

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ГАШЕНИЯ ВОЛН ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ

А. А. Васильев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, gasdet@hydro.nsc.ru
Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

С использованием законов сохранения предложены формулы для оценки условий гашения волн горения и детонации с помощью пылевых или водяных завес, позволяющие определить минимальные концентрации пыли или мелкораспыленной воды в завесе, а также минимальную протяженность завесы. Приведены конкретные данные об условиях гашения метановоздушной смеси, типичной для угольных шахт. Эти данные свидетельствуют, что рекомендованные нормативными документами РФ концентрации пыли и размеры завесы позволяют в лучшем случае погасить лишь волны низкоскоростного горения.

Ключевые слова: горение, детонация, гашение.

DOI 10.15372/FGV20200503

ВВЕДЕНИЕ

Уже с тех давних пор, когда уголь только начали добывать шахтным способом, возникла проблема взрывов метановых смесей при внесении в шахту источников освещения. К сожалению, и в наше время проблема борьбы с шахтными взрывами остается актуальной и очень важной, поскольку аварийные взрывы приводят к человеческим жертвам и разрушениям оборудования и самой шахты.

Если взрыв все же произошел, то можно ли остановить распространение взрывной волны? Известно много способов ослабления взрывной волны, например инъекция инертных газов (выход за концентрационные пределы), впрыск ингибиторов (химическое воздействие, см., например, работы В. В. Азатяна [1]), создание на пути волны пылевых или водяных завес и т. д.

Опубликованы сотни статей, в которых предприняты попытки моделировать шахтные взрывы в рамках моделей гетерогенных сред. К сожалению, известные численные расчеты описывают динамику ускорения пламени и ослабления взрывной волны при ее взаимодействии с пылевыми завесами лишь на качественном уровне. Результаты расчетов заметно отличаются от динамических параметров реальных взрывных волн (например, по необходимой для гашения концентрации пыли и длине пылевого

облака вдоль штрека).

В данной статье, в отличие от предыдущих работ, предпринята попытка оценить не частичное ослабление взрывных волн, а сосредоточить внимание на критериях полного их гашения, представлены простейшие оценки на примере метановоздушных смесей.

ГАШЕНИЕ ВОЛН ГОРЕНИЯ ПЫЛЕВОЙ ЗАВЕСОЙ

Известно, что предельными режимами распространения являются низкоскоростной (см/с) режим ламинарного горения и сверхзвуковой (км/с) режим детонации. Рассмотрим по отдельности результаты подавления этих волн при взаимодействии с пылевыми и водяными завесами.

Поскольку минимальная энергия зажигания метановоздушных смесей характеризуется величиной порядка 0.3 мДж [2] (рис. 1), а критическая энергия инициирования детонации — порядка 10^8 Дж (17 кг взрывчатого вещества), то аварийная ситуация в шахте всегда развивается из низкоскоростного горения.

В свою очередь, типичные скорости ламинарного пламени (≈ 0.4 м/с для стехиометрической смеси метан — воздух [2], см. рис. 2) примерно на два-три порядка меньше скорости звука исходной смеси (≈ 350 м/с), потому числа Маха волны горения имеют порядок 10^{-3} и конечное состояние продуктов такого горения практически не отличается от случая сгорания смеси, когда давление продуктов не меняется в результате химической реакции (это

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГиЛ СО РАН.

© Васильев А. А., 2020.

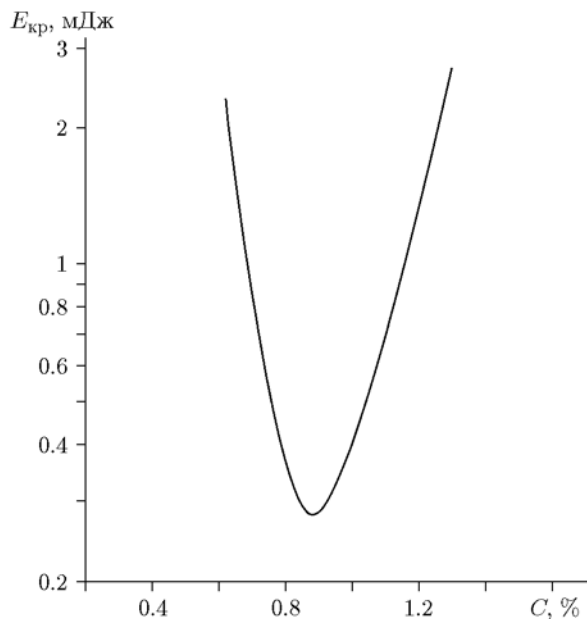


Рис. 1. Критическая энергия зажигания метановоздушных смесей в зависимости от объемной концентрации метана (из [2])

наиболее вероятно для начальной стадии воспламенения метановоздушной смеси). Поэтому для оценок условий гашения пламени можно предположить, что процесс расширения происходит очень медленно и вся химическая энергия трансформируется в тепловую, без кинетической составляющей.

Возьмем объем горючей смеси V_0 , тогда запас химической энергии смеси равен произведению массы смеси на удельное энерговыделение: $E = \rho_0 V_0 q$ (размерность энергии E — кал или Дж, плотности ρ — $\text{кг}/\text{м}^3$, энерговыделения q — $\text{кал}/\text{кг}$ или $\text{Дж}/\text{кг}$). Будем считать, что для топливно-воздушных смесей молекулярная масса продуктов реакции μ незначительно отличается от молекулярной массы исходной смеси μ_0 . Потому сгорание смеси в режиме $P = \text{const} = P_0$ с увеличением температуры продуктов должно приводить к пропорциональному уменьшению плотности смеси в соответствии с уравнением состояния идеального газа $P = \rho RT/\mu$ за счет расширения объема продуктов реакции. Рассматриваемая масса не меняется, потому $\rho_0 V_0 = \rho V = M_{gas}$. При этих представлениях в конечном состоянии объем нагретых продуктов реакции будет превышать начальный объем во столько раз, во сколько температура продуктов превышает начальную температуру смеси.

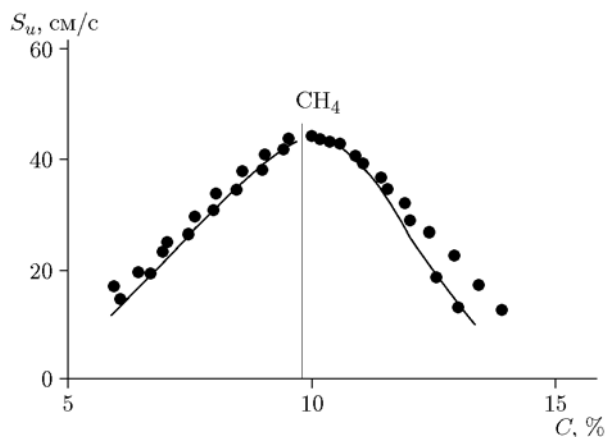


Рис. 2. Скорость нормального пламени метановоздушных смесей в зависимости от объемной концентрации метана (из [2])

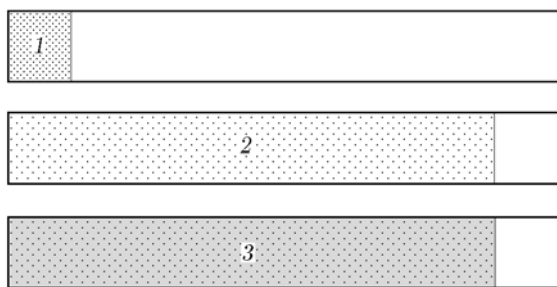


Рис. 3. Идеализированная схема гашения низкоскоростного пламени:

1 — исходная горючая смесь, 2 — расширившиеся продукты сгорания в режиме $P = \text{const} = P_0$, 3 — продукты реакции совместно с пылевыми (или водными) частицами

Из такого представления легко формулируется условие гашения: в такой объем нагретых продуктов необходимо внести столько мелкодисперсных пылевых частиц суммарной массой M_{pow} , чтобы они при нагревании забрали на себя почти всю тепловую энергию продуктов (см. рис. 3). Чтобы исключить возможность воспламенения свежей смеси за пылевым облаком, следует ограничить нагрев пылевых частиц температурой, равной температуре вспышки смеси T_{ign} . Это условие запишется в следующем виде:

$$M_{gas}q = M_{pow}c_p(T_{ign} - T_0),$$

откуда

$$M_{pow}/M_{gas} = q/[c_p(T_{ign} - T_0)]. \quad (1)$$

Для метановоздушных смесей при режиме сгорания $P = \text{const} = P_0$ энерговыделение

составляет $q = 625$ кал/г (для стехиометрии), температура вспышки $T_{ign} = 460$ К, удельная теплоемкость для традиционно используемых пылей $c_p \approx 0.25$ кал/(г·К) [3], тогда для стехиометрической смеси из (1) получаем

$$M_{pow}/M_{gas} \approx 625/[0.25(460 - 300)] \approx 15.6.$$

Конечное состояние продуктов горения стехиометрической смеси в режиме $P = \text{const}$ характеризуется температурой $T_p = 2224$ К, молекулярной массой $\mu_p = 27.43$ г/моль ($\mu_0 = 27.64$ г/моль), плотностью $\rho_p/\rho_0 = (T_0/T_p) \cdot \mu/\mu_0 \approx 0.15$. Тогда $\rho_p \equiv \rho_{gas} \approx 0.15\rho_0 \approx 0.15 \cdot 1.1295 \approx 0.169$ кг/м³ и $\rho_{pow} \approx 15.6\rho_{gas} \approx 2.6$ кг/м³.

Если в штреке постоянного сечения характерный размер исходной горючей смеси (см. 1 на рис. 3) обозначить L_0 , то размер пылевого облака (3 на рис. 3) $L = L_0(\rho_0/\rho) \approx (1.13/0.17)L_0 \approx 6.6L_0$. Если размер облака исходной смеси выражать в диаметрах штрека d ($L_0 = nd$), то $L = 6.6nd$!

Чем больше размер облака исходной горючей смеси, тем больше должна быть длина пылевой завесы для гашения аварийного возгорания этой смеси.

Следует еще раз подчеркнуть, что при меньших соотношениях масс и плотностей пылевой завесы относительно исходной смеси температура продуктов реакции будет превышать температуру воспламенения смеси, т. е. завеса не выполнит основного своего предназначения — полного гашения очага возгорания — и горючая смесь за завесой может вновь воспламениться и повторить сценарий развития взрыва. Например, если в качестве граничной температуры взять более высокую температуру самовоспламенения 810 К, то $M_{pow}/M_{gas} \approx 625/[0.25(810 - 300)] \approx 4.9$, или $\rho_{pow} \approx 4.9\rho_{gas} \approx 0.83$ кг/м³. Кажущийся «выигрыш» по плотности (в три раза) многократно увеличивает вероятность самовоспламенения смеси и повторного развития взрыва за завесой.

ГАШЕНИЕ ВОЛН ГОРЕНИЯ ВОДЯНОЙ ЗАВЕСОЙ

Если вместо пыли использовать мелкораспыленную воду, то уравнение теплового баланса будет включать в себя нагрев воды до температуры кипения, фазовый переход жидкости в пар и последующий разогрев пара до температуры воспламенения:

$$M_{gas}q = M_{lq}(c_p)_{lq}(T_{vap} - T_0) + M_{lq}\lambda + M_{lq}(c_p)_{vap}(T_{ign} - T_{vap}).$$

Здесь M_{lq} — масса воды в завесе, $(c_p)_{lq} = 1$ кал/(г·К) — удельная теплоемкость воды, $T_{vap} = 373$ К — температура кипения воды, $\lambda \approx 540$ кал/г — удельная теплота парообразования, $(c_p)_{vap} \approx 0.51$ кал/(г·К) — удельная теплоемкость водяного пара (при температуре 373 К; при нагреве до 460 К теплоемкость возрастает до 0.68 кал/(г·К) [3]). Из последнего уравнения получаем

$$\begin{aligned} \frac{M_{lq}}{M_{gas}} &= \\ &= \frac{q}{(c_p)_{lq}(T_{vap} - T_0) + \lambda + (c_p)_{vap}(T_{ign} - T_{vap})} \approx \\ &\approx \frac{650}{75 + 540 + 0.6 \cdot 87} \approx 1, \quad (2) \end{aligned}$$

т. е. примерно одинаковую массу воды и горючей смеси, $\rho_{lq} \approx 0.17$ кг/м³. За короткое время взаимодействия продуктов горения с каплями воды трудно ожидать, что они успеют испариться и нагреться, потому если исключить фазовый переход вода → пар и последующий нагрев пара, то

$$\begin{aligned} \frac{M_{lq}}{M_{gas}} &\approx \\ &\approx \frac{q}{(c_p)_{lq}(T_{vap} - T_0)} \approx \frac{650}{75} \approx 8.7, \quad (3) \end{aligned}$$

т. е. требуется почти на порядок большая величина — $\rho_{lq} \approx 1.5$ кг/м³. Если воду не нагревать до кипятка, то ее количество должно быть увеличено (например, при нагреве до относительно безопасной для человека температуры 50 °С нужно утроить количество воды до значения $\rho_{lq} \approx 4.5$ кг/м³).

Следует особо подчеркнуть, что вышеприведенная оценка относится к «очень медленно» горению, когда движением газа и его кинетической энергией можно пренебречь. Другими словами, приведенная оценка дает минимальные концентрации, которые смогут обеспечить гашение волны медленного горения. Любые устройства, где эти величины окажутся меньше, не будут эффективными, они обеспечат

лишь частичное ослабление волны, и тем меньшее, чем заметнее параметры установок будут отличаться от приведенных величин, полученных на основании закона сохранения энергии.

ГАШЕНИЕ ВОЛН ДЕТОНАЦИИ

Для другого предельного режима распространения — детонационной волны (ДВ) — уравнение энергии в системе фронта записывается в виде

$$\frac{c_0^2}{\gamma_0 - 1} + \frac{D_0^2}{2} + q = \frac{c^2}{\gamma - 1} + \frac{(D_0 - u)^2}{2},$$

где c_0 — скорость звука, D — скорость ДВ, u — массовая скорость потока, γ — показатель адиабаты.

Обратим внимание, что такая запись справедлива для одностороннего движения ДВ вдоль бесконечно длинной трубы. Если ДВ распространяется в обе стороны вдоль трубы, то задача об одностороннем движении волны заменяется задачей о распространении ДВ от жесткой стенки, расположенной в плоскости инициирования [4–8]. Но тогда при переходе из неподвижной системы координат в движущуюся систему фронта ДВ следует учитывать, что в системе фронта ДВ стенка должна двигаться в сторону, противоположную распространению ДВ, причем со скоростью D_0 . Это означает, что такая стенка, как поршень, обязательно создаст волну разрежения, которая начнет двигаться вслед за ДВ. Это приведет к тому, что в области от стенки до некоторой плоскости в зоне реакции ДВ параметры газа будут переменными по пространству и времени. Идеализированная схема профиля такой ДВ представлена на рис. 4.

Для оценки условий гашения ДВ можно предположить, что вся химическая энергия смеси будет затрачена на кинетическую энергию, а внутренняя энергия меняться не будет. Тогда из классического соотношения между энергией и импульсом $E = p^2/2M_{gas} = M_{gas}q$ импульс ДВ определяется следующим



Рис. 4. Схема входа детонационной волны с переменными параметрами за ее фронтом в пылевое облако 3

образом: $p = \sqrt{2M_{gas}E} = \sqrt{2M_{gas}^2q} \approx \sqrt{2M_{gas}^2D_0^2/[2(\gamma^2 - 1)]} \approx M_{gas}D_0/\sqrt{(\gamma^2 - 1)}$. При преобладании в продуктах двухатомных молекул (воздушные смеси) $p \approx M_{gas}D_0$, т. е. импульс ДВ примерно равен массе исходной смеси, умноженной на скорость ДВ. Этот несколько неожиданный результат (вместо массовой скорости частиц выступает волновая скорость ДВ) позволяет заменить реальное взаимодействие продуктов детонации с пылевым облаком взаимодействием материальных частиц.

Рассмотрим подавление скоростного напора ДВ, представив движущийся за ДВ газ в виде «частицы» с известным импульсом $I \equiv p_0$, налетающей на первоначально покоящуюся «пылевую частицу». В одномерной постановке (соударение «частиц», движущихся вдоль единой оси) закон сохранения импульса после взаимодействия с завесой запишется в виде

$$p_0 = p_1 + p_2, \quad (4)$$

здесь p_1 — импульс заторможенных в запыленном облаке продуктов газовой детонации, p_2 — импульс частиц завесы после взаимодействия с продуктами ДВ. Упругое соударение «частиц» приводит к сохранению кинетической энергии

$$p_0^2/2M_{gas} = p_1^2/2M_{gas} + p_2^2/2M_{pow}. \quad (5)$$

Подставляя из (4)

$$p_1 = p_0 - p_2$$

в уравнение (5), после преобразований получаем

$$p_2 = 2p_0/(1 + M_{gas}/M_{pow}) \quad (6)$$

(второй корень $p_2 = 0$ отбрасывается как не представляющий интереса — отсутствие взаимодействия). Какое значение импульса p_2 следует подставить в последнюю формулу для определения соотношения масс газа и завесы? Еще раз подчеркнем, что основная задача — максимально ослабить импульс продуктов детонации и в то же время не превратить завесу в поршень-инициатор, способный воспламенить новую порцию смеси за пылевой завесой.

С позиций проблемы воспламенения в качестве критерия следует выбирать следующее: завеса как поршень может безопасно двигаться с такой скоростью, чтобы создаваемая

k	3	1.67	1.4	1.3	1.22	1
ξ	0.865	0.839	0.825	0.818	0.816	0.796
ξ_1	1.5	1.405	1.365	1.345	—	1.27
ξ_2	1.39	1.37	1.32	1.272	—	1.27

этим поршнем ударная волна не смогла нагреть смесь до температуры воспламенения, причем — в первую очередь — при отражении волны от препятствий. Для метановоздушной смеси стехиометрического состава температура смеси при отражении волны от жесткой стенки достигает температуры воспламенения при числе Маха ударной волны $M_* = w/c_0 = 1.45$ (w — скорость падающей ударной волны). При этом массовая скорость потока (скорость «поршня») $u_2 \approx 0.46w \approx 0.67c_0$, а его импульс $p_2 \approx 0.67M_{pow}c_0 = \delta M_{pow}c_0$. В [7] для импульса волны, образующейся при истечении в вакуум, приведена формула $I = \xi\sqrt{2M_0E_0}$ (M_0 — масса исходной смеси, кг, E_0 — полная энтальпия смеси, Дж = кг · м²/с², I — кг · м/с) и рассчитаны коэффициенты ξ при разных показателях адиабаты [7, с. 188] (см. приведенную здесь таблицу из [7], 1-ю и 2-ю строки). В [7] рассмотрена также задача об импульсе волны, получающейся при распаде области продуктов детонации при мгновенном взрыве в объеме ($V = \text{const} = V_0$), с другой формулой для импульса — $I = \sqrt{\xi_j M_0 E_0}$, данные представлены в 3-й строке таблицы. В 4-й строке представлены коэффициенты для задачи об импульсе ДВ исходя из последней формулы (данные во 2-й и 4-й строках идентичны, поскольку $2\xi^2 = \xi_2$).

Записав с учетом вышесказанного импульс ДВ для смеси метан — воздух $p_0 \approx M_{gas}D_0\sqrt{1.345/2} \approx 0.82M_{gas}D_0 = \beta M_{gas}D_0$, получим после преобразования (6) следующее соотношение масс, приводящее к гашению импульса взрывной волны ($M_0 \approx 5.09$):

$$\frac{M_{pow}}{M_{gas}} = \frac{2M_0\beta}{\delta} - 1 = \frac{2 \cdot 5.09 \cdot 0.82}{0.67} - 1 \approx 11.5. \quad (7)$$

Если опять же обозначить характерные размеры исходной горючей смеси (см. 1 на рис. 3) и пылевого облака (см. 3 на рис. 4) как L_0 и L соответственно, то из (7) получим $\rho_{pow} = 11.5\rho_{gas} \cdot L_0/L$. Если размер пылевого облака $L = L_0$, то $\rho_{pow} = 11.5\rho_{gas} \approx 11.5 \cdot 1.13 \approx$

13 кг/м³. Если размеры облака исходной смеси и пылевой завесы выражать в диаметрах штрека d ($L_0 = nd$ и $L = kd$), то уменьшить плотность пылевого облака можно за счет увеличения его протяженности: $\rho_{pow} = 11.5\rho_{gas}n/k$ и $k > n$. Если взять $k/n \approx 6.6$ (как в рассмотренном в начале статьи случае сгорания смеси в режиме $P = P_0 = \text{const}$), то $\rho_{pow} \approx 13/6.6 \approx 2$ кг/м³.

На рис. 5 представлены данные о плотности порошка в завесе при различных режимах распространения волн горения и детонации — от скорости ламинарного пламени (LF) через скорость турбулентного пламени (TF) вплоть до скорости самоподдерживающейся детонации (DW). Наклонная сплошная линия и область I выше нее — критерий полного подавления пылевым облаком любых режимов распространения волн в метановоздушной смеси. Наклонная штриховая линия, проходящая через точки LF и TF, — величины, рекомендованные в России (ГОСТ Р 54777—2011): концентрация огнетушащего порошка в диапазоне 0.01 ÷ 0.1 кг/м³ в облаке порошка длиной не менее 15 м. По этому стандарту в области II гашение не гарантировано, но в области III процесс должен быть погашен. Видно, что предлагаемые в данной статье величины, необходимые для полного га-

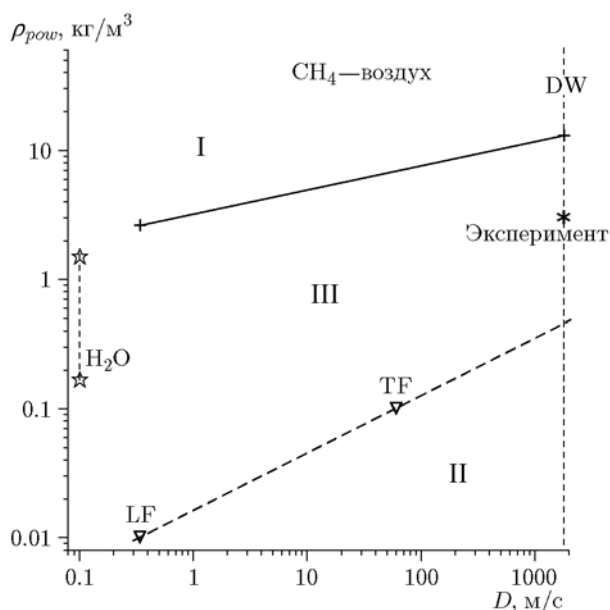


Рис. 5. Сводные данные о плотности частиц в пылевой или водяной завесе для полного гашения волн горения и детонации в зависимости от их скорости распространения

шения волн горения и детонации, заметно превышают рекомендованные стандартом. Дополнительным аргументом против стандарта является экспериментальный результат [9], когда при плотности порошка в завесе 3 кг/м^3 заметного ослабления ДВ зафиксировано не было (эта экспериментальная точка отмечена крестиком на рис. 5 на вертикальной линии DW). Вблизи оси ординат на рис. 5 показаны точки (звездочки), когда пылевая среда заменена на мелкораспыленное водяное облако (см. вышеизложенное).

ВЫВОДЫ

А) Предложены энергетические оценки необходимой плотности пылевой завесы и ее протяженности для предотвращения распространения волн горения и детонации.

Б) Показано, что для полного гашения волн низкоскоростного горения в метановоздушной смеси (моделирование шахтных взрывов) необходимая концентрация пыли в завесе не должна быть ниже 2.6 кг/м^3 .

В) Установлено, что мелкораспыленная водяная завеса способна подавить волну ламинарного горения при плотности капельного облака 1.5 кг/м^3 в случае нагрева капель воды до температуры кипения.

Г) Фазовый переход вода \rightarrow пар и последующий нагрев водяного пара позволяют снизить концентрацию воды для гашения волны горения.

Д) Показано, что для полного гашения детонационной волны в метановоздушной смеси (моделирование шахтных взрывов) необходимая концентрация пыли в завесе не должна быть ниже 13 кг/м^3 .

Е) Предложенные оценочные значения концентрации согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Денисов Е. Т., Азатян В. В.** Ингибирование цепных реакций. — М.: Ин-т хим. физики в Черноголовке, 1996.
2. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1984.
3. **Таблицы физических величин: справочник /** под ред. И. К. Киикоина. — М.: Атомиздат, 1976.
4. **Овсянников Л. В.** Лекции по основам газовой динамики. — М.: Наука, 1981.
5. **Гриб А. А.** Гидродинамическая теория взрывной волны: дис. ... на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук / Томск. гос. ун-т. — Томск, 1940.
6. **Гриб А. А.** О распространении плоской ударной волны при обыкновенном взрыве у твердой стенки // Прикл. математика и механика. — 1944. — Т. VIII, № 3. — С. 169–186.
7. **Станюкович К. П.** Неустановившиеся движения сплошной среды. — М.: Наука, 1971.
8. **Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Чельшев В. П., Шехтер Б. И.** Физика взрыва. — М.: Наука, 1975.
9. **Pinaev A. V., Vasil'ev A. A., Pinaev P. A.** Suppression of gas detonation by a combination of dust pressures // Shock Waves. — 2015. — V. 25, N 3. — P. 267–275. — DOI 10.1007/s00193-014-0543-2.

Поступила в редакцию 14.10.2019.

Принята к публикации 06.11.2019.