

ГОРЯЩИЕ ЧАСТИЦЫ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ КАК ИСТОЧНИК ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНОЙ СРЕДЫ

При детонации заряда ВВ образуются горящие частицы, которые вовлекаются в движение быстро расширяющимися продуктами взрыва. Исследованы условия взаимодействия горящих частиц ВВ с МВС при взрыве открытых зарядов и зарядов в канальной мортуре без забойки. Установлены размеры горящих частиц ВВ, которые могут оказать негативное влияние на антигризутность.

The burning parts are formed in time of detonation of explosive's charge and they pulled into moving with rapidly expanding products of explosion. The conditions of burning parts' interaction with methane-air mixture in time of open charges' explosion and the explosion of charges in canal mortar without tamping were researched. The sizes of burning parts which can influence the negative effect at preservative behaviors were determined in this article.

Введение. Выгорающие заряды могут вызывать воспламенение взрывоопасной среды в забое горной выработки. Этот факт установлен экспериментально некоторыми учеными: Ж. Бигур и Ж. Кокю (Франция), Ф.М. Галаджий и В.Н. Бондаренко (СССР), В.И. Зенин и Ю.В. Манжос (Украина). Поэтому опасность выгорающего заряда предохранительного взрывчатого вещества (ПВВ), как источника воспламенения метано-воздушной смеси (МВС), сомнений не вызывает. При детонации заряда ВВ или во время ее передачи от одного патрона к другому образуются горящие частицы ВВ, которые увлекаются быстро расширяющимися газообразными продуктами детонации и выбрасываются из шпура в призабойную часть выработки.

Анализ последних исследований и публикаций. На основании проведенных исследований К. Бейлинг [1] делает заключение, что если МВС находится непосредственно перед шпуром, то дефлагрирующие (горящие) частицы ПВВ могут вызвать ее воспламенение. Поэтому при взрывных работах решающую роль в качестве источника воспламенения МВС К. Бейлинг отводит не ударным волнам и нагретым до высокой температуры газообразным продуктам взрыва ПВВ, а его дефлагрирующим частицам, вылетающим из шпура. Вместе с тем, быстро летящие частицы ВВ не всегда представляют опасность для МВС, особенно в том случае, когда их действие сопровождается интенсивным расширением газообразных продуктов взрыва ВВ. Продукты взрыва образуют облако, размеры которого зависят от величины заряда ВВ и их удельного образования. Газообразные продукты имеют вначале высокую температуру, но вследствие быстрого расширения охлаждаются до низкой температуры, более безопасной в отношении метана. Более того, газовое облако может защитить МВС от попадания в нее горящих частиц, так как скорость расширения газов при взрыве ВВ гораздо больше скорости полета частиц. Они, проходя через газовое облако, успевают сгореть прежде, чем попадут в МВС. Таким образом, факт опасности для МВС быстро летящих горящих частиц ВВ во время взрыва его заряда до настоящего времени в полной мере не установлен. Поэтому исследование этого вопроса вызывает интерес, так как без учета действия горящих частиц ВВ на МВС нельзя обосновать антигризутность зарядов ПВВ при взрывных работах в угольных шахтах.

Целью данной статьи является исследование взаимодействия горящих быстро летящих частиц ВВ, образовавшихся при детонации шпурового заряда, с МВС и определение критических условий, позволяющих установить радиус частиц ВВ, которые при горении могут оказать негативное влияние на антигризутность заряда ПВВ.

Рассмотрим условия взаимодействия быстро летящих горящих частиц ВВ с МВС, окружающей его заряд. При этом примем во внимание то, что время существования горячей частицы – τ_z определяется ее радиусом – r_q и скоростью горения – u_z :

$$\tau_z = \frac{r_q}{u_z}. \quad (1)$$

Для быстро летящей горячей частицы со скоростью – U_q время ее полета в газовой среде – τ_n будет равно:

$$\tau_n = \frac{\ell_q}{U_q}, \quad (2)$$

где ℓ_q – путь, пройденный частицей.

Приравняв уравнения (1) и (2), получим максимальный путь, который частица пролетит за время своего горения:

$$\ell_n = r_q \left(\frac{U_q}{u_z} \right). \quad (3)$$

Согласно уравнению (3), можно выбрать критическое условие, которое будет определять возможность попадания горящих частиц в МВС. Действительно, если путь, пройденный летящими горящими частицами $\ell_n \geq R_{ПВ}$, где $R_{ПВ}$ – радиус сферы расширившихся до предельного значения газообразных продуктов взрыва ВВ, то частицы на границе этой зоны будут контактировать с МВС. Используя это критическое условие, можно установить параметры горящих частиц, образованных при взрыве заряда ВВ, способных контактировать с МВС. Для этого необходимо определить максимальный радиус расширения газообразных продуктов взрыва заряда ВВ и путь, пройденный быстро летящими частицами за время их горения. Найти максимальный радиус сферы с газами взрыва можно через удельный объем продуктов взрыва ВВ. Для определения пути нужно знать размеры частичек ВВ, которые устанавливаются ситовым анализом, и скорости их полета и горения. Относительно скорости полета горящих частиц ВВ можно сказать следующее. В настоящее время отсутствуют надежные экспериментальные данные по определению этого показателя. Однако имеется большое число экспериментов по определению скорости метания оболочки зарядом ВВ, на базе которых определены скорости разлета осколков оболочки под действием продуктов детонации. Решения этих задач даны в монографии [2] и одним из них для готовых осколков можно воспользоваться, предположив, что частицы ВВ, разбрасываемые продуктами его детонации, схожи с осколками. Тогда предельная скорость осколков-частиц будет равна:

$$U_q = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{15\beta}{8(5+3\beta)} \left[1 - \left(\frac{r_3}{R_{ПВ}} \right)^8 \right]}, \quad (4)$$

где $\beta = \frac{m_{ВВ}}{M_{ОС}}$, $m_{ВВ}$ – масса ВВ, $M_{ОС}$ – масса метаемых осколков;

r_3 – радиус заряда ВВ;

D – скорость детонации ВВ.

Для решения уравнения (4) вводим понятие активной массы ВВ в заряде – m_a , которая характеризует часть ВВ, прореагировавшего во фронте детонационной волны. Масса не прореагировавших при детонации ВВ частиц будет равна: $M_q = m_{ВВ} - m_a$. Тогда

$\beta = \frac{m_a}{m_{ВВ}}$. Основная масса разбрасываемых частиц ВВ будет сосредоточена в поверхностном слое «Харитона» – h , который по принципу Ю.Б. Харитона разбрасывается волной

разряжения при детонации заряда [3]. В этом случае $\frac{m_{BB}}{m_a} = \frac{d_3^2}{d_3^2 - h^2}$, где d_3 – диаметр заряда ВВ.

Экспериментальные данные скорости горения быстро летящих частиц ВВ отсутствуют и эту величину можно оценить только косвенно. В работах А.П. Глазковой и Л.В. Дубнова с сотрудниками [4,5] исследованы скорости горения зарядов промышленных ВВ. Однако эти исследования сделаны для неподвижных зарядов, находящихся в манометрической бомбе постоянного давления. Соответственно скорость горения ВВ в этих условиях не будет соответствовать скорости горения частиц ВВ, летящих с большой скоростью. На такое различие указывает теория горения пороха и приложение ее к реактивным снарядам [6]. Эффект увеличения скорости горения пороха при больших скоростях его обдувания газообразными продуктами горения на выходе у сопла объясняет теория раздувания [7]. Согласно этой теории зависимость скорости горения пороха от движения пороховых газов можно корректировать с помощью коэффициента x , дающего поправку на увеличение скорости горения $\varphi(x)$:

$$\varphi(x) = 1 + 2,5 \cdot 10^{-5} x^2, \quad (5)$$

где $x = \frac{W_n \cdot \rho_z}{u_z \cdot \rho_{nop}}$;

W_n – скорость газового потока;

ρ_z – плотность газа;

u_z – линейная скорость горения пороха;

ρ_{nop} – плотность пороха.

Поскольку пороха представляют собой те же энергетические системы, что и ВВ, попытаемся использовать их теорию горения для описания процесса горения быстро летящих частиц ВВ. В этом случае уравнение (3) примет следующий вид:

$$\ell_n = \frac{r_q \cdot D \cdot \sqrt{\frac{15\beta}{8(5+3\beta)} \left[1 - \left(\frac{r_3}{R_{ПВ}} \right)^8 \right]}}{2u_q \cdot \varphi(x)}. \quad (6)$$

Для угленита Э-6 и аммонита ПЖВ-20 имеются все данные для расчета: ситовый анализ, линейная скорость горения ВВ [5], скорость детонации ВВ, критический диаметр детонации и диаметр заряда, в котором ВВ не детонируют. Эти данные позволяют по уравнениям (1) – (6) оценить дальность полета горящих частиц ВВ и возможность их воздействия на МВС. Для проверки расчетов открытые заряды угленита Э-6 ($m_{BB} = 200$ г) и аммонита ПЖВ-20 ($m_{BB} = 300$ г) были взорваны в темноте, и разлет газообразных продуктов взрыва и траектории горящих частиц ВВ были зафиксированы на светочувствительную фотопленку. Снимки этих взрывов представлены на рис. 1 и 2, а исходные данные, необходимые для расчета дальности разлета горящих частиц, сведены в табл. 1. В табл. 2 приведены результаты расчетов по определению скорости горящих частиц ВВ, размеров частиц на основе ситового анализа компонентов угленита и аммонита и дальности разлета горящих частиц этих ВВ. Сделаем сравнение расчетных значений расстояний разлета горящих частиц с экспериментальными значениями. Расчеты, сделанные для аммонита ПЖВ-20 показывают, что дальность полета горящих частиц превышает максимальный радиус сферы продуктов взрыва: $\ell_n > R_{ПВ}$, а для угленита Э-6, наоборот, дальность полета его частиц меньше радиуса сферы, занимаемой газами: $\ell_n < R_{ПВ}$. Обратимся к эксперименту. На рис.1 видно, что отдельные частицы ПЖВ-20 преодолевают за время горения расстояние $\ell_n \approx 0,49...0,515$ м. Горящие частицы угленита Э-6 преодолевают меньшее расстояние

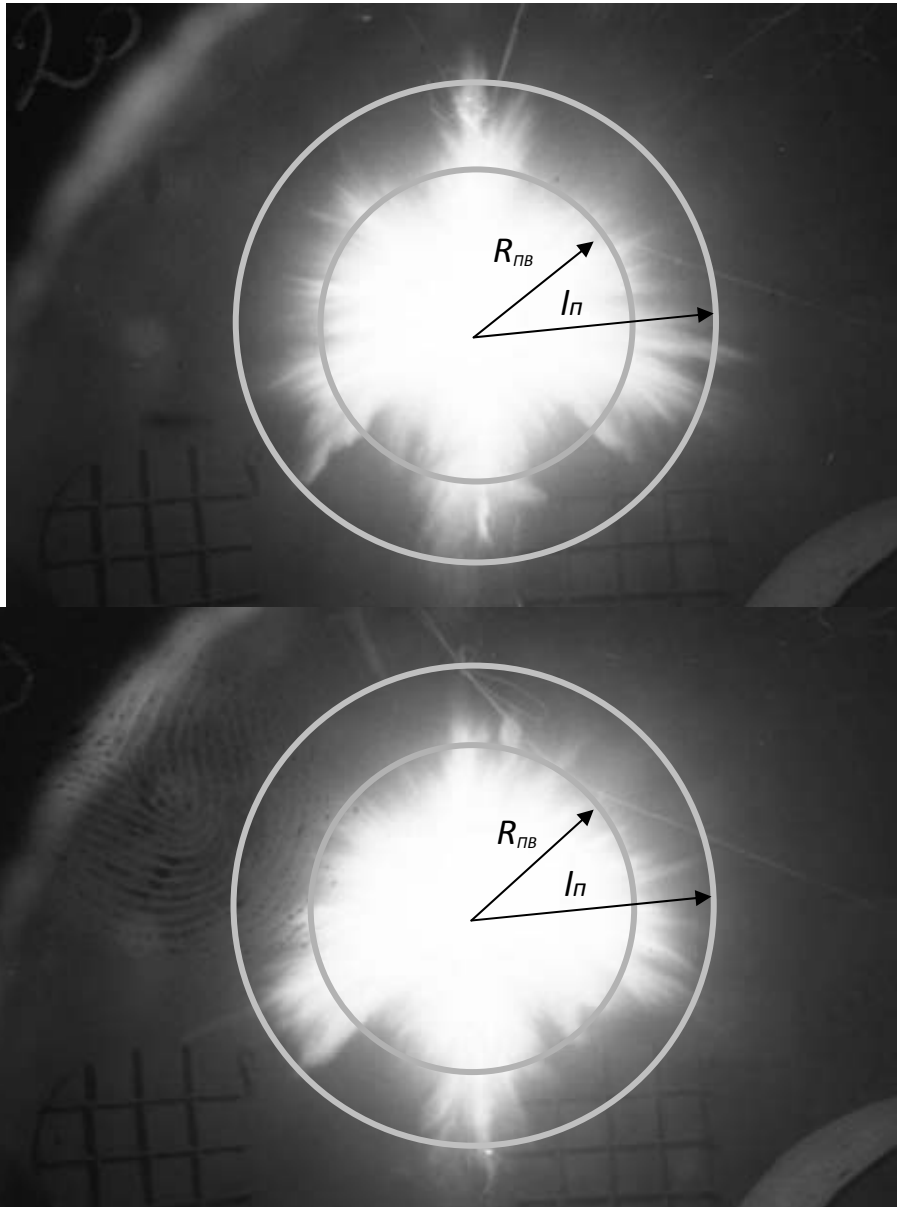


Рис. 1. Разлет газообразных продуктов взрыва аммонита ПЖВ-20 и траектория частиц



Рис. 2. Разлет газообразных продуктов взрыва угленита Э-6 и траектория частиц

Таблица 1 – Значения показателей для ПВВ Э-6 и ПЖВ-20, принятых в расчете дальности разлета горящих частиц

ВВ	Плотность ВВ, $\rho_{ВВ}$, кг/м ³	Скорость детонации, D , м/с	Диаметры заряда, мм		Критический слой ВВ, h , мм	Скорость горения ВВ, u_z , см/с	Диаметр заряда, d_z , мм	Удельный объем газов взрыва, V_o , м ³ /кг	Масса ВВ, $m_{ВВ}$, кг
			критический, $d_{кр}$	отказа, d_o					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПЖВ-20	1100	4000	10,0	9,0	4,75	0,312	36,0	0,717	0,3
Э-6	1200	2220	8,0	6,0	3,5	0,0891	36,0	0,560	0,2

Таблица 2 – Результаты расчета скорости горящих частиц и дальности их полета

ВВ	Радиус сферы ПВ, $R_{ПВ}$, м	Ситовой анализ активных компонентов ВВ, %			Предельная скорость частиц, U_c , м/с	Средний радиус частиц, r_c , мк	Поправка на скорость горения, $\varphi(x)$:	Дальность полета ℓ_n , м	Отношение $\frac{\ell_n}{R_{ПВ}}$
		остаток на сите 15	остаток на сите 29	остаток на сите 49					
ПЖВ-20	0,372	~ 10,0	63,5	20,0	1271,9	~ 65,0	58,4	0,454	1,22
Э-6	0,299	0,75	46,0	50,0	764,7	~ 50,0	183,1	0,235	0,786

$\ell_n \approx 0,238...0,265$ м (рис. 2), то есть опытные данные совпадают с расчетом. В результате анализа необходимо признать, что, несмотря на ряд допущений, сходимость экспериментальных и расчетных данных вполне удовлетворительная. Это позволяет сделать вывод, что горящие частицы аммонита ПЖВ-20 преодолевают расстояние большее, чем радиус сферы облака газов взрыва ВВ и могут контактировать с МВС, окружающей заряд. Горящие частицы угленита Э-6 успевают сгореть внутри сферы газов взрыва ВВ и не контактируют с МВС.

В опытном штреке при испытании в 9,5% МВС заряды угленита Э-6 массой 0,2 кг не вызывали ее воспламенение, а заряды аммонита ПЖВ-20 массой 0,3 кг безотказно воспламеняли метан. Таким образом, напрашивается вывод о том, что при взрыве открытых зарядов ПВВ дефлагрирующие частицы, разбрасываемые при его детонации, действительно могут оказывать отрицательное влияние на антигризутность заряда. Однако, делая такой вывод, мы исключаем действие на МВС ударной волны, образованной при взрыве заряда. Делать этого нельзя, так как ее скорость превышает не только скорость движения горящих частиц ВВ, но и скорость расширения газообразных продуктов взрыва. Исследования показали, что при взрыве заряда аммонита ПЖВ-20 массой 0,3 кг критические параметры ударной волны, вызывающие воспламенение МВС, сохраняются вплоть до расстояния 0,58 м от поверхности заряда. Это указывает на то, что ударная волна имеет способность воспламенить МВС на гораздо большем расстоянии, чем горящие частицы ВВ. Вместе с тем, нельзя исключать опасность горящих частиц ВВ и возможность их влияния на антигризутность его зарядов, взрываемых в открытом виде и в канале мортиры или шпура. Так, принимая во внимание критическое условие, которое определяет возможность взаимодействия горячей частицы с МВС, окружающей заряд, то есть $\ell_n = R_{ПВ}$, можно установить радиус частиц ВВ, при котором это условие начинает выполняться:

$$r_4 = \frac{2R_{ПВ} \cdot u_4 \cdot \varphi(x)}{D \cdot \sqrt{\frac{15\beta}{8(5+3\beta)} \left[1 - \left(\frac{r_3}{R_{ПВ}} \right)^8 \right]}}. \quad (7)$$

Особенно актуальной эта проблема становится при испытании на безопасность взрывания зарядов ПВВ в МВС, которые моделируются в канальной мортире без забойки. Условия взрывания зарядов ПВВ в канальной мортире имеют ряд существенных отличий от условий взрывания открытых зарядов. Эти отличия заключаются в том, что при взрывании в канальной мортире сильное влияние на условия воспламенения МВС оказывают продукты взрыва ВВ, а роль ударной волны в этом процессе второстепенна. Поэтому может оказаться так, что при определенном дисперсном составе ВВ его горящие частицы могут пролететь расстояния, на которых газообразные продукты взрыва ВВ уже не оказывают ингибирующее действие на взрывчатость МВС, и горящие частицы будут способны вызывать воспламенение МВС. Исследуем этот случай с позиции учета влияния дисперсности компонентов ПВВ на дальность полета горящих частиц и выяснения возможности их действия на МВС вне шпура.

В результате анализа данных ночных съемок взрывов заряда ВВ в канальной мортире удалось установить, что угол раствора, под которым происходит истечение продуктов детонации ПВВ из канала, не зависит от типа ВВ и для зарядов массой 0,3...1,0 кг $\varphi \approx 60^\circ$. Зная угол в вершине шарового сектора, формулу для нахождения объема сектора и критический радиус сферической детонации МВС ($r_{кр} = 0,65$ м), можно определить критический радиус ударной волны $R_{ув}$, образованной при взрыве заряда ВВ в канале мортиры, и максимальное расстояние – $L_{ПВ}$, на которое могут расширяться газообразные продукты взрыва:

$$\left. \begin{aligned} R_{ув} &= \frac{r_{кр}}{\sin 30^\circ} = 1,3, \text{ м} \\ L_{ПВ} &= 1,528(m_{ВВ}V_o)^{0,333}, \text{ м} \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Уравнения системы (8) позволяют оценить условия, при которых горящие быстро летящие частицы ПВВ преодолевают расстояние ℓ_n и могут взаимодействовать с МВС. Действительно, если $\ell_n > R_{ув} > L_{ПВ}$, то горящая частица взаимодействует с МВС, которая не подвержена воспламеняющему действию ударной волны или газообразных продуктов взрыва ВВ. Учитывая это, сделан системный анализ критических условий воспламенения МВС горящими частицами ВВ, исходя из их скорости полета и дисперсности частиц.

Для того, чтобы определить начальную предельную скорость вылета частиц ВВ из канала мортиры, поступим следующим образом. Будем считать, что отношение между начальной скоростью полета частиц ВВ и скоростью истечения его продуктов детонации в воздух будет одинаково как при взрывании свободноповешенного заряда, так и заряда ВВ в канале мортиры. У открытого заряда ПЖВ-20 отношение $U_4/W = 0,318$, следовательно, начальная скорость частиц этого ВВ в канале мортиры равна $\bar{U}_4 = 0,318 \cdot 5695 = 1811$ м/с. Используя данные дисперсного анализа аммонита ПЖВ-20 (табл. 2) и расчетные величины x и $\varphi(x)$, получим дальность полета его горящих частиц из канала мортиры:

$$\ell_n = \frac{r_4 \cdot \bar{U}_4}{u_2 \cdot \varphi(x)} = \frac{65 \cdot 10^{-6} \cdot 1811}{3,12 \cdot 10^{-3} \cdot 60,4} \approx 0,625 \text{ м.}$$

Получается, что дальность полета горящих частиц ВВ значительно меньше $R_{ув}$ и $L_{ПВ}$, таким образом, горящие частицы не могут попасть в МВС, а, следовательно, и вос-

пламенить ее. Этот вывод проверили для предельного заряда ПЖВ-20, установленного при испытании в опытном штреке. Его масса при обратном инициировании в канальной мортире составила примерно 0,1 кг, для него получены дальность расширения продуктов взрыва $L_{ПВ} = 0,63$ м и полета горящих частиц ВВ $\ell_n = 0,62$ м, то есть, в этом случае горящие частицы не влияют на МВС ($\ell_n < L_{ПВ}$). Однако, возможность воспламенения МВС горящими частицами ВВ доказана экспериментально в работах В.И. Зенина и В.Н. Бондаренко [8,9]. Дело в том, что аммониты подвержены слеживанию и спекаемости. В результате этих процессов происходят укрупнение частиц ВВ и потеря рассыпчатости состава, снижающие его детонационную способность. Поэтому, если в шпуровых зарядах попадают слежавшиеся патроны аммонита, то при их взрыве в газовую среду из шпура могут попасть горящие частицы спекшегося ВВ и вызвать воспламенение МВС. Критическое условие (7) позволяет оценить радиус этих частиц ВВ. Так, для аммонита ПЖВ-20 с массой шпурового заряда 0,9 кг критический радиус горящих частиц, при котором возможно их попадание в МВС, составит:

$$r_c \geq \frac{L_{ПВ} \cdot u_c \cdot \varphi(x)}{U_q} = \frac{1,32 \cdot 3,12 \cdot 10^{-3} \cdot 60,4}{1811} = 1,374 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Расчет показывает, что горящие частицы аммонита с размером частиц 280 мк и более представляют опасность для МВС и могут оказывать негативное влияние на антигризутность заряда ПВВ.

Вывод. Антигризутность заряда ПВВ зависит от образующихся при его детонации горящих частиц в том случае, если размеры этих частиц превышают критические размеры 300...400 мк. Чтобы размер частиц ВВ не превышал критический, необходимо строго соблюдать регламент производства угленитов и аммонитов и контролировать дисперсность солей их компонентного состава. Необходимо полностью исключить слеживаемость предохранительных аммонитов при их хранении, так как в результате спекания его отдельных частиц при взрыве могут образовываться горящие частицы с размерами, превышающими критические.

Библиографический список

1. Бейлинг К. Взрывчатые вещества и средства взрывания/ Бейлинг К., Дрекопф К. – М.: Оборонгиз, 1941.- 303с.
2. Физика взрыва/ [Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др.]; под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. – 704с.
3. Харитон Ю.Б. О детонационной способности взрывчатых веществ: Сб. статей «Вопросы теории взрывчатых веществ»/ Харитон Ю.Б. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947. – С. 7-26.
4. Глазкова А.П. Катализ горения взрывчатых веществ/ Глазкова А.П. – М.: Наука, 1976. – 262с.
5. Дубнов Л.В. Исследования горения некоторых предохранительных взрывчатых веществ: Сб. «Взрывное дело», № 49/6 / [Дубнов Л.В., Игнатъев Б.А., Романов А.И. и др.] - М.: Госгортехиздат, 1962. – С. 165-170.
6. Зельдович Я.Б. Теория горения пороха и приложение ее к реактивным снарядам: Сб. Теория горения порохов и взрывчатых веществ/ Зельдович Я.Б. – М.: Наука, 1982. – С. 186-226.
7. Лейпунский О.И. К вопросу о физических основах внутренней баллистики реактивных снарядов: Сб. Теория горения порохов и взрывчатых веществ/ Лейпунский О.И. – М.: Наука, 1982. – С.226-278.
8. Зенин В.И. Исследование воспламенения метано-воздушной смеси выгорающими зарядами ВВ: Сб. Безопасность взрывных работ в угольных шахтах/ Зенин В.И., Манжос Ю.В. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1979. – С. 3-6.

9. Бондаренко В.Н. Разработка лабораторных методов оценки склонности ВВ к потере детонационных свойств и к выгоранию при уплотнении: Сб. Выгорание зарядов ВВ в шахтах и меры борьбы с ними/ Бондаренко В.Н. – М.: Госгортехиздат, 1963. – С. 49-55.