взрываний газозаполненной смеси на опытных участках Карагандинских шахт [10]. Полученные пределы избыточного давления и длин участков очевидно характерны для некоторых условий проведения эксперимента.

Теоретически, форма взаимосвязи избыточного давления от длины участка загазирования будет иметь прямую зависимость, график которой, начиная с некоторой длины выполаживается и переходит в линию, асимптотически приближающуюся к горизонтальной прямой (рис. 1). Согласно теории взрывов и течения газов в цилиндрических каналах на параметры затухания потока влияет сила трения газа о стенки канала. Поэтому для горных выработок угол наклона и точка начала выполаживания графика будет зависеть от длины загазированного участка и сечения выработки. Таким образом, предельные длины активного участка в каждом конкретном случае будут различны.

Эти же закономерности предположительно можно перенести на величину импульса УВВ, передаваемого взрывозащитному сооружению.

Для теоретического анализа поставленной задачи предлагается использовать газодинамический метод расчёта параметров распространения воздушных ударных волн при взрывах газозаполненных смесей в протяженных горных выработках. В работах [11, 12] приведено описание метода численного счета уравнений газовой динамики – метод «крупных» частиц.

Основные положения данного физико-математического моделирования процессов взрыва газопылевоздушных смесей в горных выработках следующие.

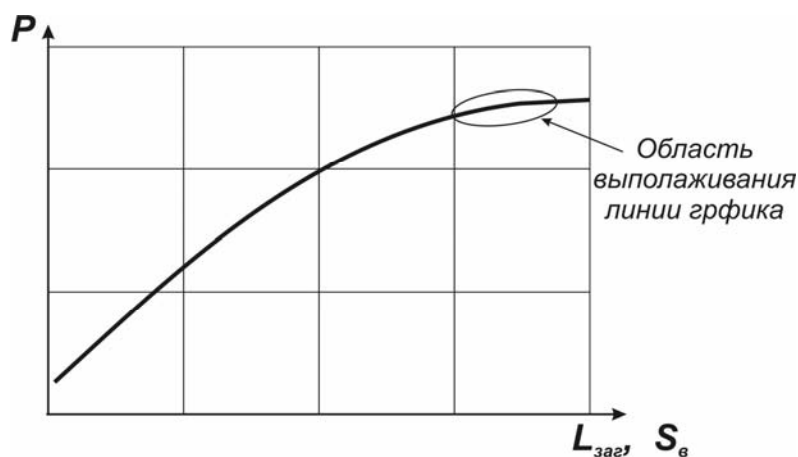


Рисунок 1 – Влияние длины газированного участка на величину избыточного давления ударной воздушной волны: P – давление на границе газированного участка выработки; $L_{заг}$, $S_в$ – длина и площадь сечения газированного участка выработки

Расчет силового воздействия воздушной ударной волны определяется как плотность импульса и полный импульс силы, действующий на жесткую стенку, время активного силового воздействия на жесткую стенку и максимальные давления, возникающие в плоскости взрывозащитного сооружения с учетом падающей и отраженной ударной волны.

Задача решалась путём использования методов численного счёта уравнений гидродинамики в системе "газовая взрывчатая среда – окружающая среда". Для решения задачи применялась цилиндрическая система координат: z -координата вдоль выработки.

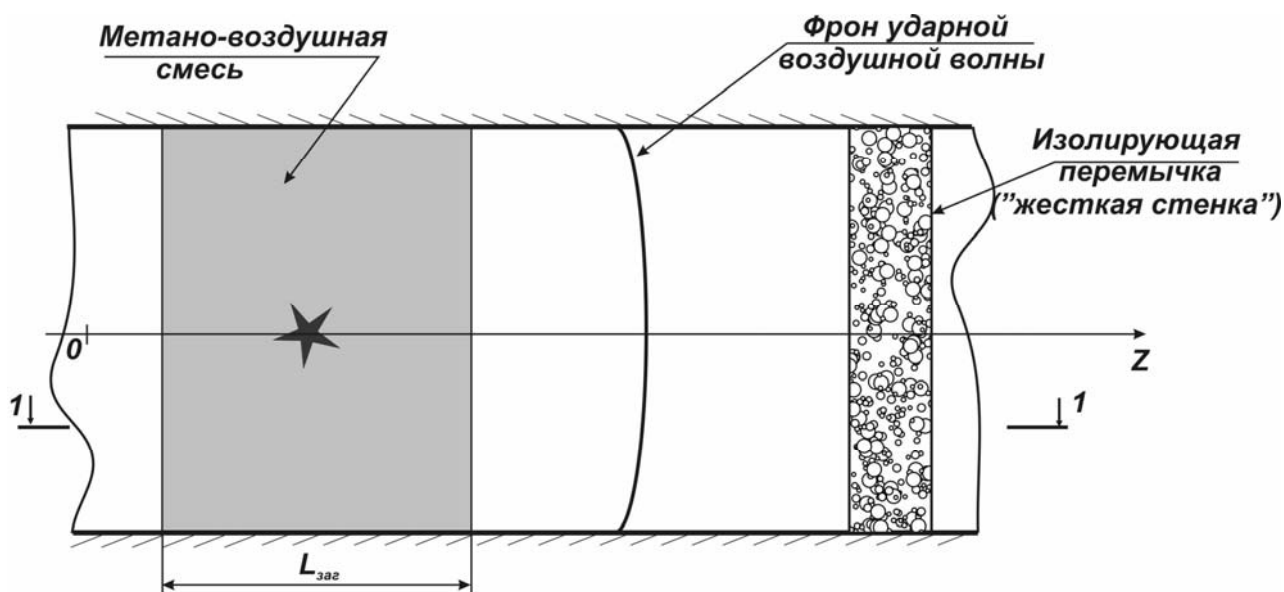


Рисунок 2 – Схема воздействия воздушной ударной волны на взрывозащитное сооружение: $L_{заг}$ – длина газированного участка выработки, м

Движение среды в цилиндрической системе координат описывается уравнениями Эйлера (в дивергентном виде):

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

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.

Для решения рассматриваемой задачи применялся модифицированный метод численного счета – метод «крупных» частиц (МКЧ) [3, 11].

Оценка силового воздействия воздушной ударной волны на взрывозащитное сооружение определяется по максимальному значению давления на преграде и величине переданного импульса за время, когда перепад давления больше критического. Максимальная амплитуда избыточного давления, как в падающей, так и отраженной УВВ можно зафиксировать в результате проведения численного эксперимента.

Расчет импульса производится по формуле:

$$I = S \int_0^{t_k} (P(t) - P_i) dt,$$

где t_k – время существования избыточного давления больше критического, в принятом расчете это условия определялось соотношением: $P(t) > 1,25P_n$

На рис. 3 показано графическое представление импульса УВВ передаваемого взрывозащитному сооружению.

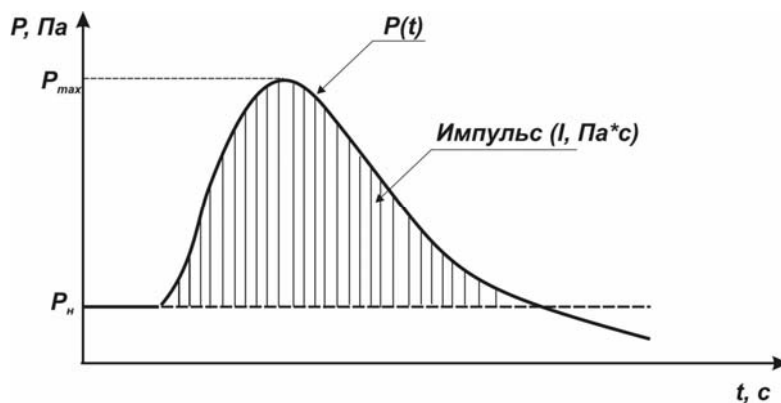


Рисунок 3 – Графическое представление силового воздействия на преграду: $P(t)$ – давление возникающее на элементарной площадке поверхности взрывозащитного сооружения; t – текущее время процесса, I – суммарный импульс силового воздействия ударной волны на защитное сооружение

Анализ влияния объемов и длины загазирования горных выработок на импульс ударной воздушной волны, передаваемый взрывозащитному сооружению выполнен путем проведения численного эксперимента методом «крупных» частиц взрыва газозащитной смеси в цилиндрическом канале. Условия проведения численного эксперимента представлены в табл. 1.

Расчет проводился для условий взрыва газозащитной смеси в прямолинейной выработке.

Таблица 1 – Условия проведения численного эксперимента

Наименование параметра	Ед. измерения	Величина параметра
Поперечное сечение выработки	м ²	7,2
Длина загазированного участка	м	1 ... 100
Расстояние от торца загазированного участка до взрывозащитного сооружения	м	100
Избыточное давление взрыва загазированного участка	МПа	0,15 ... 2,8
<u>Характеристики расчетной сетки</u>		
Шаг по времени	мс	50
Размер стороны квадратной ячейки расчетной сетки	м	0,1

Результаты численного счета указанному алгоритму представлены в виде графиков давлений в сечении 1-1 (рис. 2).

В процессе численного счета производится построение графиков давления, скорости, плотности, температуры и некоторых других характеристик газового потока для каждого шага по времени. Таки образом можно видеть процесс распространения УВВ в динамике и определять динамические характеристики процесса.

На рис. 4 представлены результаты счета в виде графиков давления и скорости газового потока, в некоторый момент времени для условий: длина загазированного участка 5 м, сечение выработки 7,2 м². После отражения УВВ от жесткой стенки плотность полного импульса в расчетной ячейке составила $I = 1,38 \cdot 10^3$ Па·с.

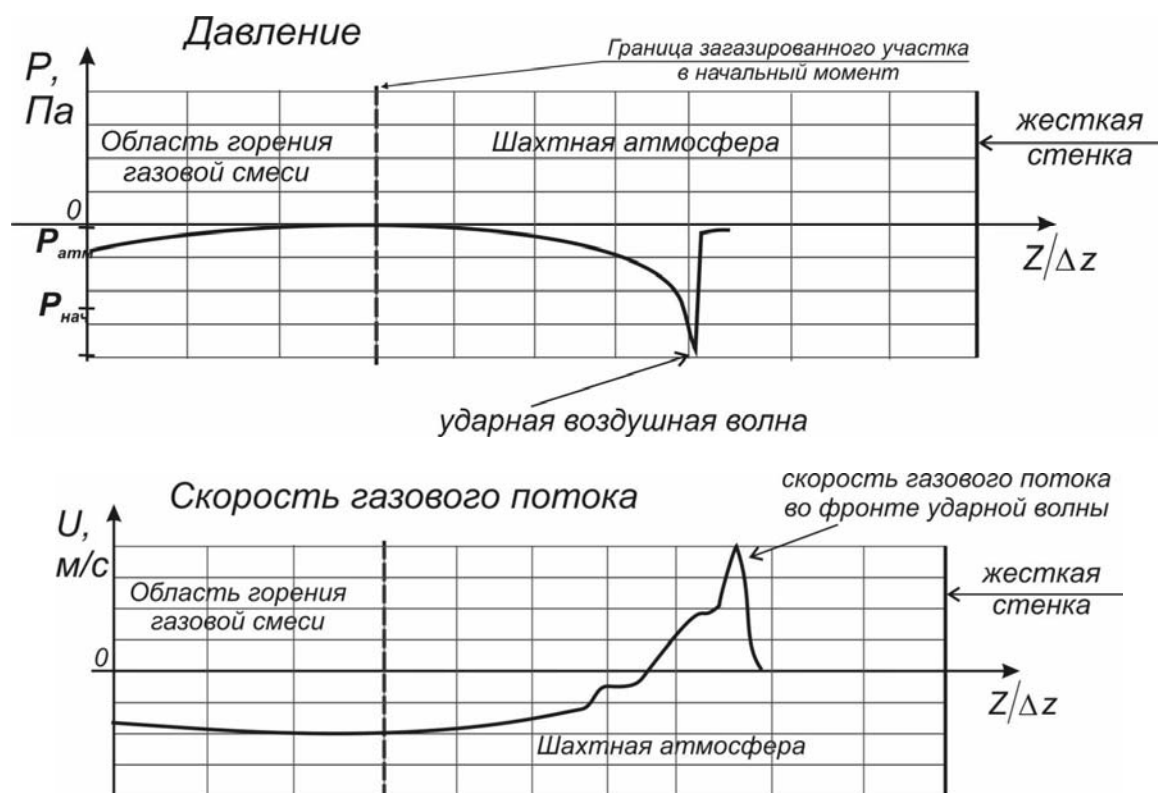


Рисунок 4 – Состояние газовой среды в расчетной области, в сечении 1-1: длина загазированного участка 5 м, сечение выработки 7,2 м², плотность полного импульса в расчетной ячейке $I = 1,38 \cdot 10^3$ Па·с

При увеличении длины загазированного участка до порогового значения, согласно нормативного документа [1] увеличивается избыточное давление и соответственно возрастает силовое воздействие на взрывозащитное сооружение. Однако при этом, как показывает расчет,

изменяется не только абсолютное значение избыточного давления, но и изменяется характер УВВ – ширина зоны сжатия увеличивается, что приводит к увеличению импульса за счет увеличения одномоментного объема газа, вовлеченного ударной волной в движение (рис. 5). Особенно четко это видно на графике скорости газового потока в виде заштрихованной области.

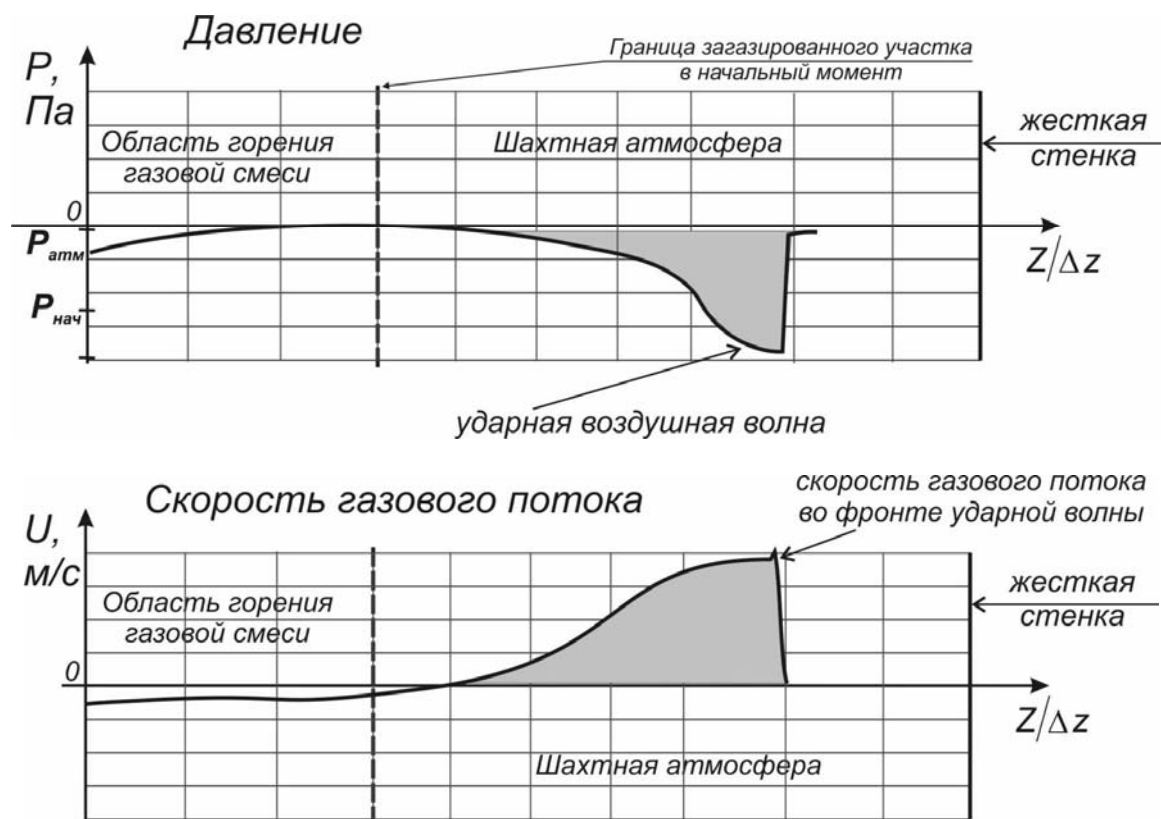


Рисунок 5 – Состояние газовой среды в расчетной области, в сечении 1-1: длина загазированного участка 65 м, сечение выработки $7,2 \text{ м}^2$, плотность полного импульса в расчетной ячейке $I = 4,1 \cdot 10^4 \text{ Па}\cdot\text{с}$

Возникает логичный вопрос: что же произойдет при дальнейшем увеличении длины загазированного участка?

Ответ можно получить, проведя численный эксперимент с увеличенной длиной загазированного участка до 100 м. Согласно нормативного документа [1] при длине загазированного участка свыше 65 м абсолютное избыточное давление не увеличивается и фиксируется на значении 2,8 МПа. Результаты численного эксперимента для этих условий (рис. 6) показали, что несмотря на отсутствие роста избыточного давления в ударной волне импульс УВВ продолжает увеличиваться. Это связано с увеличением объема воздушных масс вовлекаемых в движение.

Поскольку разрушения взрывозащитного сооружения может происходить при увеличении времени силового воздействия, а следовательно и импульса, то отсутствие учета этого параметра в расчете безопасных расстояний может повлечь негативные последствия повторных взрывов в изолированных участках.

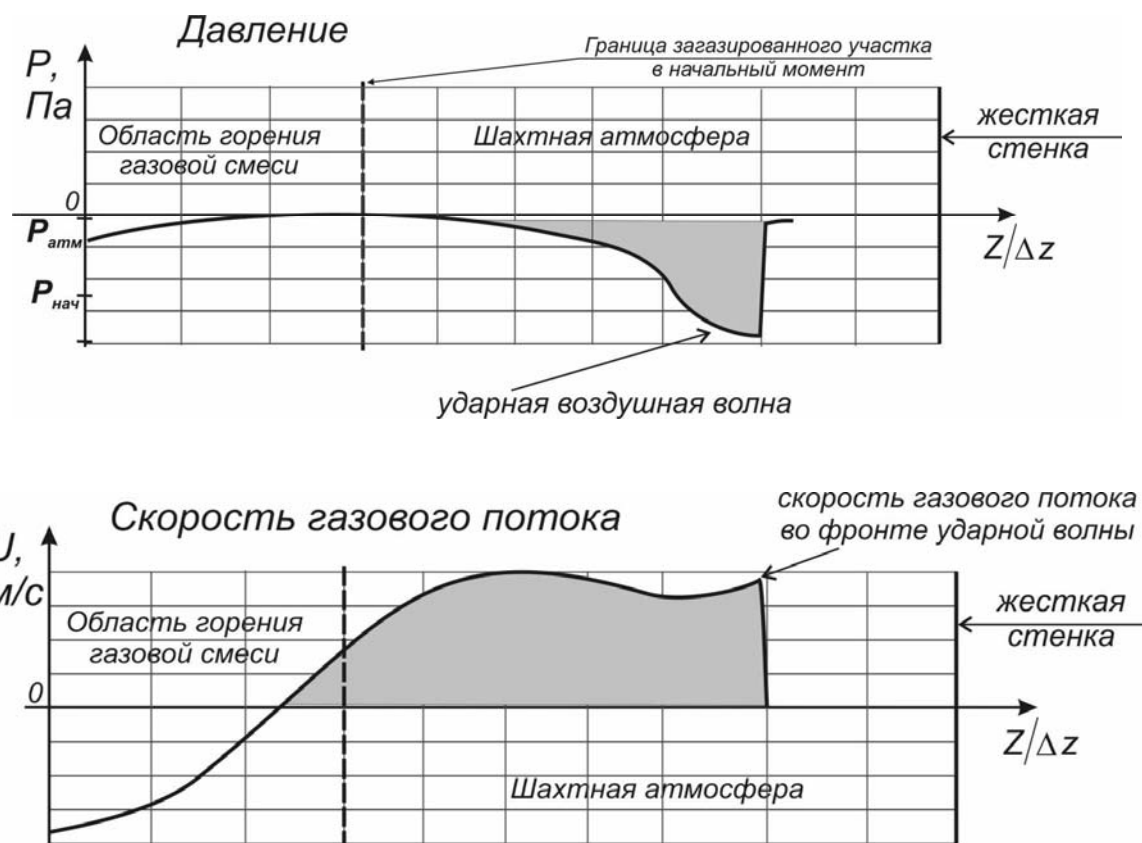


Рисунок 6 – Состояние газовой среды в расчетной области, в сечении 1-1: длина загазированного участка 100 м, сечение выработки $7,2 \text{ м}^2$, плотность полного импульса в расчетной ячейке $I = 9,7 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}$

На текущем этапе, в разработанной схеме численного счета пока не учитывается расход энергии УВВ на теплопотери и торможение газового потока за счет трения о стенки выработки. Эти факторы повлияют на установления баланса между энергией сгораемого газозвушного облака и расходом энергии на вовлечение в движение возрастающих объемов шахтной атмосферы. Таким образом, форма взаимосвязи импульса УВВ от длины участка загазирования будет иметь аналогичную с избыточным давлением зависимость, график которой, представлен на рис. 1.

Выводы. Разработанная устойчивая разностная схема численного счета отражает и позволяет визуализировать физические эффекты распространения ударной воздушной волны на участке горной выработки. Выполненный с помощью численного метода «крупных» частиц анализ влияния длины загазирования горных выработок на импульс ударной воздушной волны, показал необходимость учета импульса силы УВВ при определении безопасных расстояний и конструкций взрывозащитных сооружений.

Для установления количественных параметров взаимосвязи рассмотренных факторов для конкретных условий необходимо развитие схемы численного счета с учетом потерь энергии УВВ на нагрев стенок и торможение газового потока за счет трения.

Перечень ссылок

1. Устав ГВГСС по организации и ведению горноспасательных работ: ДНАОП 1.1.30-4.01-97.– Киев, 1997.– 450 с;
2. 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;
3. Чернай А.В., Налышко Н.Н. Обоснование разработки новых подходов к расчету параметров распространения воздушных ударных волн в горных выработках // Матеріали 3-ї

- міжнародної науково-технічної конференції «Техногенні катастрофи: моделі, прогноз, зпобігання» – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2013.– С. 132-143;
4. Гурин А.А., Малый П.С., Савенко С.К. Ударные воздушные волны в горных выработках.– М.: Недра, 1983.– 223 с;
 5. Агеев В.Г. Математическая модель формирования ударных волн в горных выработках при взрывах метана// Горноспасательное дело.– 2010.– Вып. 47.– С. 5-10;
 6. Греков С.П., Зинченко И.Н., Карманов В.С., Методика расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли в шахтах// Горноспасательное дело.– 2010.– Вып. 47.– С. 17-25;
 7. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты/ И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов, Д.Ю. Палеев и др.// Компьютерные исследования и моделирование.– 2011.– Т.3 №2.– С. 155-163;
 8. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Мячин В.В, Костенко В.Н. Оценка влияния волновых эффектов распространения ударных воздушных волн на величину взрывобезопасного расстояния // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах».– Кемерово, 2000.– С. 143-145;
 9. Пештибай Г.И., Чайковская Э.Г., Луганский А.М. Применение современных материалов для возведения изолирующих взрывоустойчивых сооружений// Горноспасательное дело.– 2010.– Вып. 47.– С. 25-34;
 10. О коэффициенте затухания воздушных ударных волн при их распространении по прямолинейным участкам выработок/ А.М. Чеховских, В.И. Гудков И.Л. Пономарев и др. Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело.– 1970.– №11-12.– С. 38-39;
 11. Налісько Н.Н. Численний розрахунок динамічної навантаження від впливу повітряних ударних хвиль на інженерні споруди // Високоенергетическі системи, процеси і їх моделі.– Дніпропетровськ: Національний гірничий університет.– С. 255-266.