

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ТЕЛЕМЕТРИИ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

Говорухин Ю.М., ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», Новокузнецк

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, Москва

Николаев А.В., ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», Новокузнецк

Сенкус Вал. В., ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», Новокузнецк

Петров С.А., ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», Новокузнецк

Лукашов О.Ю., ООО «ШАХТЭКСПЕРТ-Системы», г. Кемерово

Кубрин С.С., *Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, Москва*

Выполнены работы по созданию экспериментальной системы для телеметрии и обработки данных распространения воздушной ударной волны при физическом моделировании. Предложены составляющие элементы такой системы: физический и технический компоненты, методическая основа. Для каждой из указанных составляющих приведены решения по их реализации (датчики и их размещение, компрессор, микроконтроллер, программное обеспечение и т.п.). Разработан экспериментальный макет-стенд пневматической трубы для апробирования и обоснования работоспособности системы телеметрии и обработки данных. Установка стенда выполнена на жёстко закреплённых лабораторных столах со столешницей из нержавеющей стали с использованием струбцин для фиксирования элементов трубы. Это позволило уменьшить влияние колебаний конструкции на показания датчиков при распространении возмущений. С целью минимизации влияния статического напряжения на поток выдаваемых данных с датчиков (помехи), выполнено заземление трубы и столешниц лабораторных столов. Проведена серия экспериментов распространения волны сжатия по прямолинейному участку трубы и на нём же с установленной имитацией взрывоустойчивой перемычки. Полученные данные сравнены с результатами численного моделирования, выполненного с использованием пакета OpenFOAM. Приведены предложения по совершенствованию экспериментального стенда (физический компонент системы). Разработана конструктивная схема пневматической установки для проведения исследований ударно-волновых процессов. Обозначено направление дальнейших работ и исследований.

Ключевые слова: *взрывы, воздушная ударная волна, волна сжатия, экспериментальная установка, пневматическая труба, инженерные сооружения, горные выработки, угольная шахта*

Введение

Аварии в угольных шахтах, связанные с пожарами и взрывами пылегазовоздушных смесей, являются наиболее сложными, сопровождаются тяжкими последствиями и часто имеют высокую вероятность рецидивов, в том числе при ведении горноспасательных работ. Для минимизации последствий таких аварий используются специальные инженерные сооружения для локализации воздушных ударных волн (далее – ВУВ) при возможных взрывах [1-3]. Изучение физических процессов, сопутствующих распространению ВУВ, для последующего совершенствования

защитных сооружений требует проведения экспериментальных исследований [4-6]. Ранее в отечественной практике для этой цели применяли специализированные экспериментальные полигоны [7; 8]. Однако применение испытательных полигонов (шахт) для полномасштабных натурных исследований процессов взрывов и распространения их поражающих факторов по горным выработкам сопряжено с большими затратами на их строительство и эксплуатацию.

Определённый спектр задач по изучению процессов распространения взрывных и ударных волн по воздуховодам, в том числе в условиях изменения их направления и геометрических параметров, взаимодействия волн с преградами, а также некоторый ряд физико-химических задач возможно решить с использованием физических моделей меньшего масштаба (пневматические и детонационные трубы) [9; 10]. Развитие аддитивных технологических процессов, предоставляющих возможность изготавливать физические объекты из полимерных материалов на основе цифровых STL моделей, позволяет вывести эффективность применения стендов на более качественный уровень. Это связано с тем, что появилась возможность быстрого прототипирования разрабатываемых инженерных сооружений и проверки их эффективности на физических установках. Если полученных данных недостаточно для полного представления об эффективности работы модели сооружения, целесообразно выполнять математическое моделирование на вычислительном кластере (суперкомпьютере), при этом настройка и верификация подобной модели может вестись на основе полученных результатов физического эксперимента.

В данной статье рассматривается создание системы телеметрии и обработки данных быстропротекающих процессов, а также экспериментального стенда с использованием пневматического принципа генерации волн сжатия (ВУВ). Стенд создает основу для натурных измерений, изучения особенностей распространения волн, их отражения и взаимодействия с преградами, в том числе, в условиях различной геометрии каналов.

Разработка экспериментальной системы телеметрии и обработки полученных данных

Выполнена работа по конструированию системы сбора и обработки экспериментальных данных, необходимой для создания испытательного стенда на основе пневматического принципа генерации ВУВ, интегрирующей физические и технические компоненты, а также предложена методическая основа проведения экспериментов. Инструментальная база системы (технический компонент) включает элементы:

- Датчики измерения избыточного давления газа НК3022. Их технические характеристики приведены в таблице 1.

- Воздушный компрессор для создания избыточного давления в камере высокого давления (далее – КВД), отделённой изолирующей заслонкой [11-13]. Возможно использование автомобильного компрессора с индикацией давления через аналоговый или цифровой манометр.

- Плата микроконтроллера Arduino Due на базе процессора Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 (32-битное ядро ARM). Данный микроконтроллер обеспечивает приём электрических сигналов, эмитируемых датчиками измерения давления, и синхронизацию их показаний. Технические характеристики Arduino Due приведены

в таблице 2. Питание Arduino Due обеспечивается через USB-кабель или с помощью внешнего блока питания.

- Персональный компьютер под управлением системы GNU/Linux для целей прослушивания СОМ-порта, регистрации и записи в csv файлы поступающих данных с датчиков контроля избыточного давления.

Таблица 1

Технические характеристики датчиков НК3022

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
1	Рабочее напряжение	В	5,0
2	Выходное напряжение	В	0,5-4,5
3	Материал датчика	-	Сплав углеродистой стали
4	Диапазон рабочего давления	МПа	0,0-0,5 и 0,0-1,2

Для апробирования и обоснования работоспособности технического компонента системы разработан экспериментальный макет-стенд пневматической трубы, общий вид которого приведён на рисунке 1. Указанный стенд является физическим компонентом системы. При его разработке использованы три трубы из полипропилена общей длиной 5,6 м. Диаметр трубы (внешний/внутренний) составляет 110/100 мм. На трубе смонтированы датчики контроля измеряемой величины избыточного давления в количестве 10 шт. (Рис. 2).

Таблица 2

Технические характеристики микроконтроллера Arduino Due

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
1	Рабочее напряжение	В	3,3
2	Входное напряжение (рекомендуемое)	В	7,0-12,0
3	Входное напряжение (предельное)	В	6,0-20,0
4	Цифровые входы/выходы	шт.	54 (12 с поддержкой ШИМ)
5	Аналоговые входы	шт.	12
6	Аналоговые выходы	шт.	2 (ЦАП)
7	Флеш-память	Кб	512
8	ОЗУ	Кб	96 Кб (64 Кб и 32 Кб)
9	Тактовая частота	МГц	84

Примечание. ШИМ – широтно-импульсная модуляция; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство

Стенд установлен на жёстко закреплённых лабораторных столах со столешницей из нержавеющей стали. Для крепления элементов трубы использованы струбины. Это позволило уменьшить влияние колебаний конструкции на показания датчиков при распространении возмущений. С целью минимизации влияния статического

напряжения на поток выдаваемых данных с датчиков (помехи) выполнено заземление трубы и столешниц лабораторных столов (Рис. 3).

Для создания избыточного давления в КВД (1 на рисунке 2) предложено использование тонкостенных камер, изготовленных из латекса, давление разрыва которых варьируется в диапазоне от 25 до 33 кПа (установлено по серии опытов), в зависимости от качества материала. Давление, при котором происходит разрушение камеры, определяется с использованием данных датчика Д0, находящегося в непосредственной близости от КВД.

В качестве реализации методической основы выполнена работа по обоснованию методов и подходов для получения и обработки данных с датчиков измерения давления, по результатам которой разработано специализированное программное обеспечение. Для функционирования микроконтроллера Arduino Due разработана встроенная программа на языке Arduino C. Учтены ограничения по аппаратной скорости приёма, обработки и передачи данных с целью повышения производительности работы системы. Связь с компьютером обеспечена через COM-порт. Также разработан пакет программного обеспечения для прослушивания поступающих сигналов из порта, регистрации и записи в csv-файлы входящих данных с датчиков контроля избыточного давления. Для этой цели использованы язык C++ и набор библиотек Qt.

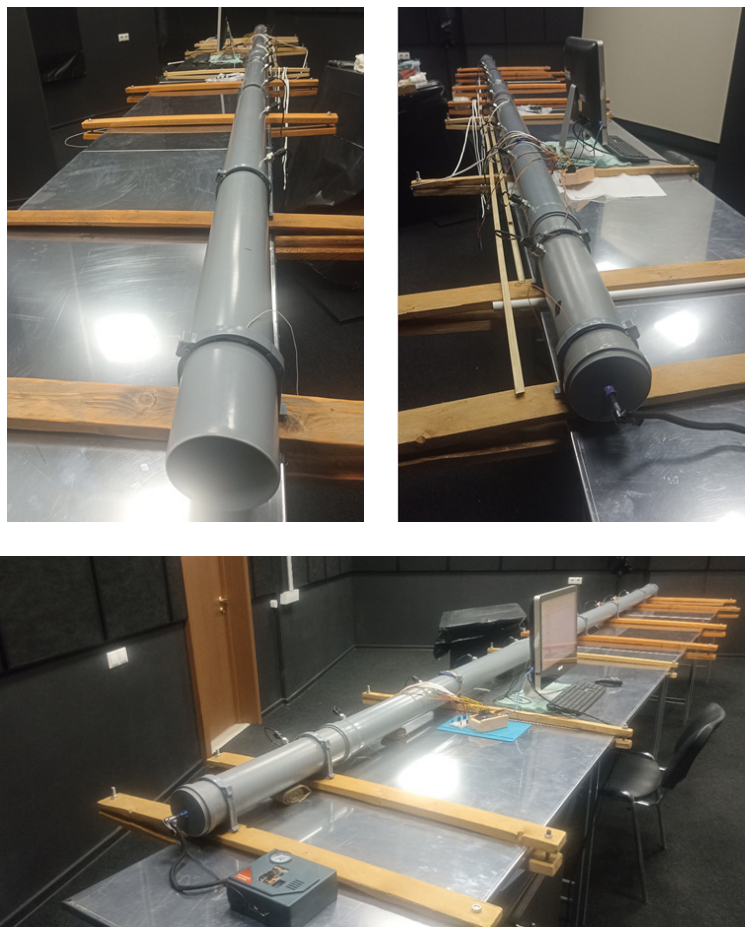


Рис. 1. Общий вид макета-стенда пневматической трубы

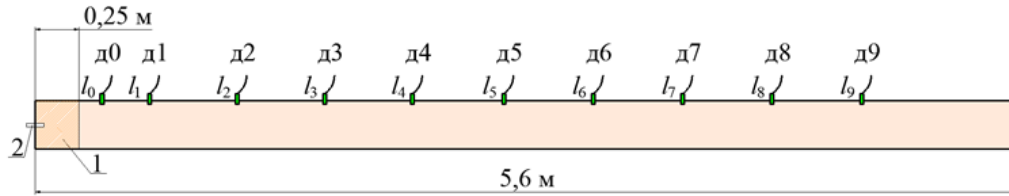


Рис. 2. Схема макета-стенда пневматической трубы: 1 – КВД; 2 – ниппель для подключения компрессора; $\partial 0 \dots \partial 9$ – датчики измерения величины избыточного давления; $l_0 \dots l_9$ – расстояние установки соответствующего датчика от начала трубы (принято, что $l_0 = 0,38$ м, $l_1 = 0,65$ м, далее $l_n = l_{n-1} + 0,5$ м)

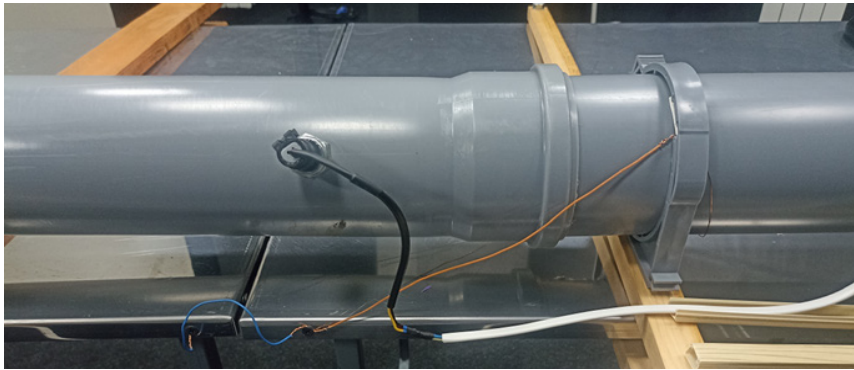


Рис. 3. Заземление столешниц и стенда

Объединение элементов технического и физического компонентов с использованием разработанной методической основы в единую систему обеспечило возможность получения сигналов с датчиков через интервалы времени, не превышающие 77 мкс.

Тестирование работоспособности разработанной системы

С целью оценки эффективности применения предложенной системы проведена серия экспериментов распространения волны сжатия на прямолинейном участке трубы, а также с установленной в нём имитацией взрывоустойчивой перемычки. Полученные данные сравнены с результатами численного моделирования, выполненного с использованием пакета OpenFOAM (The OpenFOAM Foundation Ltd.) [14; 15]. Создание и настройка имитационной модели стенда проведены с использованием геометрических и аэрогазодинамических параметров объекта-оригинала [16; 17]. При расчётах использована следующая система трёхмерных осреднённых уравнений для сжимаемого газа [18]:

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

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

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

$$\bar{\tau}_{i,j} \equiv -\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i'' = \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu_t \frac{\partial \tilde{u}_m}{\partial x_m} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{\rho} k, \quad (4)$$

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

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

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

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

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

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

$$\tilde{E} = \tilde{e} + \frac{\tilde{u}_i^2}{2}, \quad \bar{q}_j = -\lambda \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j}, \quad \bar{p} = \bar{\rho} R_2 \tilde{T}, \quad R_2 = R/M, \quad (11)$$

где $\bar{\rho}$ – осреднённая плотность воздуха, кг/м³; t – время, с; \tilde{u}_i – среднемассовые 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} – среднемассовое значение полной энергии газа, Дж; \tilde{H} и H'' – среднемассовое значение полной энтальпии и её пульсационная составляющая; \bar{q}_j – осреднённый тепловой поток, Вт; \tilde{h} и h'' – среднемассовое значение энтальпии и её пульсационная составляющая, Дж; $Pr_t = 0,7$ – турбулентное число Прандтля; \tilde{T} – среднемассовое 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; $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ – числовые константы; \tilde{e} – осреднённая внутренняя энергия газа, Дж; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); R_1 – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К); R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); M – молекулярная масса, кг/кмоль; c_v – теплоёмкость при постоянном объёме, Дж/К; c_p – теплоёмкость при постоянном давлении, Дж/К; γ – показатель адиабаты.

Данная система уравнений позволяет рассчитывать распространение ВУВ по горной выработке, в том числе при взаимодействии её с перемычками, учитывать процессы турбулентности и шероховатость (диссипация энергии потока). Использована модель турбулентности standard k - ε . Интегрирование дифференциальных уравнений основано на методе контрольных объёмов. Для связи уравнений по скорости и давлению применён алгоритм PIMPLE (комбинация алгоритмов PISO и SIMPLE метода Патанкара [14; 18]).

Граничные условия поставлены в зависимости от геометрических параметров трубы. Если граница – стенка или перемычка, то относительно скорости используются условия непротекания и прилипания: $\partial u_i / \partial n = 0, u_i = 0$. Если модель трубы выходит на поверхность, на этой границе предполагается постоянство давления, плотности, температуры и скорости потока: $p = p_{\text{атм}}, \rho = \rho_{\text{атм}}, T = T_{\text{атм}}, \partial u_i / \partial x_i = 0$.

На рисунке 4 приведены построенные графики динамики волны сжатия, на котором синими точками отмечены значения избыточного давления, полученные с соответствующих датчиков контроля, а линией оранжевого цвета – результаты численного моделирования.

Как видно из рисунка 4, в момент времени t_0 газ в КВД (левая часть трубы) сжат до избыточного давления, равного $p_4 = 30,5$ кПа. В правой части трубы давление воздушной среды составляет $p_1 = 0$ кПа.

При разрушении диафрагмы сжатый газ устремляется в камеру низкого давления с открытым торцом в атмосферу. Продолжительность процесса распространения возмущения от зоны высокого давления до открытого торца трубы составила около 0,016 с. При установленной перемычке от зоны высокого давления до преграды – 0,0085 с. Разрыв давлений, имевшийся в первоначальный момент, распространяется в виде ВУВ вправо, увлекая за собой спутный поток газа, который также сносит за собой волны разрежения. При этом давление на коротком участке трубы падает через 0,001 с до 14,1 кПа. В дальнейшем из-за действия сил аэродинамического сопротивления (шероховатость стенок трубы, вязкость газа) происходит постепенное снижение давления во фронте ВУВ. В правой части трубы (камера низкого давления) при взаимодействии волны сжатия с препятствием, имитирующим инженерное сооружение, происходит скачок давления с 13,6 кПа до 26,1 кПа из за её отражения (Рис. 4б).

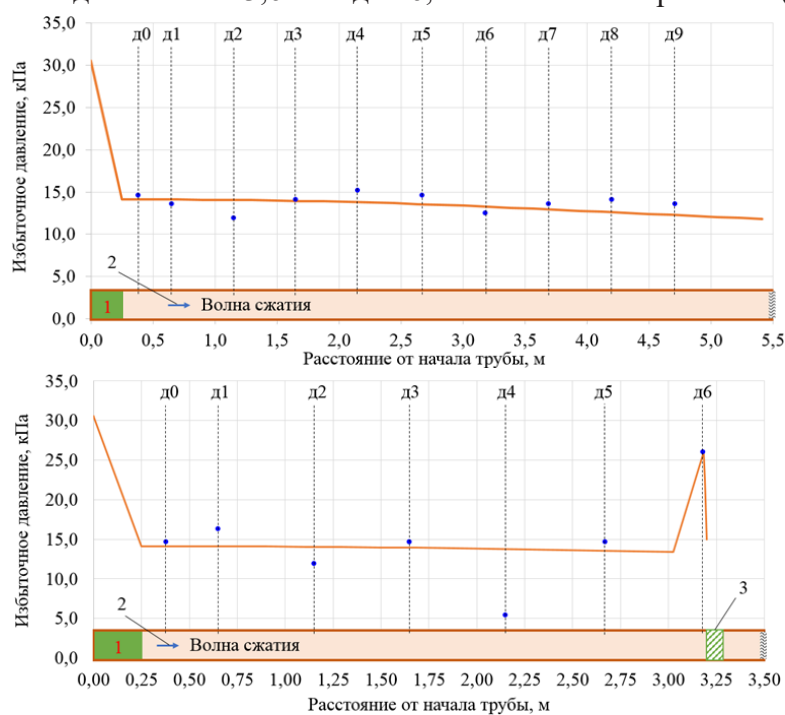


Рис. 4. График максимального избыточного давления во фронте волны сжатия на прямолинейном участке пневматической трубы (а) и на нём же с установкой перемычки (б): 1 – КВД; 2 – направление распространения волны сжатия; 3 – имитация взрывоустойчивой перемычки; d0...d9 – датчики давления

Значения давлений, полученных численным расчётом, для обоих вариантов в сравнении со значениями избыточных давлений с датчиков, сведены в таблицах 3 и 4. В виду того, что для датчика д4 наблюдается аномалия измеряемых значений (Рис. 4б), в таблице 4 для неё расчёт отклонения и погрешности не выполнялся. При прохождении ВУВ через места установки датчиков, ими регистрировалось от 22 до 27 измерений. Из полученного стека данных определено среднее фактическое значение $\Delta P_{\phi,k}$, кПа, и среднеквадратическое отклонение σ_k , доли ед., по формуле

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (12)$$

где n – количество измерений для k -го датчика, шт.; x_i – замеренное значение, кПа; \bar{x} – среднее значение стека измерений, кПа.

Расхождение значений $|\delta_k|$, %, при сравнении фактических данных, определённых по замерам на макете-стенде $\Delta P_{\phi,k}$, кПа, с данными, полученными по результатам численного моделирования $\Delta P_{p,k}$, кПа, рассчитано по формуле

$$|\delta_k| = \frac{u_{\phi,k} - u_{u,k}}{u_{\phi,k}} \cdot 100, \quad (13)$$

где $u_{\phi,k}$, $u_{u,k}$ – значения параметров, определённых по результатам замеров и численного моделирования, соответственно.

Таблица 3

Сравнение расчётных и экспериментальных значений давления при распространении ВУВ на прямолинейном участке трубы (Рис. 4а)

Параметр	Давление в точке замера, кПа									
	д0	д1	д2	д3	д4	д5	д6	д7	д8	д9
$\Delta P_{\phi,k}$, кПа	14,9	13,2	13,0	13,9	14,9	14,5	11,9	13,5	14,2	13,7
σ_k , доли ед.	0,27	0,31	0,36	0,34	0,26	0,40	0,35	0,34	0,32	0,40
$\Delta P_{p,k}$, кПа	14,1	14,1	14,1	14,0	13,8	13,6	13,3	13,0	12,6	12,3
$ \delta k $, %	5,1	6,7	8,6	0,4	7,1	6,4	11,7	4,4	10,9	10,7

Таблица 4

Сравнение расчётных и экспериментальных значений давления при распространении ВУВ на прямолинейном участке трубы и взаимодействии с имитацией перемычки (Рис. 4б)

Параметр	Давление в точке замера, кПа						
	д0	д1	д2	д3	д4	д5	д6
$\Delta P_{\phi,k}$, кПа	14,8	13,7	11,9	14,9	5,9	14,6	26,4
σ_k , доли ед.	0,29	0,54	0,52	0,35	-	0,19	0,23
$\Delta P_{p,k}$, кПа	14,1	14,1	14,1	14,0	13,8	13,6	26,1
$ \delta k $, %	4,3	2,8	17,9	6,6	-	7,3	1,5

Из приведённых данных (Рис. 4а, Рис. 4б, Табл. 3 и Табл. 4) видно, что разработанная система телеметрии и обработки полученных значений позволяет получать экспериментальные значения параметров развития ударно-волновых процессов при проведении исследований с использованием испытательного макета-стенда.

Предложения по совершенствованию испытательного стенда

При генерации ВУВ с использованием пневматического способа для целей создания стенда могут быть использованы следующие принципы реализации:

- модульность исполнения (это предоставляет возможность изменения геометрии стенда);
- наличие КВД;
- наличие камеры низкого давления.

На оборудование, работающее под избыточным давлением более 0,07 МПа и применяемое в научно-экспериментальных целях, с сосудами вместимостью менее 0,025 м³ не распространяются требования федеральных норм и правил [11]. При не превышении указанного объёма максимальное избыточное давление определяется прочностью участка трубы.

Воздушная ударная волна при пневматическом принципе её генерирования вследствие конечной скорости разрыва диафрагмы и наложения волн сжатия стабилизируется на расстоянии от КВД, равном $L_{ст} \geq (10 \div 20)D_{тр}$ (где L_0 – длина КВД, м; $D_{тр}$ – внутренний диаметр трубы, м). При соблюдении условия в воздуховоде обеспечивается стабилизация фронта ВУВ.

С использованием указанных принципов разработана конструктивная схема пневматической установки для проведения исследований ударно-волновых процессов (Рис. 5) с учётом давлений, образующихся при взрывах пылегазовоздушных смесей, согласно [2; 11]. Установка представляет собой модульную конструкцию, состоящую из секций, связанных между собой фланцевыми соединениями. На рисунке б приведена реализация КВД с использованием аддитивных технологий. В качестве мембраны возможно использование алюминиевой фольги различной толщины.

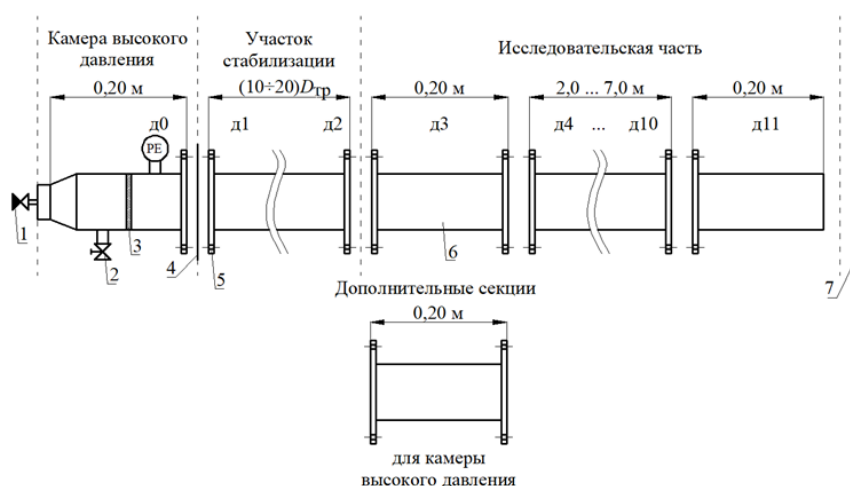


Рис. 5. Конструктивная схема пневматической установки: 1 – клапан; 2 – кран для сброса давления и слива конденсата; 3 – соединительная муфта; 4 – мембрана; 5 – фланец; 6 – прямолинейный участок трубы; 7 – отбойник; д0...д11 – датчики измерения избыточного давления; $D_{тр}$ – внутренний диаметр трубы

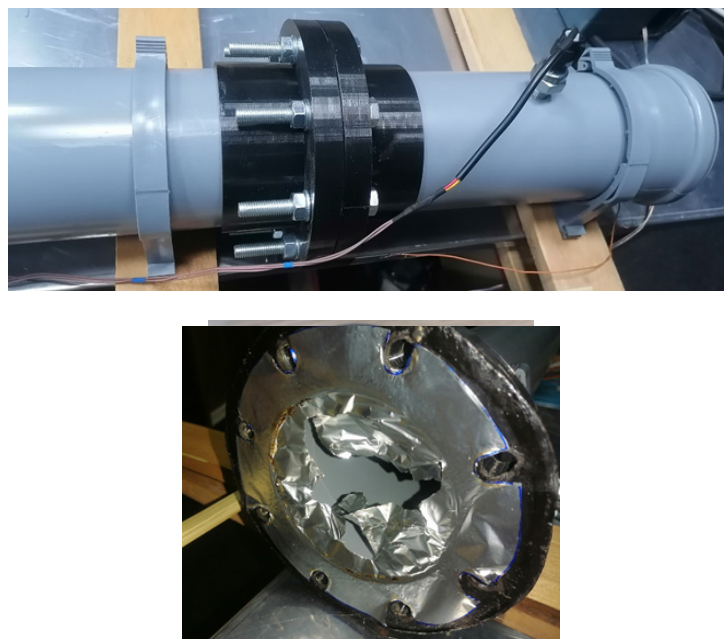


Рис. 6. Реализация КВД с использованием аддитивных технологий (фланцевое соединение)

Принцип работы установки заключается в том, что в КВД через клапан 1 от компрессора нагнетается воздух, который удерживается в камере за счёт мембраны 4, закреплённой между фланцами 5 (Рис. 5 и Рис. 6). Давление в камере контролируется с помощью датчика избыточного давления (манометр) д0. При достижении установленного значения давления (предел прочности) мембрана разрушается за счёт созданной на неё нагрузки (Рис. 6). В качестве материала мембраны предложено использование алюминиевой фольги. Изменение её толщины позволяет регулировать давление разрыва и, следовательно, интенсивность образующейся ВУВ. Сжатый воздух, попадая в камеру низкого давления, расширяется и на расстоянии $5L_0$ формируется фронт плоской ВУВ. Динамика избыточного давления в протекающем вдоль трубы процессе фиксируется датчиками и регистрируется программой-утилитой в csv-файлах на носителе.

Особенностью конструктивной схемы, представленной на рисунке 5, является наличие не только КВД, но и двух частей камеры низкого давления: участок стабилизации, длина которого составляет $L_{ст} \geq (10 \div 20)D_{тр}$, и исследовательская часть. Реализуется возможность наращивания длины КВД посредством добавления элементов трубы и их фланцевого соединения с шагом 0,2 м в диапазоне 0,2-1,2 м. Исследовательская часть состоит из двух оконтуривающих модулей 0,20 м, в которых устанавливаются датчики контроля давления (для регистрации давления перед и после исследовательской части трубы), и за счёт фланцевых соединений монтируется участок длиной 2,0-7,0 м для создания требуемой конфигурации испытательного стенда.

Заключение

В результате выполненных авторами работ:

- создана система телеметрии и обработки данных быстропротекающих процессов

на основе комплекса датчиков, закреплённых вдоль трубы, платы микроконтроллера Arduino Due, воздушного компрессора, персонального компьютера и специализированного программного обеспечения;

- сконструирован стенд-макет с пневматическим принципом генерации волн сжатия, оснащённый системой телеметрии и обработки данных быстропротекающих процессов при распространении волн;

- показана удовлетворительная сходимости натуральных замеров избыточного давления с результатами математического моделирования распространения волн сжатия, выполненного в пакете OpenFOAM;

- разработана методическая основа для проведения дальнейших исследований с применением физического моделирования высокоскоростных ударно-волновых процессов и их взаимодействия с преградами;

- предложена конструктивная схема пневматической установки для проведения исследований ударно-волновых процессов с учётом давлений, образующихся при взрывах пылегазовоздушных смесей;

- планируется модернизация разработанной системы, приведение её к виду, максимально приближённому к классическому описанию при постановках задач газовой динамики, проведение исследований для установления закономерностей взаимодействия ВУВ с защитными инженерными сооружениями.

Библиографический список

1. *Говорухин Ю.М., Домрачев А.Н., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю.* Методика оценки толщины изолирующих взрывоустойчивых перемычек // *Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова.* – Новокузнецк, 2023. – № 9. – С.333-336.
2. *Палеев Д.Ю., Васенин И.М., Костеренко В.Н.* Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 312 с.
3. *Мясников А.А., Миллер Ю.А., Комаров Н.Е.* Вентиляционные сооружения в угольных шахтах. – М.: Недра, 1983. – 270 с.
4. *Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Сенкус В.В., Мясников Н.В.* Применение многорядной системы перфорированных преград для снижения величины избыточного давления во фронте ударной воздушной волны // *Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова.* – Новокузнецк, 2024. – № 10. – С.278-285.
5. *Криволапов В.Г., Говорухин Ю.М.* Взаимодействие ударно-воздушной волны с водяными заслонами при возведении изолирующих противопожарных перемычек // *Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей. Под общей редакцией В.Н. Фрянова.* – 2007. – С.198-203.
6. *Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Васенин И.М.* и др. Гашение энергии ударной волны водяным заслоном при взрыве слоевого скопления метана // *Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова.* – Новокузнецк, 2017. – № 3. – С.385-389.
7. *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.
8. *Плотников В.М.* Разработка преград для обеспечения взрывозащиты в горных выработках. Аналитический обзор. – Караганда: КФ АО «НЦНТИ», 2012. – 56 с.
9. *Leilin Zhang, Qianyi Yang, Biming Shi, Yihui Niu & Zheng Zhong.* Influences of a Pipeline's Bending Angle on the Propagation Law of Coal Dust Explosion Induced by Gas Explosion // *Combustion*

- Science and Technology. – 2021. – Т.193, № 5. – Pp.798-811. – <https://doi.org/10.1080/00102202.2019.1673381>.
10. *Yihui Niu, Leilin Zhang, Biming Shi, Qianyi Yang & Zhen Zhong*. Methane–Coal Dust Mixed Explosion in Transversal Pipe Networks // *Combustion Science and Technology*. – 2021. – Т. 193, № 10. – Pp.1734-1746. – <https://doi.org/10.1080/00102202.2019.1711071>.
 11. Приказ Ростехнадзора от 15.12.2020 № 536 Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_373204/.
 12. Распоряжение Госгортехнадзора России от 27.04.2004 № Р-7 «О введении в действие Методики газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли» [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.entd.ru/document/901899801>.
 13. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа: учебник для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
 14. *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. – <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>.
 15. *Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Коряга М.Г., Палеев Д.Ю.* Моделирование газодинамических процессов при изоляции выработок аварийных участков с использованием гидрозатворов // *Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова*. – Новокузнецк, 2020. – № 6. – С.376-380.
 16. *Крайнов А.Ю., Моисеева К.М.* Моделирование распространения ударной волны от взрыва углеметановоздушной смеси в канале с поворотом // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: тезисы докладов, 21-25 августа 2023 г. – Санкт-Петербург, 2023. – С.1258-1259.
 17. *Крайнов А.Ю., Моисеева К.М.* Моделирование распространения ударной волны от взрыва углеметановоздушной смеси в канале с разветвлениями // Всероссийская конференция «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения»: тезисы докладов, 18-21 сентября 2023 г. / Сиб. отделение РАН, Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева. – Новосибирск: СО РАН, 2023. – С.216. – https://doi.org/10.53954/9785604990025_216.
 18. *Говорухин Ю.М., Домрачев А.Н., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю.* Моделирование процессов распространения параметров ударной воздушной волны по выработкам и её взаимодействия с инженерными сооружениями // *Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова*. – Новокузнецк, 2023. – № 9. – С.322-333.

Для цитирования:

Говорухин Ю.М., Николаев А.В., Сенкус Вал. В., Петров С.А., Лукашов О.Ю., Кубрин С.С. Экспериментальная система для телеметрии и обработки данных при исследовании быстропротекающих процессов распространения воздушных ударных волн // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. – 2026. – № 2. – С. 50–62. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.2.3>

Сведения об авторах:

Говорухин Юрий Михайлович, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела, Федеральное государственное казенное учреждение дополнительного профессионального образования «Национальный аэромобильный спасательный учебно-тренировочный центр подготовки горноспасателей и шахтеров» (ФГКУ «Национальный горноспасательный центр»), 654044, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, пр-т Авиаторов, д. 54; старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН («ИПКОН РАН»), 111020, г. Москва, Крюковский туп., д. 4; e-mail: govorukhin_ym@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8950-9900

Николаев Алексей Викторович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГКУ «Национальный горноспасательный центр»; e-mail: nav@ngc.42.mchs.gov.ru, ORCID: 0009-0004-7138-8724

Сенкус Валентин Витаутасович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГКУ «Национальный горноспасательный центр»; e-mail: senkus@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-2986-7177

Петров Сергей Анатольевич, начальник учреждения, ФГКУ «Национальный горноспасательный центр»; e-mail: psa@ngc.42.mchs.gov.ru, ORCID: 0009-0000-6849-0219

Лукашов Олег Юрьевич, кандидат физико-математических наук, директор, ООО «ШАХТЭКСПЕРТ-Системы»; Кемеровская область – Кузбасс, г. Кемерово, пр-т Октябрьский, 4; e-mail: mail@minesoft.ru, ORCID: 0009-0006-6205-3142

Кубрин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, ученый секретарь, «ИПКОН РАН»; e-mail: s_kubrin@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0490-9065

AN EXPERIMENTAL SYSTEM FOR TELEMETRY AND DATA PROCESSING IN THE STUDY OF HIGH-SPEED SHOCK WAVE PROPAGATION PROCESSES

**Govorukhin Yu.M.^{1,2}, Nikolaev A.V.¹, Senkus Val.V.¹,
Petrov S.A.¹, Lukashov O.Yu.³, Kubrin S.S.²**

¹*National Mine Rescue Center, Novokuznetsk*

²*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow*

³*SHAKHTEXPERT-Systems LLC, Novokuznetsk*

Work has been completed to create an experimental system for telemetry and processing of air shock wave propagation data in physical modeling. The constituent elements of such a system are proposed: physical and technical components, as well as a methodological framework. Implementation solutions are provided for each of these components (sensors and their placement, compressor, microcontroller, software, etc.). An experimental pneumatic tube mockup rig was developed to test and validate the telemetry and data processing system's operability. The rig is mounted on rigidly fixed laboratory benches with stainless steel tabletops, using clamps to secure the tube components. This reduced the influence of structural vibrations on sensor readings during disturbance propagation. To minimize the effect of static voltage on the flow of sensor data (interference), the tube and laboratory tabletops are grounded. A series of experiments were conducted on compression wave propagation along a straight section of the tube and on the same section with a simulated explosion-proof bulkhead installed. The obtained data are compared with the results of numerical simulations performed using the OpenFOAM package. Suggestions for improving the experimental setup (the physical component of the system) are presented. A design scheme for a pneumatic setup for shock wave studies has been developed. Directions for further work and research are outlined.

Keywords: *explosions, shock wave, pressure wave, experimental system, pneumatic tube, engineering facility, entries, coal mine*

*Поступила в редакцию: 22.03.2026
Принята к публикации: 16.06.2026*