

УДК 622.812:699.852.7:331.45

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЗРЫВНОГО ИМПУЛЬСА
В ФИЗИЧЕСКОМ И ЧИСЛЕННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ
ПРИ ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙ**

А. В. Чернай, В. В. СоболевГосударственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»
просп. К.Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49600, Украина. E-mail: chernayanatoliy@rambler.ru**Н. Н. Налисько**ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»
ул. Чернышевского, 24а, г. Днепропетровск, 49600, Украина. E-mail: 0507544273@mail.ru

Проведена экспериментальная проверка методики численного расчета импульса взрывной волны, передаваемого взрывозащитному сооружению. В лабораторном эксперименте использовалась технология лазерного инициирования взрывчатого вещества и методика измерения импульсов давления продуктов взрыва на баллистическом маятнике. Для определения механического импульса разработана методика проведения эксперимента, в которой аналитическим путем получена функциональная взаимосвязь между величиной импульса и углом отклонения, а также характеристиками реального маятника. Достоверность полученных результатов в физическом эксперименте обеспечивается калибровкой датчика угла отклонения маятника, оценкой погрешностей измерения импульса, связанной с погрешностью определения угла отклонения в электрической схеме, трением оси маятника и дискретностью считывания информации.

Ключевые слова: импульс, баллистика, маятник, лазер, инициирование.

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИБУХОВОГО ІМПУЛЬСУ
У ФІЗИЧНОМУ І ЧИСЕЛЬНОМУ ЕКСПЕРИМЕНТІ
ПРИ ОЦІНЦІ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ ЛІКВІДАЦІЇ АВАРІЙ**

А. В. Чернай, В. В. СоболевДержавний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»
просп. К. Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна. E-mail: chernayanatoliy@rambler.ru**М. М. Налисько**Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»
вул. Чернишевського, 24а, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна. E-mail: 0507544273@mail.ru

Проведено експериментальну перевірку методики чисельного розрахунку імпульсу вибухової хвилі, переданого вибухозахисному спорудженню. У лабораторному експерименті використовувалася технологія лазерного ініціювання вибухової речовини і методика виміру імпульсів тиску продуктів вибуху на балістичному маятнику. Для визначення механічного імпульсу розроблена методика проведення експерименту, в якій аналітичним шляхом отриманий функціональний зв'язок між величиною імпульсу й кутом відхилення, а також характеристиками реального маятника. Імовірність отриманих результатів у фізичному експерименті забезпечується калібруванням датчика кута відхилення маятника, оцінкою похибок виміру імпульсу, пов'язаної з похибкою визначення кута відхилення у електричній схемі, тертям осі маятника й дискретністю зчитування інформації.

Ключові слова: імпульс, балістика, маятник, лазер, ініціювання.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Взрывы газовоздушных смесей в условиях подземной добычи полезных ископаемых или на производствах, использующих взрывоопасные вещества продолжают составлять проблему безопасности работающих. Последние техногенные аварии в Украине и за рубежом, такие, как пожар на нефтебазе БРСМ-нафта, взрывы газа на шахте «Северная» (Воркута), показывают, что аварийные ситуации составляют не меньшую угрозу и для ликвидаторов их последствий – горноспасателей и пожарных. Поскольку полностью исключить риски аварийных взрывов в настоящее время невозможно, то установление достоверных значений силового воздействия таких аварийных взрывов на взрывозащитные и строительные сооружения является важной задачей при оценке условий безопасности при ликвидации последствий аварий и оценки взрывоустойчивости сооружений [1, 2].

Одним из основных факторов силового воздействия ударной воздушной волны (УВВ) на взрывозащитные сооружения является механический импульс нагружения. Исследование и расчет взрывного импульса, передаваемого взрывозащитному со-

оружению или строительной конструкции, относится к числу наиболее сложных задач газодинамики. Быстрое изменение параметров процесса во времени, наличие множественных волновых фронтов, отсутствие универсальных приборов или датчиков, непосредственно измеряющих взрывные импульсы, значительно затрудняет исследования и вынуждает прибегать в теоретических расчетах к ряду упрощающих предположений и гипотез, подлежащих экспериментальной проверке.

Значительные экспериментальные натурные исследования параметров ударных воздушных волн, образованных массовыми взрывами, были проведены в условиях рудных шахт Кривбасса под руководством проф. А.А. Гурина. В исследованиях оценка импульса силового воздействия воздушных ударных волн на устройства их гашения рассчитывалась по известным эмпирическим зависимостям. Полученные данные позволили авторам получить новые экспериментальные уравнения, учитывающие состояние выработок (например, шероховатость стенок) при определении затухания импульса.

Для експериментального вимірювання імпульса УВВ в умовах горних виробок, в роботі [3] розроблено вимірне пристрій, яке дозволяє робити вимірювання при короткозамедленому вибуху зарядів і відповідно багатифронтних УВВ. По даним роботи [3] розходження результатів вимірювань з теоретичними розрахунками не перевищують 23 %.

В теперішній час дуже ефективними теоретичними методами досліджень фізичних процесів виступають численні експерименти, які незважаючи на мінімальні спрощення також потребують експериментальної перевірки. В роботі [4] численні дослідження розподілу надлишкового тиску при вибухах в газових топках порівнюються з результатами моделювання вибуху на експериментальній установці, яка має геометрію топки. В роботах [5, 6] експериментальної перевірки підлягають дослідження в численних і аналітичних розрахунках.

Для розв'язання задачі визначення динамічних навантажень на вибухостійкі споруди в умовах горних виробок була розроблена методика численного розрахунку, заснована на газодинамічному підході з використанням методу великих частинок, і яка дозволяє розраховувати величину імпульса УВВ [7]. В роботі імпульс розраховується за амплітудою надлишкового тиску, виникаючого в площині жорсткої стінки і часу існування надлишкового тиску:

$$I = \int_0^{t_k} (P(t) - P_n) dt$$

де I – імпульс силового впливу, Па·с; t_k – час існування надлишкового тиску, с; $P(t)$ – тиск, виникаючий на елементарній площинці поверхні вибухозащитного споруди, Па; t – поточний час процесу, с; P_n – початковий тиск, Па.

Для оцінки достовірності розрахунку імпульса УВВ в розробленій методиці численного розрахунку необхідно провести його експериментальну перевірку, з надійним теоретичним обґрунтуванням фізичного експерименту.

Мета роботи – експериментальна перевірка алгоритму численного розрахунку імпульса вибухової хвилі, передаваної вибухозащитному споруді. Розробка методик проведення експерименту на баллістическому маятнику з використанням технології лазерного ініціювання ВВ.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Найбільш поширеним методом вимірювання імпульса тиску, в силу своєї надійності, точності вимірювань і простоти реалізації, виступає метод баллістического маятника. Величина імпульса визначається за кутом відхилення маятника. В роботі пропонується використовувати фізичний експеримент визначення імпульса вибуху на баллістическому маятнику для експериментальної перевірки методик численного розрахунку імпульса вибухової хвилі.

В разі визначення вибухового імпульса при вибуху газу на баллістическому маятнику теоретичне обґрунтування передачі імпульса маятнику є рішенням задачі про розліт продуктів мгно-

веної детонації (газів) одержане в роботах К.П. Станюковича. В них, спільне рішення описує плоский розліт спокійного газу, і загальне рішення, яке визначає рух газу за відбитою хвилею розриву дає залежність розрахунку величини густоти імпульса:

$$I_s = \xi \sqrt{2m_s E_s}$$

де m_s – маса ВВ (вибухової речовини), що припадає на одиницю поверхні (масова густина); E_s – внутрішня енергія продуктів детонації, що припадає на одиницю поверхні (густина енергії); ξ – коефіцієнт пропорційності, що залежить від показателя адіабати продуктів детонації.

Для фізичного моделювання умов цієї задачі необхідно на торці баллістического маятника здійснити миттєвий вибух конденсованого ВВ, що знаходиться в контакті з преградою. Однак не будь-якого ВВ, а здатного до об'ємної детонації. В цьому разі стрибок надлишкового тиску в площині прегради виникає вже в газовій середі (продуктах детонації). Таким чином, реалізуються умови газового вибуху. Такі ж умови на контакті з преградою можна смоделировать і в численному експерименті, причому об'ємний газовий вибух в численному експерименті легко реалізується шляхом задавання початкової температури по всій області газової суміші рівної температурі самовоспалення.

Для створення об'ємного запалення в фізическому експерименті пропонується використовувати технологію лазерного ініціювання [8–10]. В якості ВВ використовувався азид свинцю $Pb(N_3)_2$, активація хімічної реакції якої викликається розігрівом оптичних мікронеоднородностей в полі лазерного променя, що забезпечує об'ємний вибух.

Для досягнення ідентичності умов в фізическому і численному експерименті в роботі використовуються критерії енергетического і геометрического подоби рівні одиниці.

Критерій геометрического подоби Π_1 виконується для площини, на якій передається імпульс, критерій енергетического подоби Π_2 виконується для поверхностної густоти внутрішньої енергії:

$$\Pi_1 = \frac{d_\phi}{d_c} = 1, \quad \Pi_2 = \frac{E_\phi^s}{E_c^s} = 1$$

де d_ϕ , d_c – відповідно, діаметр кола нанесення шару ВВ в фізическому експерименті і діаметр жорсткої прегради в площині розрахунку численного експерименту; E_ϕ^s , E_c^s – відповідно, густина внутрішньої енергії (хіміческого превращення) на площині передачі імпульса в фізическому експерименті і площині жорсткої прегради в численному експерименті.

Створення вибухового імпульса в фізическому експерименті здійснювалось за допомогою навески азида свинцю в мелкокристалліческому стані, напыленного на алюмінієву фольгу. Поверхностна густина напылення навески $m_s=30$ мг/см², діаметр напылення $d_\phi=1$ см. Енергія хіміческого превращення азида свинцю становить 1,536 МДж/кг, відповідно густина поверхностної енергії становить 46 Дж/см², а поверхностна густина енергії на площині передачі імпульса $E_\phi^s = 35,325$ Дж.

Для создания аналогичной поверхностной плотности энергии на площади расчёта импульса в численном эксперименте определим массу метановоздушной смеси (9 % по объёму) и длину расчетной области заполненной газом (рис. 1). Энергия окисления метана 50,4 МДж/кг, соответственно, метановоздушной смеси (массовая доля метана 0,055) – 2,75 МДж/кг. Масса реакционноспособной смеси с поверхностной плотностью энергии такой же, как и в физическом эксперименте ($E_{\text{т}}^{\text{с}}=35,325$ Дж), составит 12,8 г (объем 10,9 см³). Толщина слоя метановоздушной смеси у жесткой стенки цилиндрического канала, диаметром 1 см составит 13,9 см (плотность метановоздушной смеси 1,17 г/см³).

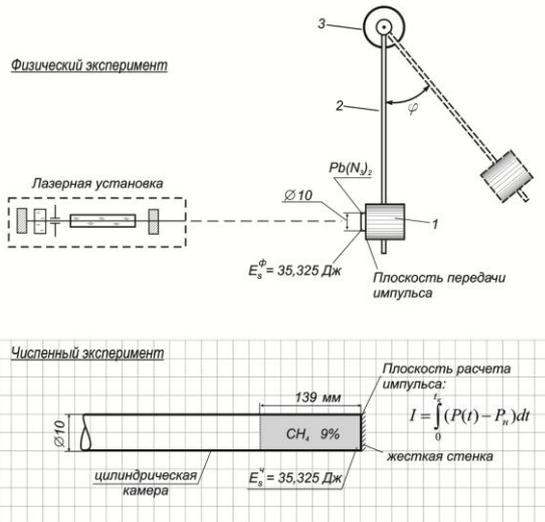


Рисунок 1 – Схема физического и численного эксперимента: 1 – металлический диск; 2 – трубка тонкостенная; 3 – переменный резистор СП–1

Экспериментальная установка создана на базе твердотельного оптического квантового генератора на неодимовом стекле ГОС–30М (рис. 1). Схема экспериментальной установки, включающая оптическую схему инициирования ВВ и измерительный комплекс, представлена на рис. 2.

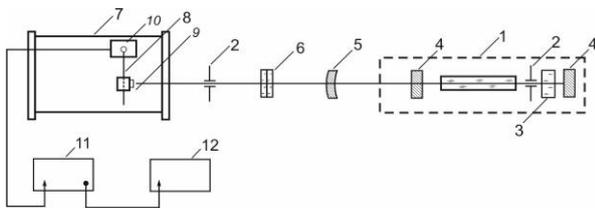


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки: 1 – лазер ГОС30М; 2 – диафрагмы; 3 – нелинейный поглотитель; 4 – зеркала резонатора; 5 – линзы; 6 – светофильтры; 7 – взрывная камера; 8 – маятник; 9 – навеска ВВ; 10 – датчик угла отклонения маятника; 11 – цифровой вольтметр ЦШ68003; 12 – запоминающее устройство

Навеска ВВ 9, представляющий собой круг диаметром 1,0 см из алюминиевой фольги толщиной 0,1 мм с нанесенным на нее покрытием из азид свинца, крепился к основанию маятника 8. Маятник вместе с датчиком угла отклонения 10 размещался во взрывной камере 7.

Методика измерения импульса давления взрывной волны. При проектировании маятника исходили из необходимости измерения импульсов в диапазоне углов отклонения (10–50)°. Схема маятника показана на рис. 3. Металлический диск 3 закреплялся на длинной тонкостенной трубке 2, один конец которой жестко крепился к оси переменного непровольного резистора 1 типа СП–1 группы А, имеющего линейную зависимость величины сопротивления от угла поворота подвижного контакта.

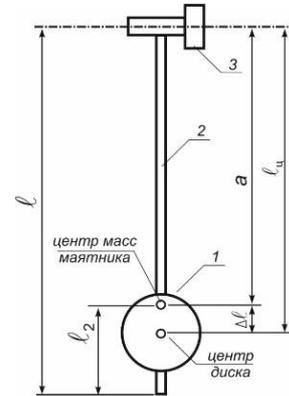


Рисунок 3 – Общий вид и схема баллистического маятника: 1 – диск маятника; 2 – трубка тонкостенная; 3 – переменный резистор СП–1

В конструкции маятника использовалась тонкостенная стальная трубка длиной $l=35,0$ см и массой на единицу длины $\rho=0,175$ г/см. Для определения диапазона импульсов, которые можно измерить с помощью имеющегося диска массой $m_{\text{д}}=31,38$ г, выведем математическое уравнение, связывающее величину импульса и угла отклонения маятника. Учитывая малые времена воздействия на маятник продуктов взрыва (менее 10^{-5} с), можно считать, что маятник приобретает импульс, когда угол отклонения $\varphi=0$. В этом случае можно записать закон сохранения энергии: $E_{\text{м}} = E_{\text{п}}$, где $E_{\text{м}}$ – энергия, переданная маятнику продуктами взрыва, $E_{\text{п}}$ – потенциальная энергия поднятого (отклоненного) маятника. Это равенство представим в следующем виде:

$$\frac{Mv_{\text{д}}^2}{2} = Mga - Mga \cdot \cos\varphi; \quad (1)$$

где $M=m_{\text{д}}+m_{\text{с}}$ – масса маятника, равная сумме масс диска и стержня (трубки); g – ускорение свободного падения; a – расстояние от точки подвеса до центра масс; φ – угол отклонения маятника.

Выражение (1) отличается от соответствующего уравнения математического маятника тем, что в правой части длина математического маятника l заменена величиной a . Из уравнения находим функциональную связь приобретаемого маятником импульса от угла отклонения:

$$J = 2M\sqrt{ga} \cdot \sin \frac{\varphi}{2}; \quad (2)$$

Плотность импульса составит:

$$j = \frac{2M\sqrt{ga} \cdot \sin \frac{\varphi}{2}}{S}, \quad (2)$$

где S – площадь на которой передается импульс.

Для расчета величины импульса по выражению (2) определим расстояние от точки подвеса до центра массы маятника. Для этого запишем систему уравнений (рис. 3):

$$\begin{cases} l = a + l_2, & l_{ц} = a + \Delta l, \\ \frac{\rho a^2}{2} = \frac{\rho l_2^2}{2} + m_d \Delta l \end{cases} \quad (3)$$

Третье уравнение системы (3) представляет собой равенство моментов сил относительно центра масс и получено в предположении того, что с одной стороны центра масс находится трубка маятника с рычагом длиной a , с другой стороны трубка маятника с рычагом l_2 и диск с рычагом Δl (рис. 3). Решая систему уравнений (3) относительно величины a , находим:

$$a = \frac{l m_c + 2 l_2 m_d}{2M}$$

Для того, чтобы при нагружении маятника не возникали дополнительные моменты, приводящие к погрешностям расчета, необходимо центр площадки передачи импульса совместить с осью центра масс маятника. В эксперименте использовался диск с массой всего лишь в ~ 5 раз больше массы стержня. Предварительный расчет показывает, что если диск закрепить на конце стержня, то центр масс маятника выходит за пределы радиуса диска ($r_d=1$ см). Поэтому для совмещения центра масс с центром диска, последний располагался по центру стержня, т.е. на расстоянии $l_{ц}=17,5$ см от оси вращения маятника. Учитывая, что $m_c=0,175 \cdot 35,0=6,13$ г, находим диапазон измерения плотности импульса для этого диска и диапазона углов ($10-50$)°: $m_d=0,03138$ кг, $M=0,03751$ кг, $a=l_{ц}=0,175$ м, $J=(0,110 - 0,526)$ кПа·с.

Непосредственной измеряемой величиной в эксперименте является угол отклонения маятника. Для его измерения использовалась дифференциальная схема неуравновешенного моста. В ней изменение измеряемой величины определяли по показанию прибора, включенного в измерительную диагональ моста. В другую диагональ включен источник питания мостовой схемы.

Согласование работы схемы измерения и регистрации с работой лазера обеспечивалось устройством синхронизации, которое производило запуск устройства регистрации одновременно с поджогом ламп накачки лазера и отключало устройство через заданный интервал времени.

Для определения угла отклонения маятника проведена калибровка схемы датчика угла отклонения в диапазоне изменения угла φ от 5 до 85 ° с дискретностью 5 °. Коэффициент преобразования определялся из выражения:

$$k = U / \varphi,$$

где U – показания измерительного прибора.

Среднее значение коэффициента преобразования $k=0,0434$ определялось из результатов калибровки усреднением этой величины.

Для получения в эксперименте достоверных значений измеряемых величин необходимо оценить погрешности измерений, которые возникают во всех звеньях лабораторной установки, а именно погрешность электрических измерений γ_U , погрешность,

связанная с силами трения γ_f и погрешность, связанная с дискретностью считывания информации запоминающим устройством γ_τ .

Погрешность измерения угла отклонения цифровым вольтметром с помощью схемы неуравновешенного моста γ_U определена как отношение абсолютной погрешности ΔU к значению измеряемой величины в процентах:

$$\gamma_U = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100 \%$$

Значение ΔU определялось в процессе калибровки датчика угла отклонения по стандартной методике. Максимальное значение $\gamma_U=4,7$ % получено при угле отклонения маятника 5 °.

Погрешность определения импульса, связанная с неточностью электрических измерений, определяется формулой:

$$\tilde{\gamma}_U = \frac{\Delta J}{J} \cdot \gamma_U \cdot 100 \%$$

Определим ΔJ как бесконечно малую величину dJ , с учетом (2) получим:

$$\tilde{\gamma}_U = \frac{(2M \sqrt{g a} \cdot \sin \frac{\varphi}{2})'}{2M \sqrt{g a} \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} \cdot \gamma_U = (\varphi_0/2) \operatorname{ctg} \left(\frac{\varphi_0}{2} \right) \gamma_U$$

В этом случае, при угле 5 ° погрешность измерения импульса составит $\tilde{\gamma}_U = 4,69 \approx 4,7$ %.

Для определения погрешности γ_f воспользуемся уравнением движения маятника при наличии сил трения. Это уравнение имеет вид:

$$\ddot{\varphi} + 2\lambda \dot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = 0,$$

где $\omega_0^2 = g/l$, $2\lambda = \mu/(M \cdot l)$, μ – коэффициент трения.

Решением этого уравнения (при условии, что $\varphi=0$, если $t=0$) является функция:

$$\varphi_\tau = A \cdot e^{-\lambda t} \sin \omega t,$$

где φ_τ – угол отклонения маятника с учетом трения; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \lambda^2}$.

Из экспериментальной зависимости $\varphi(t)$ был определен период колебания маятника, равный $T=1,28$ с, а также значения углов отклонения и соответствующие им моменты времени. Параметр затухания λ определяется как $\lambda = 1/2(\lambda_{12} + \lambda_{23})$, где 1, 2, 3 – номера колебания маятника.

Наличие трения приводит к занижению значения максимального угла отклонения. Погрешность измерения угла, обусловленная силами трения, может быть рассчитана по формуле:

$$\gamma_f = \frac{\varphi - \varphi_\tau}{\varphi_\tau} \cdot 100\% = \frac{1 - e^{-\lambda T/4}}{e^{-\lambda T/4}} \cdot 100\%$$

где $\varphi = A \cdot \sin(\omega t)$ – угол отклонения маятника без учета трения.

Результаты расчета для маятника с диском массой $31,38$ составят: $\lambda = 7,24 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$, $\gamma_f = 2,34$ %.

Погрешность определения импульса, связанная с неточностью измерения угла отклонения маятника, определяется формулой:

$$\tilde{\gamma}_f = \frac{\Delta J}{J} \cdot \gamma_f \cdot 100\% = (\varphi_0/2) \operatorname{ctg} \left(\frac{\varphi_0}{2} \right) \gamma_f$$

В лабораторной установке считывание информации цифрового вольтметра производилось запоминающим устройством с частотой 25 Гц. Такая форма

регистрации дает возможность производить отсчет величины угла отклонения маятника через каждые 40 мс в течение заданного промежутка времени, определять экспериментальную зависимость $\varphi(t)$, а следовательно, и параметр затухания колебаний маятника. Максимальное значение погрешности определения угла, обусловленной дискретным считыванием положения маятника, равно величине угла, на который отклоняется маятник в положении, близком к максимальному отклонению за время $\tau/2$. Здесь τ – время между измерениями положения маятника. Погрешность измерения угла:

$$\Delta\varphi = A\sin\left(\frac{\omega T}{4}\right) - A\sin\left(\frac{\omega T}{4} - \frac{\omega\tau}{2}\right) \approx \frac{\varphi_0}{2} \left(\frac{\omega\tau}{2}\right)^2,$$

где T – период колебания маятника.

Учитывая, относительную погрешность измерения импульса можно записать в виде:

$$\tilde{\gamma}_\tau = \frac{\Delta J}{J} \cdot \gamma_\tau \cdot 100\% = (\varphi_0/2) \text{ctg} g \left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \gamma_\tau,$$

где $\gamma_\tau = 0,5(\omega\tau)^2 \cdot 100\%$.

Учитывая, что $\omega=2\pi/T$, $T=1,28$ с, $\tau=0,04$, получим $\gamma_\tau=0,48\%$.

Суммарная погрешность измерения импульса, связанная с погрешностью определения угла отклонения, трением оси маятника, дискретностью считывания информации, определяется формулой:

$$\gamma_\Sigma = \tilde{\gamma}_U + \tilde{\gamma}_f + \tilde{\gamma}_\tau = 4,7 + 2,34 + 0,48 = 7,53\%$$

Как видим, погрешность измерения импульса с помощью маятника, используемого в эксперименте, вполне удовлетворительная.

В процессе физического эксперимента использовались готовые навески азида свинца изготовленные по технологии работы [11]. Масса навесок контролировалась с помощью весов ВЛ–120. Величина поверхностной плотности образцов колебалась вблизи $m_s=30$ мг/см², максимальное отклонение составляло 5 мг/см². В связи с этим, в численном эксперименте производилась корректировка объема газовой смеси. Всего было произведено пять опытов.

В процессе численного эксперимента проводилось взрывание расчетного объема метановоздушной смеси в цилиндрической камере, один торец которой был закрыт жесткой стенкой, второй – оставался открытым. Газ размещался у закрытого торца. Размер расчетной сетки составлял 10^{-3} м, шаг по времени 0,1 мкс, это позволяло подробно наблюдать начало горения, переход в детонацию, течение газов и распространение фронта ударной волны (рис. 4).

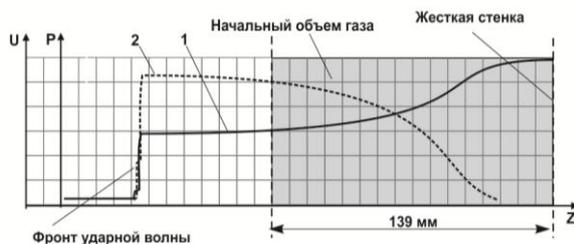


Рисунок 4 – График параметров течения продуктов взрыва из тупиковой части камеры (вдоль оси камеры Z) в численном эксперименте на момент времени 80 мкс: 1– график давления газов P ; 2– скорость течения газа U

Полученные результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Определение импульса в физическом и численном эксперименте

№	m_s мг/см ²	m_n мг	φ , град.	J_φ^f кПа·с	J_φ^c кПа·с	D %
1	30,0	23,5	27,7±2,0	0,300	0,270	9,0
2	32,5	25,5	30,0±2,2	0,324	0,305	6,2
3	26,2	20,6	24,3±1,8	0,263	0,247	6,4
4	33,7	26,5	31,2±2,3	0,337	0,354	-5,0
5	25,5	20,0	23,6±1,7	0,256	0,263	-2,7

m_s – поверхностная плотность образца, m_n – масса навески азид свинца, φ – угол отклонения маятника, J_φ^f –плотность импульса в физическом эксперименте, формула (2), J_φ^c –плотность импульса в численном эксперименте, D – относительное расхождение

ВЫВОДЫ. Апробация алгоритма численного счета силового воздействия ударной волны в лабораторном эксперименте по разработанной методике, показала удовлетворительную сходимость экспериментальных и теоретических результатов, расхождения величины импульса не превышает 9 %, что позволяет сделать вывод о применимости модели и ее соответствии реальному физическому процессу. Это достигается за счет полноты учета физических факторов, влияющих на рассматриваемый процесс. Преимуществами вычислительного эксперимента является более значительная информативность по сравнению с физическим, т.к. информация о процессе на каждом временном слое моделирования доступна в полном объеме. Таким образом, вычислительные эксперименты позволяют получить полное представление об исследуемом процессе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карауш, С.А. Оценка параметров промышленных взрывов. – Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2014. – 96 с.
2. Оценка риска при авариях техногенного характера / В.Ф. Стоецкий, В.И. Голинько, Л.В. Дранишников // Науковий вісник НГУ. – 2014. – Вип. 3 (141). – С. 117–125.
3. Параметры взрывозащитных устройств для гашения ударных воздушных волн при подземной добыче руд: монография / В.В. Русских, А.В. Яворский, Е.А. Яворская.– Днепропетровск: НГУ, 2012. – 93 с.
4. Барг М.А., Поладов Ю.Х. О моделировании распространения пламени в замкнутом цилиндрическом канале // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: информационные системы и технологии». – Орел: ОрелГТУ, 2008. – № 1–2/269 (544). – С. 30–32.
5. Беляев Н.Н., Карпо А.А. Защита окружающей среды при транспортировке угля // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – № 48.– С. 223–228.
6. Воробьев В.В., Помазан М. В. О влиянии конструкции заряда на характер развития начальной стадии разрушения твердых сред // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 1/2014 (84). – С. 124–129.
7. Налисько Н.Н. Газодинамический расчет параметров распространения воздушных ударных волн в горных выработках // Вісник Кременчуцького

національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 5/2013 (82). – С. 136–144.

8. Ініціювання світлочутливих вибухових речовин вузькими лазерними пучками / В.А. Чернай, В.В. Соболев, Н.В. Білан // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2007». – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2007. – С. 174–181.

9. Зажигание конденсированного вещества лазерным импульсом в области длин волн собственно-

го поглощения / В.П. Ципилев, Е.Ю. Морозова // Известия вузов. Физика. – 2009. – № 8/2. – С. 324–326.

10. Лазерное инициирование ТЭНа / В.И. Таржанов, А.Д. Зинченко, В.И. Сдобнов // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 4. – С. 113–119.

11. Патент № DE19546342, Германия, C06B 23/00. Initiieren der Sprengstoff / Schnaider Alexander, Chernay Anatoliy, Sobolev Valeriy, Iliushin Mishail; получен 11.03.1999.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EXPLOSIVE MOMENTUM IN PHYSICAL AND NUMERICAL EXPERIMENTS

IN EVALUATING THE SAFE CONDITIONS FOR EMERGENCY RESPONSE

A. Chernay, V. Sobolev

State Higher Educational Establishment «National Mining University»

prosp. K. Marksa, 19, 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine. E-mail: chernayanatoliy@rambler.ru

N. Nalisko

State Higher Education Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture»

vul. Chernyishevskogo, 24a, Dnepropetrovsk, Ukraine. E-mail: 0507544273@mail.ru

Purpose. Experimental verification of the methods of numerical calculation of the blast wave pulse transmitted by the construction of the explosion protection. **Methodology.** Laboratory experiment, analytical research, mathematical modeling, numerical simulation, analysis and synthesis, and results. **Findings.** The experimental test method of numerical calculation of the blast wave pulse transmitted by the construction of explosion protection is proposed. In a laboratory, it was carried out an experiment used a laser technique initiation of explosives and method for measuring the pressure of the explosion products pulses on the ballistic pendulum. To determine the mechanical impulse at work it was analytically derived functional relationship between the pulse value and the angle of deviation, as well as the characteristics of the real pendulum. The reliability of the results obtained in physical experiment is provided by the calibration sensor deflection angle of the pendulum, pulse evaluation of measurement errors associated with the determination error of the deflection angle, friction pendulum axis and increments of the read information. **Originality.** The technique of experimental verification of the numerical calculations of the blast wave pulse. Based on the energy conservation law and the equality of arms with respect to the center of mass moments of an analytical dependence it was determined the bridge magnitude of the explosion impulse to a pendulum angle of deviation and the parameters of the real pendulum. **Practical value.** The experimental test method of numerical calculation of the blast wave pulse is proposed. **Conclusions.** The approbation of the developed method of numerical calculation of the power of the shock wave effects in a laboratory experiment have shown satisfactory correlation of experimental and theoretical results, the magnitude of divergence on the momentum exceeds 9 %, which allows us to conclude prima applicability of the model and its corresponding real physical process.

Key words: momentum, ballistics, pendulum, laser, initiation.

REFERENCES

1. Karaush, S.A. (2014), *Otsenka parametrov promyshlennyykh vzryivov* [Estimation of parameters of industrial explosions], Izdatelstvo Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo univertsiteta, Tomsk, Russia.

2. Stoetsky, V.F., Golinko, V.I., Dranishnikov, L.V. (2014), "Risk assessment in man-caused accidents", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no. 3 (141), pp. 117–125.

3. Russkih, V.V., Yavorskiy, A.V., Yavorskaya, E.A. (2012), *Parametryi vzryivozaschitnykh ustroystv dlya gasheniya udarnykh vozdukhnykh voln pri podzemnoy dobyiche rud* [The parameters of explosion-proof devices for damping shock waves of air in underground ore mining], Natsionalnyi gornyy universitet, Dnepropetrovsk, Ukraine.

4. Barg, M.A., Polandov, Yu.H. (2008), "On the modeling of propagation of the flame in a closed cylindrical channel", *Izvestiya OrelGTU. Seriya «Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii: informatsionnye sistemy i tekhnologii»*, no. 1–2/269 (544), pp. 30–32.

5. Belyaev, N.N., Karpo, A.A. (2015), "Protecting the environment from coal transportation", *Sbornik nauchnykh trudov Natsionalnogo gornogo universiteta*, no. 48, pp. 223–228.

6. Vorobev, V.V., Pomazan, M.V. (2014), "Dynamic effects of shock waves of air overpressure jumper", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, vol. 1, no. 84, pp. 124–129.

7. Nalisko, N.N. (2013), "Gas-dynamic calculation of shock air wave propagation parameters in mine working", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, vol. 5, no. 82, pp. 136–144.

8. Chernay, V.A., Sobolev, V.V., Bilan, N.V. (2007), "Initiating Explosives photosensitive narrow laser beams", *Materiali mizhnarodnoyi konferentsiyi "Forum girnikiv – 2007"* [Proceedings of the international conference "Forum miners–2007"], Dnepropetrovsk, Natsionalnyi gornyy universitet, October 3–5, 2007, pp. 174–181.

9. Tsipilev, V.P., Morozova, E.Yu. (2009), "Ignition of a condensed substance by a laser pulse in the wavelength range of self-absorption", *Izvestiya vuzov. Fizika*, no. 8/2, pp. 324–326.

10. Tarzhanov, V.I., Zinchenko, A.D., Sdobnov, V.I. (1996), "Laser initiation of TEN", *Fizika gorennya i vzryiva*, vol. 32, no. 4, pp. 113–119.

11. Patent № DE19546342, Germany, C06B 23/00. "Initiieren der Sprengstoff", Schnaider, A., Chernay A., Sobolev V., Iliushin M., Received 11.03.1999.

Стаття надійшла 20.05.2016.