

8. И. М. Воскобойников, А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов. ФГВ, 1967, 3, 4.
9. Э. И. Андрианкин, В. К. Боболев, А. В. Дубовик. ПМТФ, 1970, 6.
10. Л. Г. Болховитинов. Докл. АН СССР, 1959, 126, 3220.
11. J. I. Evans, A. M. Yuill. Proc. Roy. Soc., 1958, Ser. A. 246, 176.

УДК 541.126+662.232

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЗРЫВА В НИТРОГЛИЦЕРИНЕ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ВОЗДУШНЫХ ПОЛОСТЕЙ УДАРОМ

А. В. Дубовик, В. К. Боболев

(Москва)

В работе [1] на основании результатов анализа картины схлопывания газовых полостей в слое жидкого взрывчатого вещества (ЖВВ) сформулирован возможный механизм инициирования взрыва при ударе. Там же приводился краткий обзор ранних исследований по данной проблеме.

Можно предположить следующее поведение жидкости при ударе. Во время схлопывания газонаполненной полости в слое ЖВВ на ее границе возникает высокоскоростная кумулятивная струя жидкости, при столкновении которой со стенкой полости в адиабатически (или квази-адиабатически) нагретом газе образуется множество микрокапель жидкости разнообразного размера. Если в спектре капель, характер которого зависит от параметров удара струи, преобладают частицы достаточно малого размера, период тепловой релаксации которых не превышает времени до обратного расширения полости (или ее исчезновения с образованием отдельных пузырьков), и если, вследствие теплообмена газа с каплями, температура в полости не снижается слишком сильно, то в полости создаются благоприятные условия для инициирования химической реакции.

Условия для продолжения реакции на стенках полости будут зависеть как от характера тепловыделения в результате реакции внутри полости, так и от состояния поверхности полости в рассматриваемый момент времени. Следуя этим рассуждениям, нетрудно найти значение температуры T_0 , которая установится в сжатой полости в результате вбрасывания некоторого количества частиц ВВ с начальной температурой T_1 . Если Ω_1 — объем частиц, а Ω_2 — объем полости, то

$$T_0 = T_2 \frac{1 + \rho_1 c_1 \Omega_1 T_1 / \rho_2 c_2 \Omega_2 T_2}{1 + \rho_1 c_1 \Omega_1 / \rho_2 c_2 \Omega_2}, \quad (1)$$

где T_2 — температура газа в полости до вбрасывания частиц; ρ — плотность; c — удельная теплоемкость; индекс 1 относится к жидкости, а 2 — к газу.

Из (1) следует, что при заданной величине Ω_2 T_0 тем выше, чем меньше количество вброшенных частиц Ω_1 . Естественно, тепловой эффект реакции с уменьшением Ω_1 также уменьшается.

Исходя из изложенных представлений относительно механизма инициирования взрыва в ЖВВ, попытаемся дать качественное объяснение

различным картинам возбуждения взрыва в нитроглицерине (НГЦ) и анализируем вид кривых частот, полученных в ходе исследования. Методика проведения экспериментов описана в [1, 2]. Там же приведены некоторые результаты, используемые в данной работе.

Внешняя картина возбуждения взрыва в НГЦ

Если распределить все проведенные эксперименты, в которых фиксировались взрывы, на отдельные группы в соответствии с наблюдающейся картиной возбуждения взрыва при схлопывании полостей, то можно насчитать четыре различные группы опытов.

1. Зарегистрировано всего несколько случаев возникновения взрывов при схлопывании полостей без образования струй, но с появлением пены в жидкости и вбрызгиванием капель в объем сжимающегося газа. На рис. 1, I, взятой из серии опытов № 3¹, взрыв возник в момент, когда степень сжатия воздуха в полости достигла ~ 70 (рис. 1, I, д). Уместно при этом напомнить, что рядом исследователей [3] справедливо признавалась важность распыления жидкости на границе раздела с газом для инициирования ЖВВ.

2. Наиболее часто наблюдалась картина инициирования взрыва, происшедшего спустя несколько *мксек* после соударения струи со стенкой схлопывающейся полости. Оказалось, что указанная картина типична для экспериментов с относительно невысокой величиной характерного времени удара груза $\tau = h_0/w_0 \leq 200 \text{ мксек}$, хотя иногда может встречаться в экспериментах с большими значениями $\tau \simeq 250 \text{ мксек}$, как, например, в опытах серии № 3.

Отметим одно интересное явление, часто наблюдавшееся в данной группе опытов. Во время развития взрыва из полости впереди фронта распространяющегося пламени в жидкости появлялись кавитационные пузырьки², схлопывание которых нередко приводило к возникновению дополнительных очагов инициирования реакции, развивающихся в самостоятельный взрыв. На рис. 1, II, приведена фотография, полученная при проведении серии опытов № 6. Первоначально взрывная реакция возникла спустя $\sim 3 \text{ мксек}$ после столкновения струи со стенкой полости (рис. 1, II, г). Представляется возможным, что в результате местного повышения давления, созданного сильным ударом струи и начавшейся реакцией, возникла волна сжатия, при отражении которой от внешней границы заряда в жидкости наступила кавитация. На рис. 1, II, д кавитационные пузырьки кольцевым слоем окружают горящую полость, а на следующем кадре видно возникновение взрыва на границе кавитационной зоны впереди фронта горения. Заметим, что если скорость горения, распространяющегося из первоначального очага реакции по потоку, растекающегося к периферии ударника НГЦ, составляет $\sim 250 \text{ м/сек}$, то скорость распространения взрыва в кавитирующей жидкости — около 1000 м/сек .

Следует отметить, что аналогичная картина развития взрыва наблюдалась при инициировании малой скорости детонации в НГЦ, помещен-

¹ При анализе картин возбуждения взрыва в НГЦ часто будут указываться номера серий опытов, представленных в таблице из работы [1].

На фотографиях цифры под отдельными кадрами обозначают время в *мксек* с момента начала схлопывания полостей.

² Даже в отсутствие взрыва, если обратное расширение полости происходило с достаточно высокой скоростью (около 100 мксек), в жидкости впереди полости обычно наблюдалась та же картина.

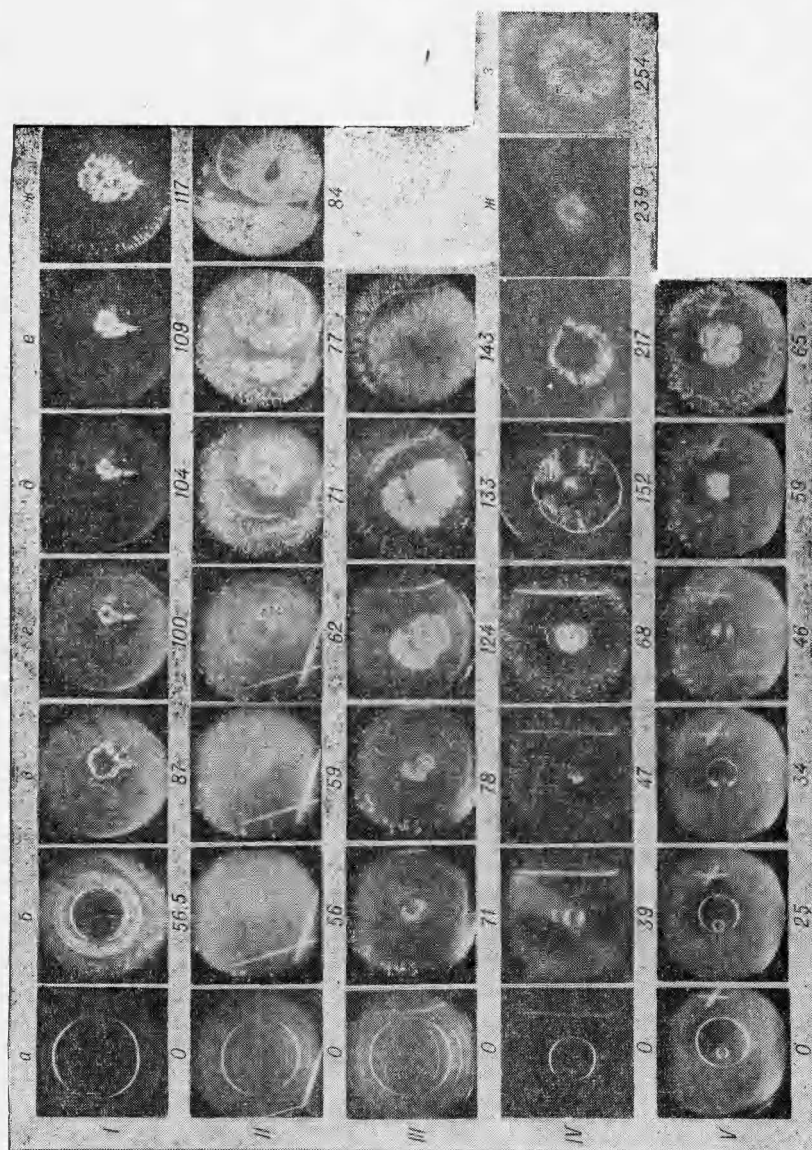


Рис. 1.

ном в виде тонкого слоя между твердыми поверхностями, с помощью электрзаряда [4] или взрывающейся проволочки [7].

3. В случае сравнительно мягкого удара груза по слою жидкости ($\tau > 250$ мксек) нередко наблюдались взрывы, особенно при исследовании желатинизированного НГЦ, происходившие спустя несколько десятков мксек после схлопывания полостей внутри обратно расширяющихся газовых пузырей. Одно из возможных объяснений их природы заключается в особенности протекания реакции в очаге разогрева с постепенно понижающейся температурой, которое вызвано обратным расширением полости. Можно показать (см. Приложение), что в случае расширения полости по закону $r \sim t^m$ ($m > 0$) условие возбуждения взрыва принимает вид

$$m < \frac{RT_0}{2(\gamma-1)E} \left(1 + \frac{t_p}{t_a}\right), \quad (2)$$

где t_a — адиабатический период индукции взрыва в очаге разогрева с температурой T_0 , которую с известным приближением можно принять равной (1); t_p — характерное время расширения полости, которое из эксперимента [5] можно положить приблизительно равным полупериоду ее пульсации; E — энергия активации реакции разложения ВВ; γ — показатель адиабаты газа внутри полости. На рис. 1, III приведена фотография взрыва желатинизированного НГЦ (1% коллоксилина) из серии опытов № 21 (табл.), который произошел спустя ~ 60 мксек (рис. 1, III, д) после схлопывания полости.

Радиус ударника $R=9,5$ мм, груз весом 5 кг, диаметр воздушной полости ~ 10 мм

№ опыта	17	18	19	20	21	22	23
ЖВВ	НЖ-0,5	НЖ-1	НЖ-0,5	НЖ-1	НЖ-1	НЖ-0,5	НЖ-1
w_0 , м/сек	2	2	2	2	3	4	4
h_0 , мм	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0
r_0/R	0,51	0,51	0,51	0,51	0,49	0,50	0,51
t_+ , мксек	85	85	130	140	80	100	110
u , м/сек	75	75	40	40	80	55	50
V , м/сек	160	160	90	65	170	140	120
P , кбар	4,2	4,2	2,1	1,8	4,6	3,6	3,1
f , %	70	30	0	0	80	70	0

Оценим по (2) начальную температуру очага разогрева в рассмотренном эксперименте. Поскольку для НГЦ [6] $Q \approx 1,5$ ккал/г, $E = 35$ ккал/моль, $z = 10^{14}$ сек $^{-1}$, $s = 0,3$ кал/г·град и для газа в полости можно принять $\gamma \approx 1,3$, то, полагая $t_p \approx 10^{-4}$ сек и $m \approx 4$, найдем $T_0 \approx 730^\circ$ К. Близкая величина температуры «горячих точек» при инициировании НГЦ приводится в работе [3].

4. При проведении экспериментов с зарядами НГЦ, имевшими, в отличие от рассмотренных выше, относительно малый параметр $\sqrt{\beta} = r_0/R < 1,4$ (r_0 — начальный радиус полости и R — радиус ударника), часто фиксировались явления пульсирования полостей и наблюдались взрывы при повторных схлопываниях. Рис. 1, IV демонстрирует указанную картину (серия опытов № 12).

После схлопывания полость вновь расширилась, достигнув за время ~ 100 мксек размера, приблизительно вдвое превышающего начальный (рис. 1, IV, д), затем вновь стала сокращаться. Взрыв возник

спустя ~ 240 мксек после удара груза (рис. 1, *V, ж*) в момент, когда степень сжатия полости при повторном схлопывании превысила ~ 35 . На рис. 1, *V, д* хорошо видно присутствие внутри расширившейся полости множества тонких пленок и капель жидкости. Их роль в инициировании взрыва обсуждалась выше.

5. В заключение рассмотрим один качественный эксперимент, результаты которого, как нам кажется, дополнительно свидетельствуют в пользу обсуждаемого механизма инициирования взрыва.

При проведении серии опытов № 12 постоянно регистрировались отказы [1] (взрыв на рис. 1, *IV* явился единственным исключением из более чем 25 проведенных опытов). Однако если вблизи границы полости помещались капелька жидкости или пластилиновый шарик диаметром ~ 1 мм, то почти постоянно фиксировались взрывы. Если капля или шарик помещались в центре полости (или любая твердая частица того же размера выносилась за пределы полости в жидкость), то, как правило, происходили отказы.

На рис. 1, *V, а* представлена фотография полости диаметром 5 мм, внутрь которой была помещена капля НГЦ диаметром ~ 1 мм (условия опыта аналогичны условиям опытов серии № 12). На последующих снимках можно наблюдать появление в полости фонтанов брызг при взаимодействии капли с потоком жидкости (рис. 1, *V, в, г*) и возникновение взрыва при схлопывании полости. Не следует полагать, что введение в полость капель жидкости или твердых частиц в любом случае вызывало взрывы. Поведение воздушной полости обсуждалось в [1], где подчеркивалась относительная устойчивость схлопывания, с которой связывалась возможная причина отказов взрывов. Введение частиц, препятствующих движению жидкости, нарушало обычное течение процесса и вызывало, вследствие высокой скорости потока (~ 80 м/сек), диспергирование жидкости на мельчайшие капли задолго до момента захлопывания t_+ , в силу чего время их разогрева возрастало по сравнению с условиями в опытах № 12. В серии экспериментов № 7 скорость течения жидкости была относительно небольшой (~ 40 м/сек) и, несмотря на сравнительно высокую энергию удара (~ 22 дж), взрывы не возникали даже при введении в полость указанных частиц.

Некоторые результаты по частотам взрывов

В соответствии с результатами опытов, частично приведенными в таблице [1], были построены кривые частоты взрывов НГЦ (в %) в зависимости от параметров, характеризующих геометрию зарядов: $V/\bar{\rho} = r_0/R$ и $\epsilon = h_0/R$, при нескольких значениях величины характерного времени удара груза $\tau = h_0/\omega_0$. Цифры на рис. 2, 3 обозначают номера серий опытов в таблице.

1. Примерный вид зависимости частоты взрывов зарядов НГЦ от параметра $V/\bar{\rho}$ приведен на рис. 2 для двух значений скоростей удара груза: 2 м/сек (кривая I, $\tau = 250$ мксек) и 2,5 м/сек (кривая II, $\tau = 200$ мксек). Диаметр ударника составлял 19 мм, толщина слоя жидкости 0,5 мм ($\epsilon = 0,05$).

Характер кривых указывает, что при фиксированных размерах слоя НГЦ и для данных скоростей груза существуют оптимальные размеры полостей, схлопывание которых вызывает взрывы. Причина появления нижнего предела $V/\bar{\rho}$ обсуждалась в связи с анализом рис. 5 в работе [1], а существование верхнего предела нетрудно установить, учитывая возрастание t_+ с увеличением $V/\bar{\rho}$. Последняя зависимость может ока-

зять влияние как на характер разогрева газа в полости, так и на параметры ее схлопывания (скорости границы полости и кумулятивной струи).

2. В случае, когда фиксировался размер полости ($2r_0=5$ мм) в слое НГЦ толщиной 0,5 мм и варьировался диаметр ударника, получались кривые частоты, вид которых приведен на рис. 3 (скорость удара груза весом 5 кг составляла 2 м/сек, так что $\tau=250$ мсек). Сплошная кривая представляет взрывы при первом схлопывании полостей, пунктирная —

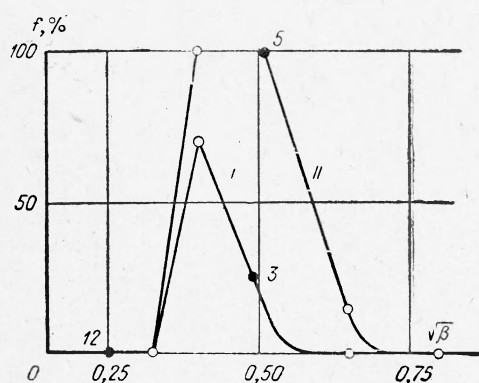


Рис. 2.

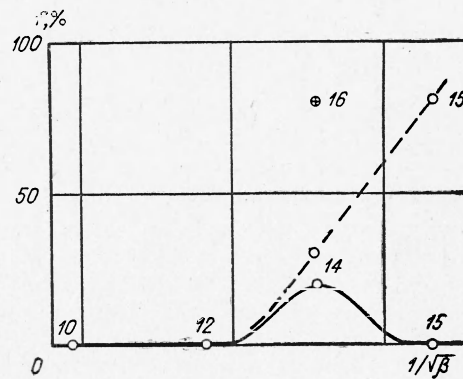


Рис. 3.

взрывы при повторном схлопывании, число которых неуклонно возрастает с увеличением размера ударника. Кривые частоты на рис. 3 построены в зависимости от параметра $1/\sqrt{\beta}$ для удобного сравнения с рис. 2 из [1], на котором приведена зависимость относительного времени схлопывания полостей t_*/τ от $1/\sqrt{\beta}$ в соответствующих опытах. Дополнительно привлекая результаты измерений параметров схлопывания полостей (скоростей движения границ полостей, струй жидкости и давлений при их соударении со стенками полостей), приведенных в таблице [1], и проследя за их изменением по мере увеличения размера ударника R , можно дать качественное объяснение полученному виду сплошной кривой на рис. 3. Значком $\oplus$ на рис. 3 обозначена частота взрывов в серии опытов № 16, проведенной с грузом весом 10 кг.

3. Приближенный характер зависимости частоты взрывов НГЦ от параметра зарядов ϵ при фиксированном значении скорости удара груза ω_0 можно установить на основании вида сплошной кривой на рис. 3, или непосредственно из результатов опытов в сериях 2—4 из работы [1], которые представляют интерес для некоторых практических приложений, так как получены при постоянных значениях размера ударника $R=9,5$ мм, скорости груза $\omega_0=2$ м/сек и параметра заряда НГЦ $\sqrt{\beta} \approx 0,5$. Эти результаты показывают снижение частоты взрыва НГЦ с возрастанием толщины слоя жидкости. Заметим, что величина τ , которая в известной степени характеризует жесткость удара груза, в рассмотренных условиях возрастала со 125 до 500 мсек.

Влияние желатинизации на инициирование взрыва в НГЦ

В таблице представлены результаты исследования чувствительности НГЦ, желатинизированного введением 0,5% (НЖ-0,5) и 1% (НЖ-1) коллоксилина (нумерация опытов в таблице продолжает нумерацию опытов работы [1]). Желатинизация НГЦ снизила его чувствительность к

удару, причем тем выше, чем больше вводилось коллоксилина. Поскольку желатинизация НГЦ приводит к возрастанию его вязкости, то представлялось возможным связать указанный результат с вязкими эффектами. Правда, желатинизированный НГЦ является неньютоновской жидкостью и говорить о точном значении его вязкости не имеет смысла, поэтому отметим, что НЖ-0,5 по внешним признакам был похожим на раствор глицерина в воде 93/7 (по весу) с $\mu=3$ нз, а НЖ-1 напоминал чистый глицерин ($\mu=15$ нз).

Обращаясь к результатам таблицы и сравнивая параметры схлопывания полостей в НЖ с соответствующими величинами, полученными при тех же условиях с чистым НГЦ (см. таблицу 1 [1]), можно обнаружить, что вязкость почти не оказывает влияния на времена схлопывания полостей и скорость движения их границ, но в то же время заметно снижает скорость струй и ударные давления, возникающие при столкновении струй с полостями. Кроме того, возможное влияние вязкие эффекты оказывают на формирование капель жидкости при ударе струй. Известно [7], например, что с возрастанием вязкости жидкости увеличивается размер капель, срываемых газовым потоком со свободной поверхности, причем зависимость среднего диаметра капель от вязкости жидкости и скорости газа выражается соотношением

$$d_{50} \simeq K \sqrt[3]{\mu^2/V^4}. \quad (3)$$

Из (3) видно, что возрастание вязкости жидкости в 10 и 50 раз приводит к увеличению размеров капель соответственно в ~ 5 и ~ 15 раз и, следовательно, повышению времени их прогрева, согласно оценкам [1], в ~ 25 и ~ 200 раз. Если применить полученные результаты к анализу воспламенения капель НЖ при разрушении струй, то нетрудно найти возможное объяснение картины снижения частоты взрывов при желатинизации НГЦ. Следует отметить, что в период завершения данной работы появилось сообщение [8], в котором снижение чувствительности НГЦ при введении коллоксилина связывалось с уменьшением разбрызгивания ВВ в процессе удара. Этот вывод качественно согласуется с нашими результатами.

Приложение

Найдем период индукции воспламенения в очаге разогрева, расширяющемся по известному закону.

Пусть очаг разогрева с температурой T_0 , возникший при схлопывании газовой полости в слое ЖВВ при ударе, подвергается расширению по закону

$$r = r_0(1 + t/t_p)^m, \quad (4)$$

где r_0 — начальный радиус очага и t_p — характерное время расширения полости.

Допустим, что в процессе расширения полости отсутствует смещение ударника к наковальне, т. е. толщина слоя жидкости не меняется. Это условие облегчит математический анализ задачи и, очевидно, не внесет каких-либо принципиальных изменений в результат решения, учитывающего движение ударника.

Принимая адиабатический закон расширения очага, найдем его температуру

$$T/T_0 = 1/(1 + t/t_p)^{2(\gamma-1)}, \quad (5)$$

где γ — показатель адиабаты газа внутри полости.

Изменение температуры в очаге за счет протекания конкурирующих процессов экзотермической химической реакции и адиабатического охлаждения запишется в виде:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Qz}{c\rho} e^{-E/RT} - 2(\gamma-1)T/t_p(1 + t/t_p), \quad (6)$$

где z и E — кинетические константы разложения ВВ; Q — теплота реакции на единицу объема; c и ρ — удельная теплоемкость и плотность ВВ; R — газовая постоянная.

Используем метод разложения экспонента [9] вблизи температуры T_0 , который часто практикуется при решении уравнений химической кинетики.

Введем безразмерную температуру $y = T/T_0$ и параметр $\varepsilon = E/RT_0$, тогда

$$e^{-E/RT} = e^{-\varepsilon} e^{\varepsilon(y-1)} \approx e^{-\varepsilon} [1 + \varepsilon(y-1)] \approx e^{-\varepsilon} \cdot y^{\varepsilon}. \quad (7)$$

Используя (7) и вводя безразмерное время $\tau = t/t_p$, запишем (6) в виде

$$\frac{dy}{d\tau} = A y^{\varepsilon} - b f(\tau) y, \quad (8)$$

где

$$A = \frac{Q z t_p}{\rho c T_0} e^{-\varepsilon}; \quad b = 2m(\gamma - 1); \quad f(\tau) = 1/(1 + \tau).$$

Таким образом, задача об определении периода индукции расширяющегося очага разогрева свелась к интегрированию уравнения (8) с условием $y=1$ при $\tau=0$. (9)

Решение уравнения (8) при условии (9) записывается в виде

$$y = \left\{ \frac{A(\varepsilon - 1)}{b(\varepsilon - 1) - 1} (1 + \tau) - \frac{(A - b)(\varepsilon - 1) + 1}{b(\varepsilon + 1) - 1} (1 + \tau)^{b(\varepsilon - 1)} \right\}^{-1/(\varepsilon - 1)}, \quad (10)$$

откуда для периода индукции получаем выражение

$$\tau_i = -1 + \left\{ \frac{A(\varepsilon - 1)}{(A - b)(\varepsilon - 1) + 1} \right\}^{1/[b(\varepsilon - 1) - 1]}. \quad (11)$$

Если полость не расширяется ($m=0$) (11) переходит в известное выражение для адiabатического периода индукции

$$\tau_a = 1/A(\varepsilon - 1), \quad (12)$$

которое при $\varepsilon \gg 1$ в размерном виде записывается

$$t_a = \frac{\rho c R T_0^2}{Q z E} e^{E/RT_0}.$$

С учетом (12) выражение (11) можно представить в виде

$$\tau_i = -1 + \left\{ \frac{1}{1 - [b(\varepsilon - 1) - 1] \tau_a} \right\}^{1/[b(\varepsilon - 1) - 1]}. \quad (13)$$

Очевидно, взрыв в расширяющемся очаге разогрева может возникнуть при $\tau_i < 1$.

Для реальных значений параметров эта задача будет выполняться в случае

$$b(\varepsilon - 1) - 1 < 1/\tau_a.$$

Откуда, с учетом $\varepsilon \gg 1$, получаем неравенство

$$m < \frac{R T_0}{2(\gamma - 1) E} (1 + t_p/t_a),$$

использованное выше для оценки температуры в очаге разогрева.

Поступила в редакцию
10/XI 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. ФГВ, 1971, 7, 2.
2. В. К. Боболев, А. В. Дубовик. ПМТФ, 1970, 2.
3. Ф. Боуден, А. Иоффе. Быстрые реакции в твердых веществах. М., ИЛ, 1967, 107.
4. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1962, 275.
5. Э. И. Андрианкин, В. К. Боболев, А. В. Дубовик. ПМТФ, 1970, 6.
6. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1960.
7. E. Mauger. Am Rocket Soc. J., 1961, 31, 12, 1783.
8. C. Voyars. Comb. and Flame, 1969, 13, 4, 439.
9. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.