

### Список литературы

1. Hoek E. Practical Rock Engineering. London: Institution of Mining and Metallurgy, 2002. pp. 325.
2. Шашенко А.Н. Геомеханика / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко, Е.А. Сдвижкова Учебник для ВУЗов. – К.: Новий друк, 2016. – 528 с.
3. Шашенко, А.Н. Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт / А.Н. Шашенко, А.Н. Солодянкин, А.В. Мартовицкий [Монография]. – Днепропетровск: «ЛизуновПрес», 2012. – 384 с.
4. Шашенко А.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: Монография / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.Н. Гапеев. – Днепропетровск: НГУ, 2008. – 224 с.
5. Шашенко А.Н. Закономерности потери устойчивости пород подошвы в подготовительных выработках / А.Н. Шашенко А.Н., Н.В. Хозяйкина, А.Ю. Король // Ежемесячный научно-технический, производственный и экономический журнал «Уголь Украины». – Издатель: ГП «Институт» УкрНИИПроект». - № 10. – 2014. – С. 3-7.
6. Shashenko O., Kovrov O., Rakishev B., Mashanov A. On the issue of analytical and empirical criteria application for rock failure assessment // Theoretical and Practical Solutions of Mineral resources Mining 2015 (A Balkema book). – D.: Litograf, 2015. – p. 59-65.
7. Пивняк Г.Г. Геомеханика струговой лавы / Г.Г. Пивняк, А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, Смирнов А.В., Мартовицкий А.В., Н.С. Ерёмин [Монография]. – Днепропетровск: ООО «ЛизуновПресс», 2013. – 320 с.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ИМПУЛЬСА ВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ НА БАЛЛИСТИЧЕСКОМ МАЯТНИКЕ**

*А.В. Чернай, В.В. Соболев, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Украина*

*Н.Н. Налисько, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», Украина*

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.

Актуальность работы. Один из основных факторов силового воздействия ударной воздушной волны (УВВ) на взрывозащитные сооружения является механический импульс нагружения. Исследование и расчет взрывного импульса, передаваемого взрывозащитному сооружению 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 [1, 2].

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 экспериментального измерения импульса УВВ в условиях горных выработок, в работе [3] разработано измерительное устройство, которое позволяет делать измерения при короткозамедленном взрывании зарядов и соответственно многофронтных УВВ. По данным работы [3] расхождения результатов измерений с теоретическими расчетами не превышают 23%.

В настоящее время очень эффективными теоретическими методами исследований физических процессов являются численные эксперименты, которые несмотря на минимальные упрощения также нуждаются в экспериментальной проверке. В работе [4] численные исследования распределения избыточного давления при взрывах в газовых топках сравниваются с результатами моделирования взрыва на экспериментальной установке, имеющей геометрию топки. В работе [5] экспериментальной проверке подвергаются исследования в численных и аналитических расчетах.

Для решения задачи определения динамических нагрузок на взрывоустойчивые сооружения в условиях горных выработок была разработана методика численного счета, основанная на газодинамическом подходе с использованием метода крупных частиц, и позволяющая рассчитывать величину импульса УВВ [6]. В работе импульс рассчитывается по амплитуде избыточного давления, возникающего в плоскости жесткой стенки и времени существования избыточного давления:

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

где  $I$  – импульс силового воздействия, Па·с;  $t_k$  – время существования избыточного давления, с;  $P(t)$  – давление, возникающее на элементарной площадке поверхности взрывозащитного сооружения, Па;  $t$  – текущее время процесса, с;  $P_n$  – начальное давление, Па.

Для оценки достоверности расчета импульса УВВ в разработанной методикой численного счета методом крупных частиц необходимо провести его экспериментальную проверку, с надежным теоретическим обоснованием физического эксперимента.

Цель работы. Экспериментальная проверка алгоритма численного счета импульса взрывной волны передаваемой взрывозащитному сооружению. Разработка методики проведения эксперимента на баллистическом маятнике с использованием технология лазерного инициирования ВВ.

Методика и результаты исследований. Наиболее распространенным методом измерения импульса давления, в силу своей надежности, точности измерений и простоты реализации, является метод баллистического маятника. Величина импульса определяется по углу отклонения маятника. В работе предлагается использовать физический эксперимент определения импульса взрыва на баллистическом маятнике для экспериментальной проверки методики численного расчета импульса взрывной волны.

В случае определения взрывного импульса от взрыва газа на баллистическом маятнике теоретическим обоснование передачи импульса маятнику является решение задачи о разлете продуктов мгновенной детонации полученное в работах К.П. Станюковича. В них, совместное решение описывающее плоский разлет покоящегося газа, и общее решение, которое определяет движения газа за отраженной волной разрежения дают зависимость расчета величины плотности импульса:

$$J_s = \theta \sqrt{2m_s E_s}$$

где  $m_s$  – масса ВВ, приходящаяся на единицу поверхности (массовая плотность);  $E_s$  – внутренняя энергия продуктов детонации, приходящаяся единицу поверхности (плотность энергии);  $\theta$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от показателя адиабаты продуктов детонации.

Для физического моделирования условий этой задачи необходимо на торце баллистического маятника произвести мгновенный взрыв конденсированного ВВ находящегося в контакте с

преградой. Однако не любого ВВ, а способного к объемной детонации. В этом случае скачок избыточного давления в плоскости преграды возникает уже в газовой среде (продуктах детонации). Таким образом реализуются условия газового взрыва. Такие же условия на контакте с преградой можно смоделировать и в численном эксперименте, причем объемный газовый взрыв в численном эксперименте легко реализуется путем задания начальной температуры во всей области газовой смеси равной температуре самовоспламенения.

Для создания объемного зажигания в физическом эксперименте предлагается использовать технологию лазерного инициирования [7–9]. В качестве ВВ использовался азид свинца  $Pb(N_3)_2$ , активация химической реакции которого вызывается разогревом оптических микронеоднородностей в поле лазерного луча, что обеспечивает объемный взрыв.

Для достижения идентичности условий в физическом и численном эксперименте в работе используются критерии энергетического и геометрического подобия равные единице.

Критерий геометрического подобия  $\Pi_r$  выполняется для площади на которой передается импульс, критерий энергетического подобия  $\Pi_s$  выполняется для поверхностной плотности внутренней энергии:

$$\Pi_r = \frac{d_\phi}{d_\psi} = 1, \quad \Pi_s = \frac{E_\phi^s}{E_\psi^s} = 1$$

где  $d_\phi$ ,  $d_\psi$  – соответственно, диаметр круга нанесения слоя ВВ в физическом эксперименте и диаметр жесткой преграды в плоскости расчета численного эксперимента;  $E_\phi^s$ ,  $E_\psi^s$  – соответственно, плотность внутренней энергии (химического превращения) на площади передачи импульса в физическом эксперименте и площади жесткой преграды в численном эксперименте.

Создания взрывного импульса в физическом эксперименте производилось с помощью навески азид свинца в мелкокристаллическом состоянии, нанесенного на алюминиевую фольгу. Поверхностная удельная плотность напыления навески  $m_s=30$  мг/см<sup>2</sup>, диаметр напыления  $d_\phi=1$  см. Энергия химического превращения азид свинца составляет 1,536 МДж/кг, соответственно удельная поверхностная плотность энергии составит 46 Дж/см<sup>2</sup>, а поверхностная плотность энергии на площади передачи импульса  $E_\phi^s = 35,325$  Дж.

Для создания аналогичной поверхностной плотности энергии на площади расчета импульса в численном эксперименте, определим массу метановоздушной смеси (9 % по объему) 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  $E_\psi^s=35,325$  Дж составит 12,8 г (объем 10,9 см<sup>3</sup>). Толщина слоя метановоздушной смеси у жесткой стенки цилиндрической камеры, диаметром 1 см составит 13,9 см (плотность метановоздушной смеси 1,17 г/см<sup>3</sup>).

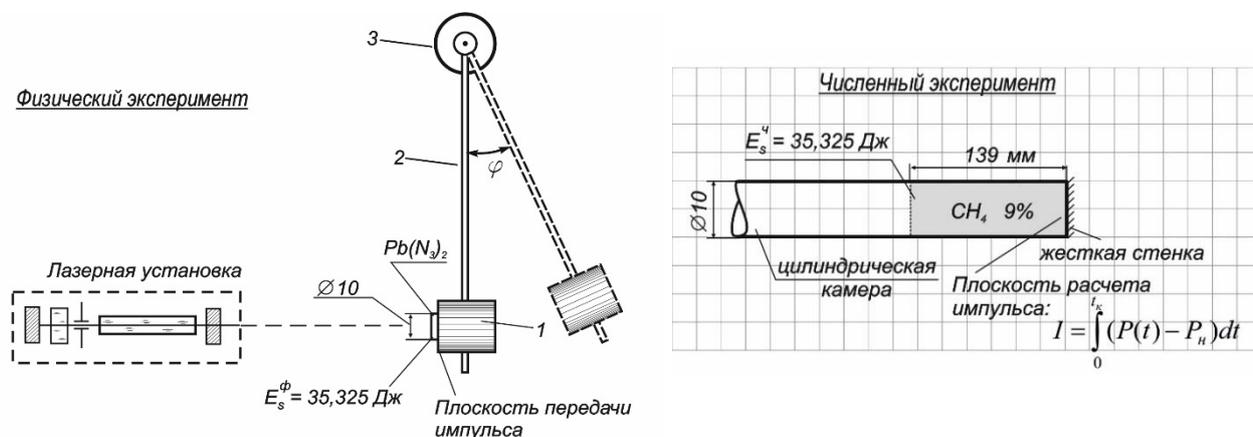


Рис. 1. Схема физического и численного эксперимента: 1– металлический диск, 2– трубка тонкостенная, 3 – переменный резистор СП-1

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.

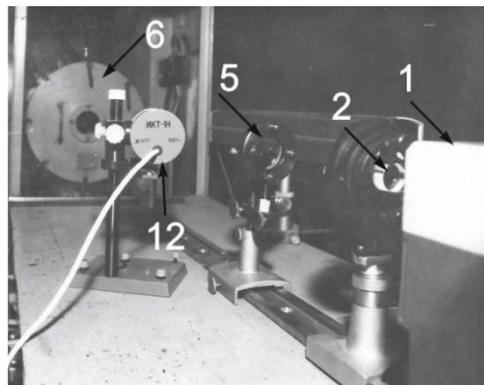
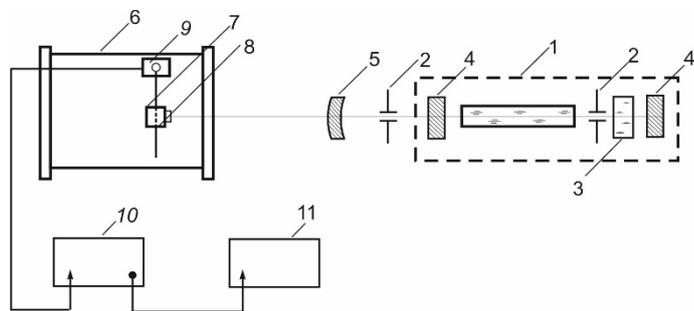


Рис. 2. Схема и общий вид экспериментальной установки: 1—лазер ГОС30М, 2—диафрагма, 3—нелинейный поглотитель, 4—зеркала резонатора, 5—линзы, 6— взрывная камера, 7— маятник, 8— навеска ВВ, 9— датчик угла отклонения маятника, 10— цифровой вольтметр Щ68003, 11— запоминающее устройство, 12 – калориметр контроля мощности луча лазера

Навеска ВВ 8, представляющий собой круг диаметром 1,0 см из алюминиевой фольги толщиной 0,1 мм с нанесенным на нее покрытием из азида свинца, крепился к основанию маятника 7. Маятник вместе с датчиком угла отклонения 9 размещался во взрывной камере 6.

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

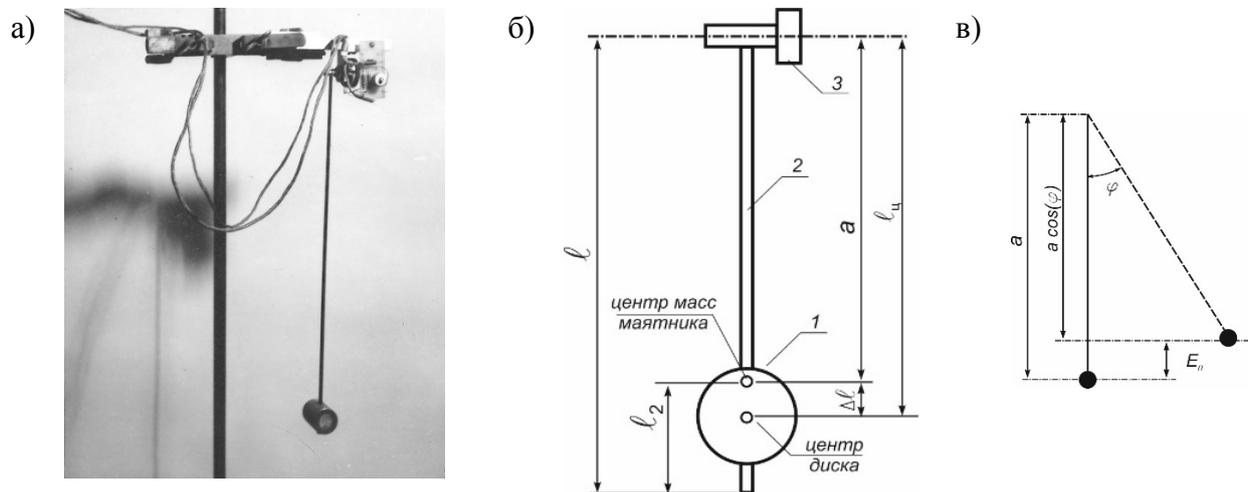


Рис. 3. Общий вид (а) и схема баллистического маятника (б), расчетная схема (в): 1— диск маятника, трубка тонкостенная, 3 – переменный резистор СП-1

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  $m_d=31,38$  г выведем формулу, связывающую 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 (рис. 3в):  $E_m = E_p$ , где  $E_m$  – энергия, переданная маятнику продуктами взрыва,  $E_p$  – потенциальная энергия поднятого (отклоненного) маятника. Это равенство представим в следующем виде:

$$\frac{Mv_0^2}{2} = Mga - Mga \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $M = m_d + m_c$  – масса маятника, равная сумме масс диска и стержня (трубки);  $g$  – ускорение свободного падения;  $a$  – расстояние от точки подвеса до центра масс;  $\varphi$  – угол отклонения маятника.

Уравнение (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:

$$J_s = \frac{2M\sqrt{ga} \cdot \sin \frac{\varphi}{2}}{S},$$

где  $S$  – площадь по которой передается импульс.

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

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

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  $\Delta l$  (рис. 3). Решая систему уравнений (3) относительно величины  $a$ , находим:

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

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  $\square$  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  $l_u = 17,5$  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  $10^\circ - 50^\circ$ :

$$m_d = 0,03138 \text{ кг}, \quad M = 0,03751 \text{ кг}, \quad a = l_u = 0,175 \text{ м}, \quad J = (0,110 - 0,526) \text{ кПа} \cdot \text{с}.$$

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 (рис. 4).

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  $\varphi$  от  $5^\circ$  до  $85^\circ$ . Коэффициент преобразования определялся из выражения:

$$k = \bar{U} / \varphi,$$

где  $\bar{U}$  – среднее показание вольтметра.

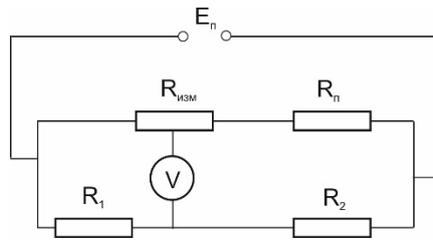


Рис. 4. Дифференциальная схема неуравновешенного моста, применяемая для измерения угла отклонения маятника:  $R_1$  и  $R_2$  – постоянные сопротивления,  $R_{изм}$  – переменное измерительное сопротивление и  $R_n$  – подстроечное сопротивление,  $E_n$  – питание схемы

Среднее значение коэффициента преобразования  $k=0,0434$  определялось из результатов калибровки усреднением этой величины (табл. 1). Для каждого угла проводилось не менее 5 опытов.

Таблица 1. Результаты калибровки датчика угла отклонения маятника

Угол отклонения маятника $\varphi$ , град.	5	25	45	65	85
Среднее показание вольтметра, $\bar{U} = (\sum U_i) / n$ , В	0,214	1,064	1,930	2,855	3,733
Средняя погрешность показания вольтметра $\Delta \bar{U} = \sum (\bar{U} - U_i) / n$ , В	0,010	0,014	0,014	0,017	0,011
Коэффициент преобразования $k = \bar{U} / \varphi$	0,043	0,043	0,043	0,044	0,044
Относительная погрешность электрических измерений $\gamma_U = \Delta \bar{U} / \bar{U}$ , %	4,7	1,4	0,7	0,6	0,3
Относительная погрешность измерений импульса связанная с погрешность электрических измерений $\bar{\gamma}_U = (\varphi_0 / 2) \text{ctg}(\varphi_0 / 2) \gamma_U$ , %	4,7	1,37	0,66	0,5	0,24

Для получения в эксперименте достоверных значений измеряемых величин необходимо оценить погрешности измерений, которые возникают во всех звеньях лабораторной установки, а именно погрешность электрических измерений  $\gamma_U$ , погрешность, связанная с силами трения  $\gamma_f$  и погрешность, связанная с дискретностью считывания информации запоминающим устройством  $\gamma_\tau$ .

Погрешность измерения угла отклонения цифровым вольтметром с помощью схемы неуравновешенного моста  $\gamma_U$  определена как отношение абсолютной погрешности  $\Delta U$  к значению измеряемой величины в процентах:

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

Значение  $\Delta U$  определялось в процессе калибровки датчика угла отклонения по стандартной методике. Максимальное значение  $\gamma_U = 4,7$  % получено при угле отклонения маятника  $5^\circ$  (табл. 1).

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

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

Определим  $\Delta J$  как дифференциал функции  $J$  в точке  $\varphi_0$  (при  $\Delta\varphi_0 \rightarrow 0$ ). С учетом (2) получим:

$$dJ = J'(\varphi_0)d\varphi = \left( 2M\sqrt{ga} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2} \right)' d\varphi = 2M\sqrt{ga} \cdot \frac{1}{2} \cos \frac{\varphi_0}{2} d\varphi ,$$

где  $d\varphi, dJ$  – соответственно, бесконечно малое приращение угла отклонения и как следствие бесконечно малое приращение импульса.

Тогда

$$\frac{\Delta J}{J} = \frac{2M\sqrt{ga} \cdot \frac{1}{2} \cos \frac{\varphi_0}{2}}{2M\sqrt{ga} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}} d\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \left( \frac{\varphi_0}{2} \right) d\varphi .$$

Согласно определению дифференциала функции  $d\varphi = \Delta\varphi$ , где  $\Delta\varphi$  приращение самой переменной  $\varphi$ , которая равна разнице между конкретным текущим углом и начальным  $\Delta\varphi = \varphi_0 - 0 = \varphi_0$ . В итоге получаем:

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

В этом случае, при угле  $5^\circ$  погрешность измерения импульса составит  $\tilde{\gamma}_U = 4,69 \approx 4,7 \%$  (табл. 1).

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

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

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

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

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

где  $\varphi_T$  – 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  $\lambda$  определяется как  $\lambda = \frac{1}{2}(\lambda_{1,2} + \lambda_{2,3})$ , 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:

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

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

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

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  $\tau$  – 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:

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

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:

$$\gamma_\Sigma = \tilde{\gamma}_U + \tilde{\gamma}_f + \tilde{\gamma}_\tau = 4,7 + 2,34 + 0,48 = 7,52\%.$$

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 [10]. Масса навесок контролировалась с помощью весов ВЛ-120. Величина поверхностной плотности образцов колебалась вблизи  $m_s = 30$  мг/см<sup>2</sup>, максимальное отклонение составляло 5 мг/см<sup>2</sup>. В связи с этим, в численном эксперименте производилась корректировка объема газовой смеси. Всего было произведено 5 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. 5). Параметры проведения лабораторного эксперимента и сравнительный анализ приведен в табл. 2.

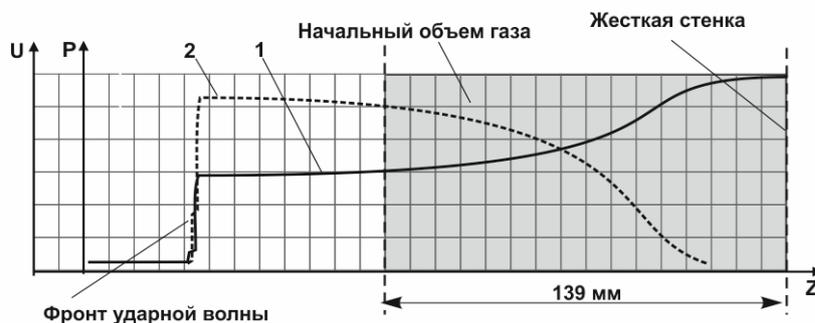


Рис. 5. График параметров течения продуктов взрыва из тупиковой части камеры (вдоль оси камеры  $Z$ ) в численном эксперименте, на момент времени 80 мкс: 1 – график давления газов  $P$ , 2 – скорость течения газа  $U$

Таблица 2. Результаты определения импульса в физическом и численном эксперименте

№ опыта	Поверхностная плотность образца, мг/см <sup>2</sup>	Масса навески азида свинца, мг	Угол отклонения маятника, град.	Плотность импульса, формула (2), кПа·с	Плотность импульса в численном эксперименте, кПа·с	Относительное расхождение, %
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

**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 являются более значительная информативность, по сравнению с физическим, так как информация о процессе на каждом временном слое моделирования доступна в полном объеме. Таким образом вычислительные эксперименты позволяют получить полное представление об исследуемом процессе.

#### Список литературы

1. Карауш, С.А. Оценка параметров промышленных взрывов [Текст] / С.А. Карауш. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – 96 с.;
2. Стоецкий, В.Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера [Текст] / В.Ф. Стоецкий, В.И. Голяничко, Л.В. Дранишников // Науковий вісник НГУ. – 2014. – Вип. 3(141). – С. 117-125;
3. Русских, В.В. Параметры взрывозащитных устройств для гашения ударных воздушных волн при подземной добыче руд [Текст] : Монография / В.В. Русских, А.В. Яворский, Е.А. Яворская.– Днепропетровск : НГУ, 2012.– 93 с.;
4. Барг, М.А. О моделировании распространения пламени в замкнутом цилиндрическом канале [Текст] / М.А. Барг, Ю.Х. Поляндов // 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. Защита окружающей среды при транспортировке угля [Текст] / Н.Н. Беляев, А.А. Карпо // Зб. наук. праць Національного гірничого університету.– Днепропетровск: НГУ, 2015.– №48.– С. 223-228;
6. Налисько, Н.Н. Динамическое воздействие ударных воздушных волн на взрывоустойчивые перемычки [Текст] / Н. Н. Налисько // Горноспасательное дело. – 2013. – Вып. 50.– С. 67-77;
7. Чернай, В.А. Ініціювання світлочутливих вибухових речовин вузькими лазерними пучками [Текст] / В.А. Чернай, В.В. Соболев, Н.В. Білан // Матеріали міжнародної конференції "Форум гірників – 2007" .–Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2007.– С. 174-181;
8. Ципилев, В.П. Зажигание конденсированного вещества лазерным импульсом в области длин волн собственного поглощения [Текст] / В.П. Ципилев, Е.Ю. Морозова // Известия вузов. Физика. – 2009. – №8/2. – С. 324-326;
9. Таржанов, В.И. Лазерное инициирование ТЭНа [Текст] / В.И. Таржанов, А.Д. Зинченко, В.И. Сдобнов// Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 4, - С. 113-119;
10. Патент №DE19546342, Германия, C06B 23/00. Initiieren der Sprengstoff/ Schnaider Alexander, Chernay Anatoliy, Sobolev Valeriy, Iliushin Mishail; Получен 11.03.1999.