

СНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН В ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Н.Н. Налисько, ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», Украина

В.В. Соболев, Л.И. Барташевская, НТУ «Днепропетровская политехника», Украина

В работе приведены результаты разработки и исследования способов гашения ударных воздушных волн в подземных сооружениях при условии сохранения технологического сечения выработок за счет объемно-планировочных и топологических решений. Показаны причины низкой эффективности применявшихся ранее способов, в том числе расширительных камер. Для эффективного гашения сильных ударных воздушных волн необходимо применять серию коротких волногасительных камер, которые существенно повышают волновое сопротивление канала за счет многократного отражения части фронта ударной волны на поверхностях камеры. На выходе из системы волногасительных камер ударная воздушная волна трансформируется в дозвуковую волну сжатия, с понижением амплитуды давления во фронте волны на 50-80 %.

При проектировании и эксплуатации подземных сооружений подверженных действию внутренних взрывов особое значение приобретают способы и методы их защиты. Во многих отношениях тяжесть последствий газовых взрывов будет определяться степенью локализации поражающих факторов и в первую очередь ударной воздушной волны (УВВ). Для минимизации последствий взрывов в конструкциях сооружений необходимо предусматривать как элементы защиты от взрывных нагрузок так и элементы гашения воздушных ударных волн. Особенно это актуально для сооружений гражданской обороны и подземных сооружений шахт и рудников опасных по выделению взрывчатых газов.

Актуальность работ в этом направлении обуславливается также тем, что строительство и эксплуатация сооружений различного класса должна основываться на результатах детального изучения возможных видов нагрузок, поиска эффективных путей их уменьшения и использовать экономически выгодные схемы защиты [1]. В настоящее время нормативные методики по расчету динамических нагрузок в строительной области [2] и горнодобывающей промышленности [3] основываются на квазистатическом подходе, основные зависимости которого были получены путем обработки экспериментальных данных.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы активного рассеивания УВВ в сооружениях гражданской обороны изучались с самого начала образования институтов военно-промышленного комплекса [4]. В области подземной разработки горючих полезных ископаемых исследование проблем защиты от УВВ при аварийных взрывах широко представлена в работах зарубежных научных центров [5], Донецкого и Карагандинского отделения ВНИИГД [6]. Для условий массовых взрывов при отбойке руды, результаты исследований распространения ударной волны в выработках рудников отражены в работах проф. А.А. Гурина (Криворожский национальный университет). В них предложены решения по гашению ударных воздушных волн путем установки заградительных жестких или податливых перфорированных конструкций. В этой же области основные исследования проводились и отражены в работах специализированного научного центра АО «ЦНИИПромзданий» [7] и работах МГСУ [8].

Выделение нерешенной части проблемы. Несмотря на значительный объем исследований, вопрос о способах и схемах гашения воздушных ударных волн в протяженных каналах полностью не исследован. В руководящих документах по проектированию специальных сооружений [7] практически отсутствуют решения по гашению УВВ и рассеиванию ее энергии за счет конструктивных и планировочных решений сооружения, кроме легкобрасываемых конструкций. Такие решения могут повысить безопасность персонала и будут являться экономически выгодными способами локализации взрыва.

Цель. Разработка и исследование схем гашения ударных воздушных волн при условии сохранения технологического сечения выработок в подземных сооружениях за счет объемно-планировочных и топологических решений.

Изложение основного материала. На сегодняшний день последними исследованиями опубликованными по рассматриваемой тематике, являются работы выполненные в МСГУ [8]. Исследования по затеканию и распространению ударных воздушных волн рассматривались в условиях протяженных сооружений гражданской обороны. В работах, в т.ч. предложены и исследованы схемы гашения взрывных волн заужением канала и дополнительных сооружений в канале в виде перфорированного экрана, пережатого сечения, диафрагмы, диффузора, и т.п. (рис. 1).

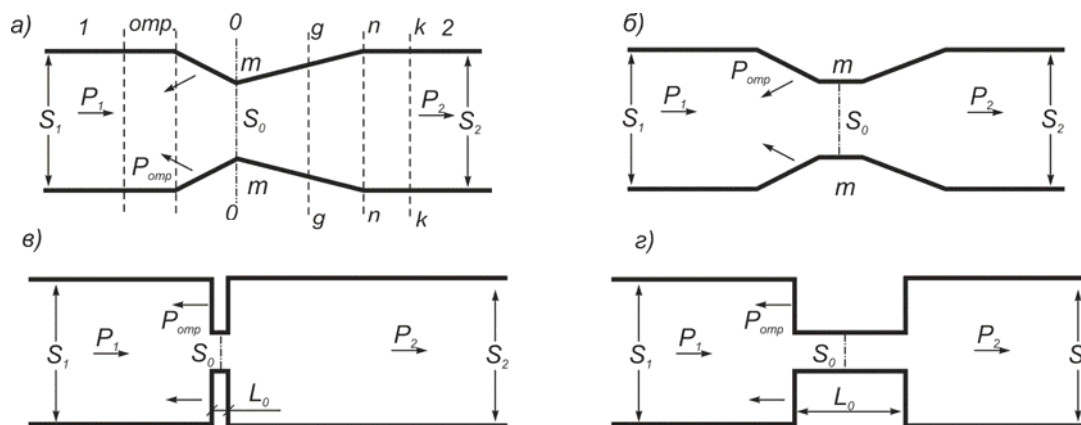


Рис. 1. Схемы гашения ударных воздушных волн заужением канала:

- а) диффузор+диафрагма; б) диффузор+пережатое сечение;
- в) диафрагма; г) диафрагма+пережатое сечение

В данной одномерной схеме взаимодействия ударной волны с местным сужением канала возникают шесть областей газа (рис. 1а), характеризующихся давлением P , плотностью ρ и скоростью течения U . Для оценки параметров газового потока в этих областях в квазистатической постановке задачи производится аналитическое решение системы девяти алгебраических уравнения динамической совместности параметров газового потока до и после плоскости разрыва (фронта ударной волны). Физическая модель процесса получена на основании двух моделей, характеризующих затекание ударной волны из широкого канала в узкий и далее из узкого канала в широкий. Полученное решение в виде системы уравнений устанавливает связь между P , U , ρ в зависимости от коэффициента скорости ψ для каждой области.

Решение данных уравнений относительно $\Delta P_2/\Delta P_1$ позволило авторам получить квазистационарное распределение параметров потока (рис. 2).

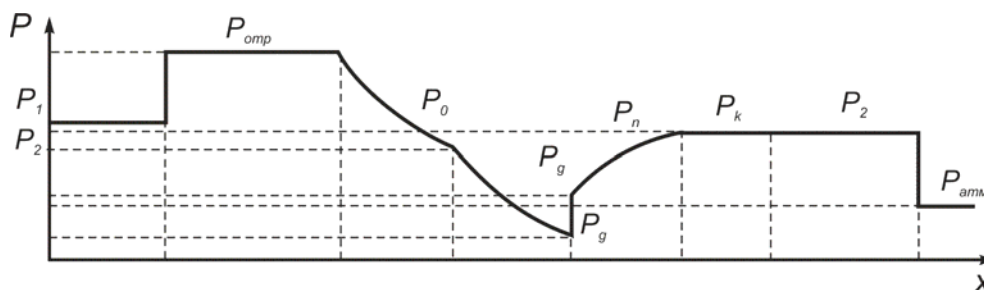


Рис. 2. Квазистационарное распределение давления в потоке для случая заужения диффузор + диафрагма

Как видно из графика, падение избыточного давления за заужением, в этом случае, незначительное из-за возникновения волн сжатия при косом отражении ударной волны на плоскости диффузора – область $omp.-0$ (рис. 1а). Давление оказываемое волной на плоскость

диффузора всегда больше давления во фронте этой волны. В зависимости от угла плоскости отражения, давление в проходящей волне может и превышать его значения в падающей за счет образования волны Маха (рис. 3б). Физически это объясняется тем, что скорость отраженной ударной волны больше, чем падающей, так как она проходит через газ, сжатый падающей ударной волной и при больших углах падения слабо тормозится потоком среды за фронтом набегающей ударной волны (составляющая скорости потока за фронтом набегающей ударной волны, параллельная направлению распространения отраженной ударной волны, как это видно из рис. 3а, равна $u_1 \cos(\varphi_0 + \varphi_2)$). Вследствие этого набегающая ударная волна будет встречать отраженную волну на некотором расстоянии от поверхности отражения. Через некоторое время после начала отражения отраженная и падающая волны сольются. Образуется новая ударная волна. Эта волна называется головной волной или волной Маха и создает давление, примерно вдвое большей, чем на фронте падающей волны. Волна Маха (головная волна) движется вдоль плоскости отражения, затекая за сужение канала (рис. 3).

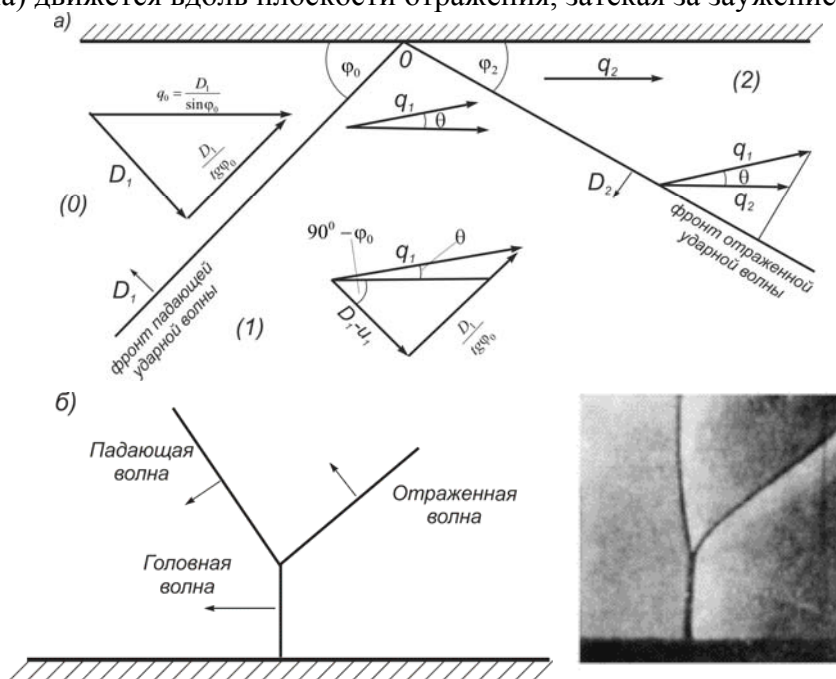


Рис. 3. Отражение ударной волны от жесткой стенки: а) регулярное; б) нерегулярное; схема и фото (К.Е. Губкин, ИХФ)

Другими словами, ударная воздушная волна имеет свойства, при определенных условиях трансформироваться путем концентрации энергии в более узкий и сжатый поток и затекать, перенося энергию через местные сопротивления огибая их. На этом свойстве ударных волн основано поражающее действие боеприпасов объемного и термобарического взрыва, которые успешно применяются для поражения противника в разветвленных канальных укрытиях: окопы, пещеры, штольни и др. Таким образом, схемы защиты 1а и 1б (рис. 1) по гашению ударной волны не работают.

Более эффективным в плане гашения ударных воздушных волн являются прямоугольные выступы (рис. 2в-г). Волны Маха в этом случае не образуются, а отраженная волна движется в обратном направлении. Однако с технологической точки зрения, для производственных сооружений, схемы с уменьшением сечения канала неприемлемо по условиям транспорта и вентиляции. Для исключения уменьшения сечения выработки в практике проектирования объектов гражданской обороны применялись расширительные камеры, которые были предложены еще в 50-х годах прошлого столетия. Наибольшее распространение получили камеры с особой конфигурацией (линейные размеры камеры кубической формы значительно больше ширины канала) как демпферы скачков давления для защиты систем выхлопа и вентиляции дизельных установок от внешних ударных волн [8]. В работах К.П. Станюковича рассмотрен вариант применения аналогичных длинных расширительных камер в

протяженных каналах на линейных участках. Расчет эффективности гашения данного способа был рассмотрен с энергетической точки зрения как квазистатическая задача. Потеря давления во фронте взрывной волны рассматривалась как потеря энергии в потоке вещества, который движется в канале. Предполагалось, что на выходе из узкого канала в широкий ударная волна деформируется и на некотором расстоянии снова становится квазистационарной (рис. 4).

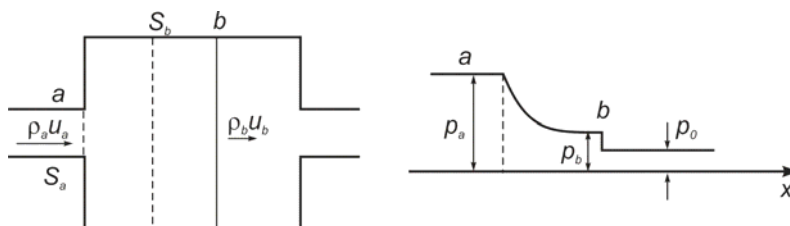


Рис. 4. Схема существующего решения гашения ударной воздушной волны в расширительной камере

Это предположение давало возможность связать течение в области узкого и широкого канала уравнением сохранения количества вещества:

$$\rho_a \cdot u_a \cdot S_a = \rho_b \cdot u_b \cdot S_b. \quad (1)$$

Истечение газа из узкого канала в широкий происходит адиабатически, поэтому можно записать:

$$\frac{p_b}{p_a} = \left(\frac{\rho_b}{\rho_a} \right)^k.$$

В итоге была получена неявная зависимость, которая показывала, что избыточное давление в проходящей волне, при прочих равных, зависит только от соотношения сечений каналов:

$$\frac{u_a}{u_b} \left(\frac{p_a}{p_b} \right)^{\frac{1}{k}} = \frac{S_b}{S_a}.$$

В работе [9] экспериментально показано, что приемлемая эффективность такой схемы расширительной камеры возможна при соотношении:

$$S_b/S_a \geq 12,5; \quad d_{p.к.} \geq \sqrt{12,5} \cdot d_k,$$

т.е. при приведенном диаметре $d_{p.к.}$ не менее $3,5d_k$ (диаметра входного канала). Если от приведенного диаметра перейти к реальной ширине выработки при той же ее высоте, то ширина разгрузочной камеры должна быть больше ширины входного канала в 5-7 (!) раз. При этом длина разгрузочной камеры $L_{p.к.}$ должна быть больше длины взрывной волны, что вытекает из уравнения (1), т.к. расчет опирается на закон сохранения количества и исходит из того, что энергия всей взрывной волны распределяется в объеме камеры. Учитывая, что при газовом взрыве ударная волна приводит в движение значительный объем воздушных масс, то длина камеры L_k должна составлять не менее 30 диаметров входного канала:

$$L_{p.к.} \gg L_k \text{ и } d_{p.к.} \gg d_k.$$

Такое соотношение размеров камер и каналов весьма не технологично для сооружений гражданской обороны и тем более для выработок горных предприятий. При меньшей ширине камеры, согласно экспериментальным данным, давление практически не уменьшалось, а в некоторых случаях наблюдались скачки давления выше начального. Такой эффект весьма логичен, т.к. при газовых взрывах резко возрастает давление в значительных объемах и для его снижения путем расширения необходимы дополнительные объемы в десятки раз больше начальных.

Все существующие способы гашения УВВ основаны только на двух физических принципах – создании прямого сопротивления фронта волны за счет расположения препятствий на пути

движения (сопротивление давления) и компенсационном расширении сжатого воздуха в расширительных камерах (рис. 5). Оба способа имеют значительные недостатки. Однако известно, что существует три вида сопротивления телу, которое движется в среде, это сопротивление формы, сопротивление трения и индуктивный (волновой) сопротивление. Последний возникает за счет расходования энергии на создание новых волновых фронтов при набегании потока среды на поверхность (рис. 5).

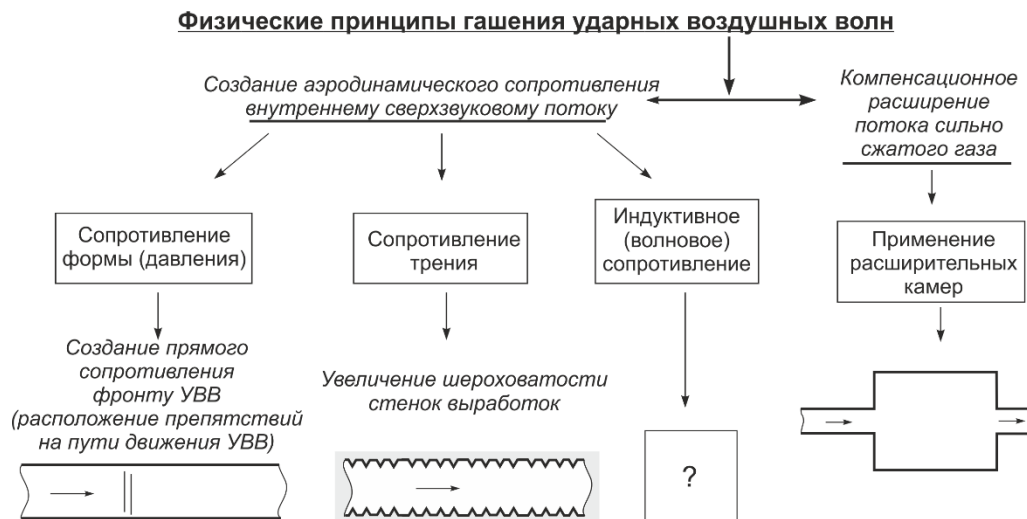


Рис. 5. Классификация способов гашения ударных воздушных волн по физическим принципам

В работе предлагается использовать индуктивное (волновое) сопротивление для гашения УВВ в выработках, совместно со свойствами УВВ затекать в дополнительные объемы. Для эффективного рассеивания энергии УВВ в этом случае предлагается использовать схему конфигурации канала включает в себя волноотражательные камеры с относительно небольшими размерами и с поверхностями отражения волны на плоских препятствиях (рис. 6). Это, собственно, канал с системой близко расположенных параллельных или чередующихся ниш. При таком расположении дополнительных объемов плоскости отражения находятся за периметром технологического сечения выработки и не создают препятствия в ее производственном использовании. Таким образом волновое сопротивление выработки сильно увеличивается за счет отражения УВВ на множествах поверхностях.

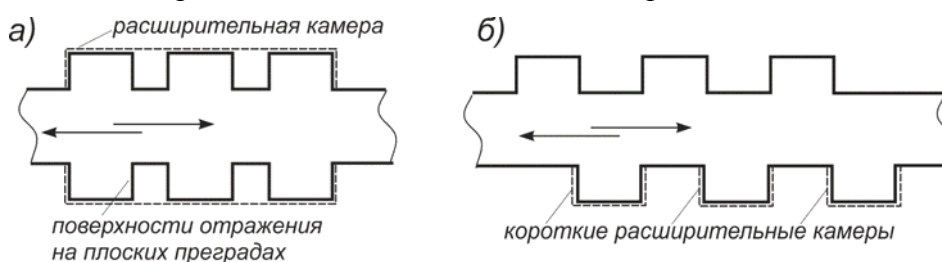


Рис. 6. Схемы конфигурации волногасительных камер малого приведенного диаметра:
а) симметричное расположение камер; б) несимметричное расположение камер;

Для исследования механизма гашения и обоснования рациональных параметров волногасительных камер рассмотрим отдельно следующие процессы [11]:

- выход ударной волны из канала;
- взаимодействие фронта ударной волны со стенкой камеры;
- движение нового фронта (отраженного + проходящего) вдоль стенки;
- взаимодействие нового фронта с замыкающей плоскостью расширительной камеры.

Первый процесс представляет собой сверхзвуковое обтекание двухгранного угла внешнего уступа [12]. При выходе фронта ударной воздушной волны через плоскость *a* в камеру (рис.

4) возникает нестационарный процесс дифракции фронта и определить его количественные параметры достаточно сложно. Аналитическое решение такой задачи, на сегодняшний день, отсутствует. Для оценки избыточного давления на фронте вблизи стенки камеры воспользуемся известным решением задачи о втекании газа в трубу со скачком сечения [13]:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1 \left[2k_1 \frac{k_2 - 1}{k_1 - 1} - (k_2 - 1)\alpha \right] - v_2(k_2 - 1)}{(k_2 + 1)v_2 - (k_2 - 1)v_1\alpha}, \quad (2)$$

где p_2, p_1 – давление на стенке камеры и во входном канале;

k_2, k_1 – показатель адиабаты газа в камере и канале, $k = c_p/c_v$;

v_2, v_1 – удельный объем газа в камере и канале, $v = 1/\rho$;

$\alpha = f_2/f_1$ – отношение сечений камеры и канала.

Для определения угла падения ударной волны на стенку камеры (который зависит от ее интенсивности) необходимо знать структуру течения. Такие течения достаточно хорошо изучены экспериментальными методами. Воспользуемся результатами работы [14]. Характерные черты структуры течения при прохождении обратного уступа ударной волной, а также ударно-волновые структуры, возникающие при дифракции ударной волны сильной интенсивности при внезапном изменении сечения плоского канала, показывает рис. 7.

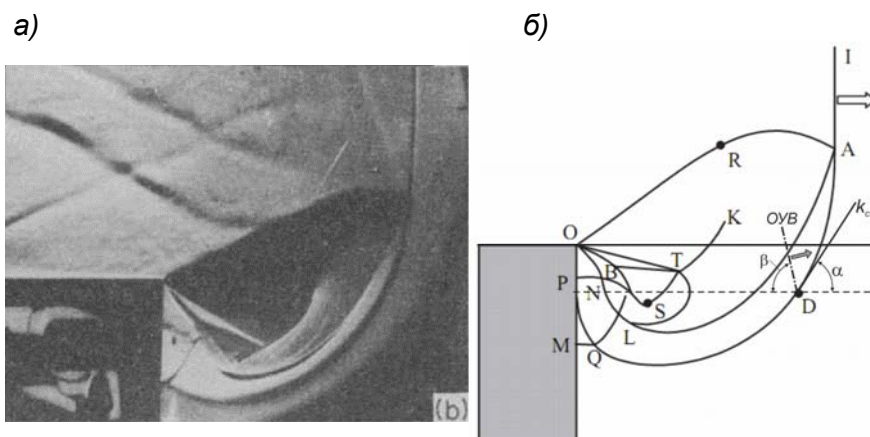


Рис. 7. Структура волновых фронтов при обтекании прямого угла:

- а) тепловое фото; б) схема течения при дифракции сильной ударной воздушной волны; IA – падающая ударная волна, AM – дифрагированная ударная волна, AO – отраженная акустическая волна, AL – контактная поверхность, TS – волна торможения, OS – линия отрыва, TB – косая ударная волна, TK – вторичный скачок, NP – пристеночный скачок, Q – тройная точка, R и D – точки искривления фронта [14]

Данная структура формируется в случае достаточной глубины обратного уступа $d_{p.к.} \gg d_{к.}$. В противном случае, $d_{p.к.} \approx 2d_{к.}$, дифрагированная ударная волна не формируется и деформация фронта входящей ударной волны ограничивается точкой D . В этом случае возникает косое отражение плоской ударной волны и формирование более сильной отраженной в сравнении с вариантом отражения дифрагированной волны AM . Последняя является сферической, и соответственно в ней рассеивание энергии УВ происходит более интенсивно. Касательная k_c в точке D к фронту определяет угол падения плоской ударной волны на стенку расширительной камеры (горизонтальный пунктир на рис. 7б). Величину угла определяем по результатам решения задачи отражения УВ от плоской преграды [10]. Угол отражения зависит от величины избыточного давления во фронте волны, которое оценим по формуле (2). Возникающее в этих условиях маховское отражение рассчитывается по специальному алгоритму решения системы уравнений записанных в форме Куранта-Фридрихса [10], согласно которому определяется угол отражения и скачек давления в отраженной и маховской волне:

$$\begin{cases} \frac{(\pi_2 - 1)t_2}{1 + \pi_2\mu^2 + (\pi_2 + \mu^2)t_2^2} = \Psi; \\ \Psi^2(1 - \mu^2)^2 \cdot (t_0 - t_2) + \Psi[(1 - \mu^2)^2 - \\ -(t_0 - t_2)^2 - (\mu^2 + t_0t_2)^2] - (t_0 - t_2) = 0; \end{cases}$$

$$\text{где } \pi = \frac{p_1}{p_0}, \quad t_0 = tg \varphi_0, \quad t_2 = tg \varphi_2, \quad \mu^2 = \frac{k-1}{k+1}.$$

По результатам расчета, для сильных ударных волн (например, $\Delta P=0,25$ МПа) угол находится в пределах $\alpha=50^\circ$, соответственно, угол отраженной волны (ОУВ) $\beta=77^\circ$. Скачек давления у стенки расширительной камеры который по величине вполне сопоставим с избыточным давлением фронта входящей волны. Таким образом, эффекта гашения в камерах малого диаметра ($d_{p.k.} \approx 2..3d_k$), за счет процесса расширения, не возникает. Видимый эффект образуется при плоском отражении ударной волны на замыкающей поверхности камеры, когда часть потока отсекается на поверхности отражения. Это можно показать в аналитическом решении задачи отражения взрывной волны от плоской преграды (впервые решении задачи приведено С.В. Измайловым). В уравнении расчета давления на фронте отраженной волны (3) второй член правой части уравнения определяет прирост давления за счет торможения потока газа, ранее двигавшегося за фронтом падающей волны [10]:

$$p_2 = p_1 + \frac{2k \cdot p_1(p_1 - p_0)}{(k-1)p_1} + (k+1)p_0 \quad (3)$$

Из уравнения следует, что начальные параметры отраженной волны определяются только параметрами падающей ударной волны и показателем адиабаты газа. Таким образом, наиболее эффективные конфигурации волноотражательных камер малого диаметра для гашения ударной волны будут такими, которые содержат значительные площади поверхностей плоского отражения по отношению к сечения канала, что реализуется в предлагаемых схемах (рис. 6). Обоснование эффективности таких схем проведем путем математического моделирования. Для решения поставленной задачи применим метод конечных объемов, который реализован в системе математического моделирования движения жидкости и газа FlowVision.

Рассмотрим вариант распространения ударной воздушной волны вдоль канала с камерами малого приведенного диаметра, прямоугольной формы. Для разбиения области расчета расчетной сеткой применим прямоугольную адаптивную локально измельченную сетку (рис. 8). Моделирование ударной воздушной волны производилось источником теплового взрыва который находился перед системой расширительных камер на расстоянии достаточном для формирования плоского фронта волны. Численный эксперимент проводился в диапазоне избыточного давления во фронте ударной воздушной волны, на входе в сопряжение изменялся от 0,1 до 2,0 МПа. В отличие от ранее проведенных исследований рассмотрим движение ударной волны вдоль обратного уступа непосредственно в крыле длиной расширительной камеры протяженного канала при $d_{в.к.}=2d_k$ (рис. 9). Поскольку задача является автомодельной по числу Рейнольдса, для ее универсальности проведено обезразмеривание геометрических параметров крыла камеры путем приведения их к ширине канала.

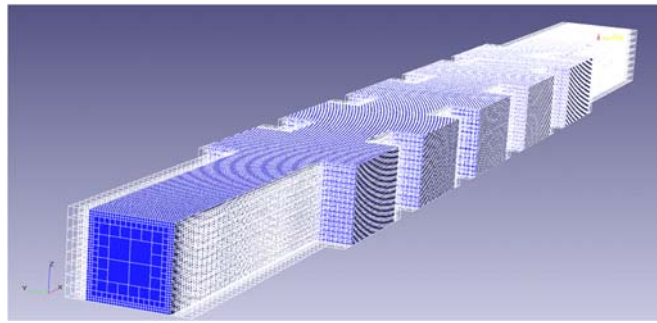


Рис. 8. Адаптивная сетка расчетной области с локальным измельчением третьего уровня вдоль стенок

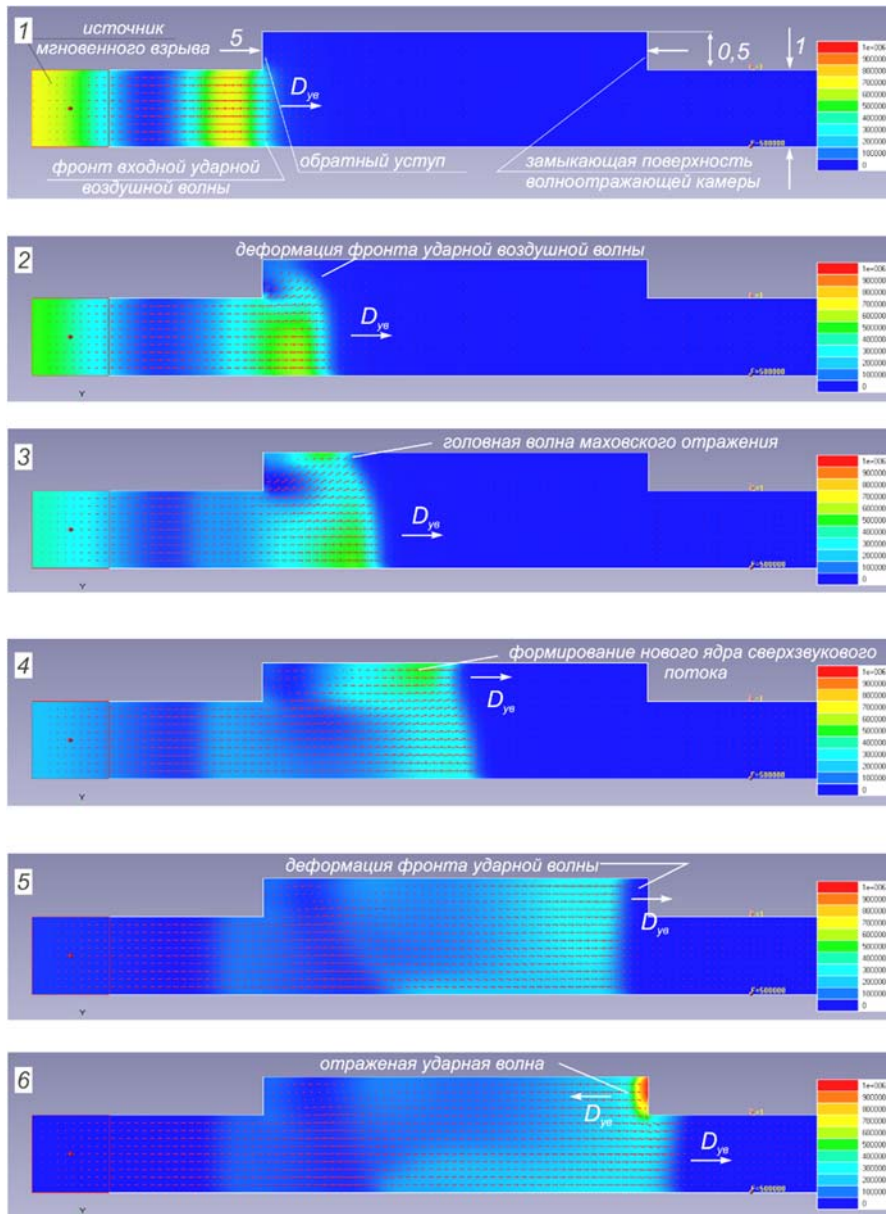


Рис. 9. Газодинамика движения ударной воздушной волны вдоль обратного уступа и стенки крыла длиной волноотражательной камеры (градиентное поле ΔP), для моментов времени 3,2; 4,1; 4,9; 6,7; 9,6; 10,7 мс

Численное моделирование показало все предполагаемые стадии при затекании волны в камеры малого диаметра, особенностью которого является возникновения маховского отражения плоской ударной волны (рис. 9-3), формирование нового ядра в котором происходит концентрация энергии ударной волны и рост избыточного давления (рис. 9-4).

Этот эффект не позволяет получить приемлемого уровня гашения в узких и длинных расширительных камерах. Очевидным решением этого вопроса является ограничение процесса затекания до момента возникновения косоого отражения, что возможно в коротких камерах (рис. 10).

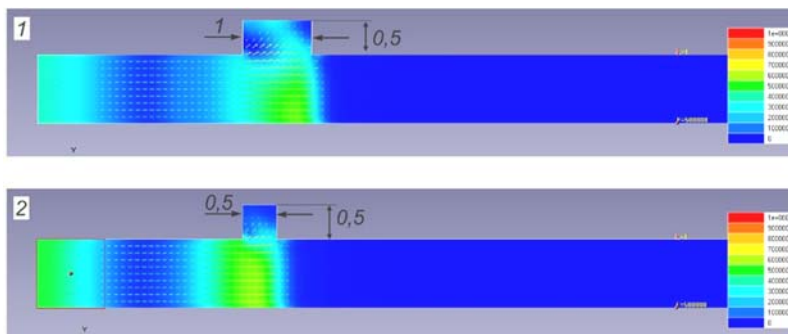


Рис. 10. Варианты затекания ударной волны в камерах с приведенной длиной 1,0 и 0,5 ширины канала

Оптимизация длины камеры сводится к отысканию ее минимально значения при которой ударная волна успевает полностью затекать до стенки камеры за время прихода фронта волны к замыкающей плоскости (рис. 10-1), т.е. время полного затекания $t_{зам.}$ должно равняться времени движения основного фронта t_0 к замыкающей плоскости:

$$t_{зам.} = t_0$$

В этом случае произойдет максимальное отсечение газового потока, в противном (рис. 10-2) затекания будет не полным, а эффективность отсечения потока снижается или не происходит.

Численный эксперимент показал, что за счет инерции движения сверхзвукового потока существует некоторое влияние величины избыточного давления во фронте волны на время полного затекания при прочих равных условиях. В результате оптимизации получен график $L_k = f(n, \Delta P)$, где $n = d_{в.к.}/d_k$ (рис. 11).

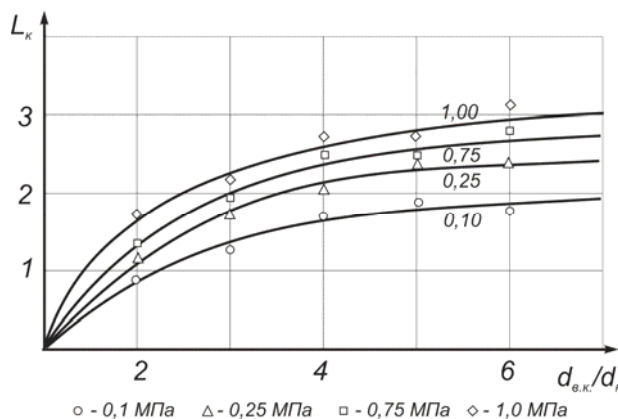


Рис. 11. Эффективная длина расширительной камеры

Для определения эффективности гашения газового потока в конкретных схемах конфигурации расширительных камер проведена серия сравнительных численных экспериментов. В них сопоставлялся силовой импульс ударной воздушной волны который возникает в канале при наличии и отсутствии исследуемых элементов рассеивания энергии (рис. 12). Базовый канал имеет идентичные характеристики с расчетным, точки съема параметров ударной волны находятся на входе перед расширительной камерой (точки A_1, B_1) и на некотором удалении от выхода из камеры (точки A_2, B_2) для исключения влияния пульсаций внутри камер, возникающих вследствие отражений и взаимодействия разрывов.

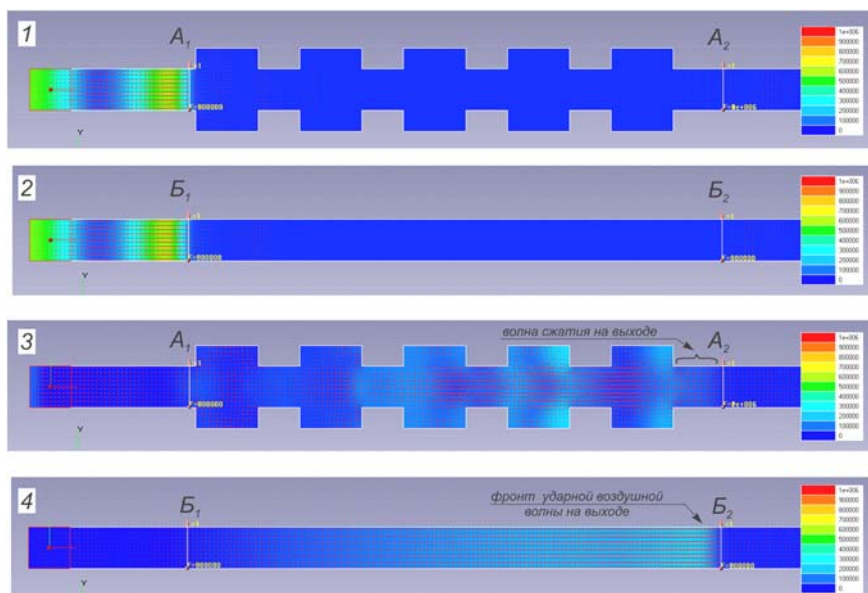


Рис. 12. Газодинамическая картина в ударной воздушной волне на входе (1) и выходе (3) из системы расширительных камер в сравнении с течением в базовом канале (2, 3) (градиентное поле ΔP)

Перед расширительной камерой импульсы ударной воздушной волны идентичны (рис. 12-1, 2, точки A_1 , B_1). При проходе через систему расширительных камер резко снижается длина и амплитуда волны, что видно на сравнительной градиентной картине рис. 12-3, 4, точки A_2 , B_2 . Конкретные значения параметров потока для системы из пяти отражающих плоскостей приведено на графике рис. 13.

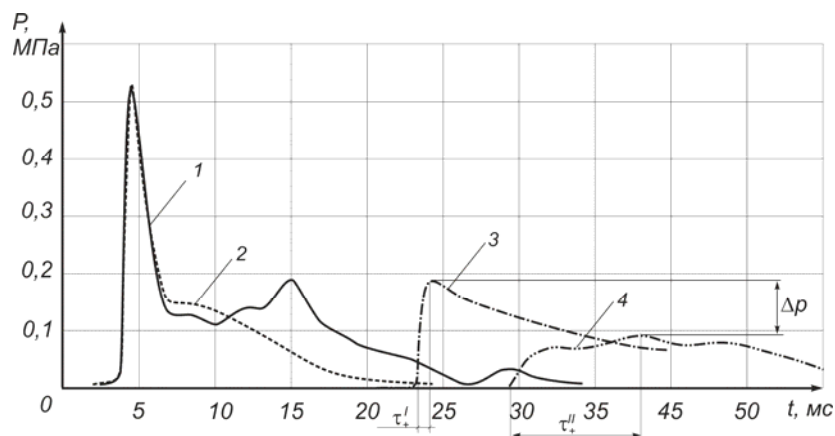


Рис. 13. Импульс ударной воздушной волны в точках входа (1, 2) и выхода (3, 4) в канале с камерами (1, 4) и без камер (2, 3).

В момент входа избыточное давление на фронте волны составляет $\Delta P = 0,52$ МПа, скорость фронта $D = 742$ м/с. На выходе, в базовом канале без камер гашения $0,18$ МПа и 453 м/с, в исследуемом $0,092$ МПа и 304 м/с, т.е. уменьшение амплитуды фронта Δp составило 51% . Более того, сверхзвуковой поток 3 базового канала имеющий ударную форму фронта трансформируется в дозвуковой поток волн сжатия 4 в котором нарастания давления происходит практически по синусоиде: $\tau_+^I \ll \tau_+^{II}$. Таким образом происходит не только количественная, но и качественная трансформация ударной волны в акустическую волну сжатия, которая оказывает существенно меньшее разрушающее действие.

Достоинство рассмотренной выше конфигурации канала является то, что проектное сечение на участках гашения не уменьшается. Однако в волногасительных камерах ширина канала увеличивается в двое, что создает дополнительные нагрузки на несущие конструкции свода камер и увеличивает горное давление на крепь в случае выработок горных предприятий.

Уменьшить ширину камер на 25 % можно расположив их ассиметрично по схеме рис. 6б. Однако в этой схеме был получен профиль силового импульса на выходе который имеет скачкообразное нарастание и соответствует форме фронта ударной волны, хотя и степень снижения амплитуды во соответствует предыдущему варианту (рис. 14).

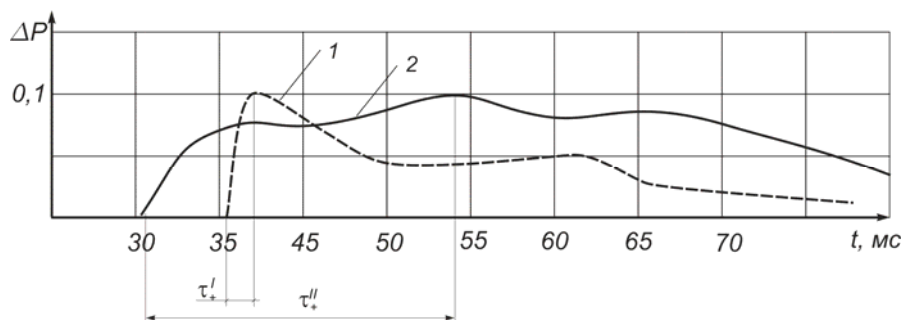


Рис. 14. Импульс ударной воздушной волны на выходе из системы из волногасительных камер с симметричным (1) и ассиметричным (2) расположением крыльев камеры

Это объясняется возникновением эффекта интерференции отраженных волн в симметричных камерах и формированию на небольшой период времени мощного обратного потока вызывающего волну разрежения, которая, в свою очередь движется за фронтом головной ударной волны, вызывая падения амплитуды последней (рис. 15-1..5) .

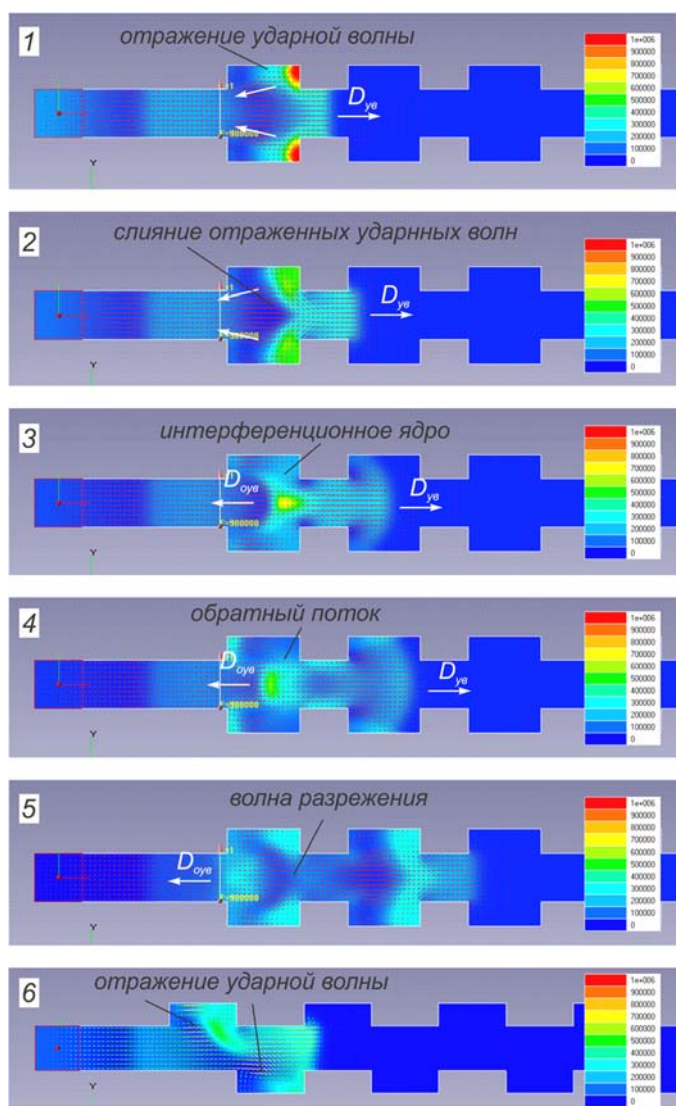


Рис. 15. Газодинамическая картина поля давления и интерференция отраженных ударных волн в симметричных (1-5) и ассиметричных камерах (6)

При асимметричном расположении крыльев камер такого эффекта не возникает (рис. 15-б), соответственно преобразование ударной волны в волну сжатия не происходит.

Таким образом, из рассмотренных конфигураций волногасительных камер вариант рис. 4а является наиболее рациональным по эффективности и технологичности. Для этого варианта в работе исследовано влияние количества расширительных камер в системе на эффективность гашения $\eta = f(n, \Delta P)$, где n – количество камер (рис. 16). В результате установлено, чем выше избыточное давление во фронте ударной волны тем более эффективно происходит ее гашение на отражательных поверхностях. Это связано с тем, что при высоких градиентах разрыва потока сильнее проявляются волновые свойства взрывной волны и соответственно работают законы геометрической оптики. При небольших градиентах больше проявляются свойства непрерывного потока, в котором местные сопротивления вызывают не отражения а местную турбулизацию и завихрения потока.

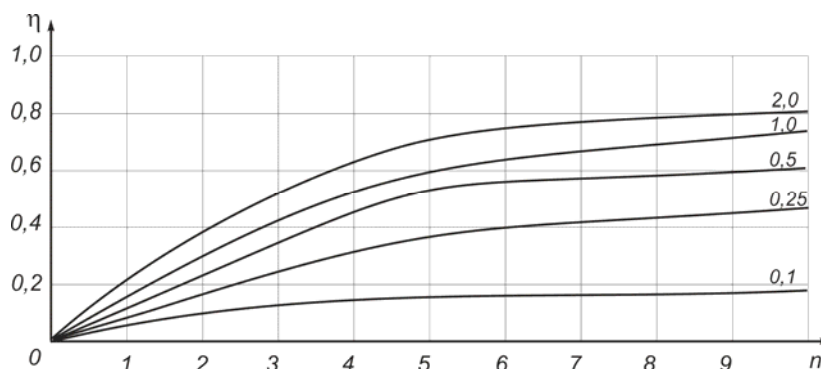


Рис. 16. Эффективность снижения амплитуды ударной воздушной волны

По этой причине, полностью погасить энергию ударной воздушной волны с помощью расширительных камер малого диаметра невозможно. Их задача существенно снизить амплитуду ударной воздушной волны за счет гашения ее волновой энергии, преобразовать ее в волну сжатия и таким образом повысить эффективность гашения в других элементах защитной системы. Поэтому их применение должно быть в комплексе с другими средствами гашения, например расширительной камерой большого диаметра

Таким образом применяя серию коротких расширительных камер малого диаметра мы увеличиваем волновое сопротивление канала в противовес аналогичным задачам обратного действия решаемых в аэродинамике крыла и гидродинамики обтекания корпуса судна. В нашем случае мы увеличиваем волновое сопротивление канала, которое, в сверхзвуковых потоках, в несколько раз превышает сопротивление, связанное с трением и образованием вихрей.

Выводы. Проведенные исследования дают возможность обосновать параметры численного моделирования для исследования способов гашения ударных воздушных волн в протяженных сооружениях. Результаты численного эксперимента позволяют решить главную задачу: не снижая технологического сечения каналов и выработок найти эффективные схемы гашения ударных воздушных волн и установить рациональные параметры применяемых для этого волногасительных камер малого диаметра.

Список литературы

1. Состояние техники безопасности и эффективности функционирования противоаварийной защиты угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Фичев, И.А. Ященко [и др.]. – Днепропетровск: ООО «Норд-Компьютер», 2005. – 266 с;
2. СНиП 2.01.54-84 Защитные сооружения гражданской обороны в подземных горных выработках / Минземстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1998. – 20 с.
3. ДНАОП 1.1.30–4.01.97 Статут ДВГРС по організації і веденню гірничорятувальних робіт. – Київ: Мінвуглепром, 1997. – 445 с.

4. Фролов С.М. Эффективность ослабления ударных волн в каналах различными способами / С.М. Фролов // Физика горения и взрыва.– 1993.– № 1.– С. 34-39.
5. Zhou A., Wang K. and Wu Z. (2014) Propagation law of shock waves and gas flow in cross roadway caused by coal and gas outburst. International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 24, pp. 23-29.
6. Греков С.П. Расчет коэффициентов затухания воздушных ударных волн в горных выработках шахт/ С.П. Греков, И.Н. Зинченко// Горноспасательное дело.– 2012.– Вып. 49.– С. 10-14;
7. Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок.– М.: АО «ЦНИИПромзданий», 2000 г.– 122 с;
8. Мишуев А.В. Воздушная ударная волна в сооружениях / А.В. Мишуев.– М.: МГСУ, 2015.– 408 с;
9. Рябинин Ю.Н. О затухании ударных волн, распространяющихся в каналах / Ю.Н. Рябинин, В.Н. Радионов // Физика взрыва : Сборник экспериментальных и научно-исследовательских работ в области физики взрыва.– М.: ИХФ, 1955.– № 3.– С. 33-58.
10. Физика взрыва /Под ред. Л.П. Орленко.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.– 832 с.
11. Кратова Ю.В. Режимы распространения плоской детонации в газовзвесьях в каналах с разрывом сечения / Ю.В. Кратова, А.В. Федоров, В.М. Фомин, Т.А. Хмель // Физико-химическая кинетика в газовой динамике.–2010.– Т. 9.– С. 1-8.
12. Булат П.В. Численное моделирование дифракции ударной волны на прямом угле на неструктурированных сетках / П.В. Булат, К.Н. Волков //Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.– 2016.– Т. 16.– №2.– С. 354-362.
13. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды / К.П. Станюкович.– М.: Наука, 1971.– 854 с.
14. Баженова Т.В. Нестационарное взаимодействие ударных волн / Т.В. Баженова, Л.Г. Гвоздева.– Москва: Наука, 1977. 274 с.