

«ГОРЯЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ» В ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Д. А. Варфоломеев, К. Ф. Гребёнкин, А. Л. Жеребцов, М. В. Тараник

РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, k.f.grebyonkin@vniitf.ru

Предложена модель макрокинетики химических реакций в детонирующих гетерогенных ВВ, основанная на предположении, что под действием инициирующей ударной волны образуются не только точечные, но и поверхностные микроочаги («горячие поверхности»). Причиной возникновения поверхностных очагов может быть локальное повышение температуры вблизи микротрещин и на границах зерен. Проведено тестирование модели по результатам измерения профилей давления при возбуждении детонации во взрывчатом составе на основе ТАТБ.

Ключевые слова: гетерогенные ВВ, детонация, макрокинетика, «горячие точки».

В настоящее время общепризнанным является очаговый механизм ударно-волнового инициирования детонации в гетерогенных конденсированных взрывчатых веществах (ВВ). В нем предполагается, что при прохождении головной ударной волны через неоднородности в ВВ образуются микроскопические очаги реакций — «горячие точки» — и выгорание основной массы ВВ проходит в сферических волнах послыного горения, распространяющихся из «горячих точек» [1].

Удельное энерговыделение при горении микроочагов (ΔE) должно расти со временем пропорционально относительной массе вещества «горячих точек» в элементарном объеме реагирующей гетерогенной смеси ВВ и продуктов взрыва (ПВ). Как обычно (см., например, [1]), макрокинетика гетерогенных реакций в детонирующем ВВ рассматривается применительно к элементам объема, размеры которых малы по сравнению с характерными размерами образца в эксперименте, но много больше среднего расстояния между микроочагами.

На начальном этапе, когда микроочаги еще не перекрываются, $\Delta E \sim (Dt)^3$ [2], где D — скорость распространения волны горения. Прирост давления (Δp), обусловленный выделением энергии в ВВ, также будет зависеть от времени как $\Delta p \sim \Delta E \sim t^3$. Однако в экспериментах по инициированию детонации наблюдается не кубическая, а линейная зависимость прироста давления от времени [3].

Анализ экспериментальных профилей давления привел авторов работы [4] к выводу, что «незначительная реакция возникает сразу за

ударным скачком, вызывая рост давления, а основная реакция происходит достаточно далеко от лидирующего скачка». Таким образом, можно предположить, что сначала выгорание ВВ зависит от времени линейно, при этом разлагается сравнительно небольшая часть ВВ и формируется линейный участок зависимости давления от времени, а затем происходит более быстрый рост типа кубической зависимости от времени, которая получается по модели «горячих точек».

Для того чтобы объяснить наблюдаемую в экспериментах линейную стадию роста давления со временем, в данной работе предлагается модель макрокинетики химических реакций в детонирующих гетерогенных ВВ, исходящая из предположения о том, что после прохождения ударной волны через гетерогенное ВВ образуются не только точечные микроочаги, т. е. собственно «горячие точки», но и микроочаги с другой топологией горения — поверхностные. По аналогии с «горячими точками» такие микроочаги логично назвать «горячими поверхностями».

Пусть после прохождения ударной волны через гетерогенное ВВ в единице объема образуется N_1 точечных очагов и N_2 поверхностных очагов со средней площадью поверхности S_2 . Схематично топология горения при наличии двух типов микроочагов показана на рис. 1. На начальной стадии протекания реакций, когда перекрыванием очагов можно пренебречь, полный выгоревший объем можно оценить как сумму объемов, выгоревших в сферических и плоских волнах горения, возникших из точеч-

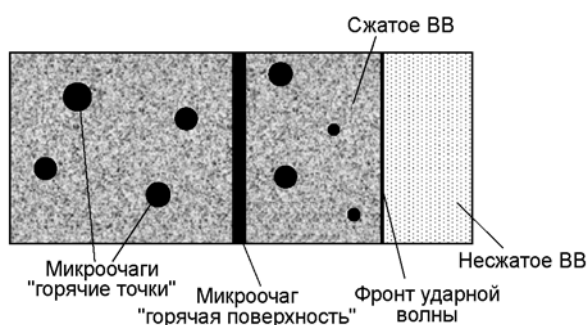


Рис. 1. Микроструктура очагов, образовавшихся после прохождения ударной волны через ВВ (характерное расстояние между микроочагами ≈ 10 мкм)

ных и поверхностных очагов:

$$V_r(t) \approx N_1 \frac{4}{3} \pi (Dt)^3 + 2N_2 S_2 Dt. \quad (1)$$

При проведении этой оценки скорость распространения волны горения из очагов считается постоянной и время отсчитывается от момента зажигания очагов в данном элементе объема. Время зажигания микроочагов мало [5], поэтому можно считать, что все микроочаги в данном элементе объема зажигаются одновременно.

Таким образом, выделение энергии за счет роста «горячих точек» будет увеличиваться как $\sim t^3$, а за счет «горячих поверхностей» — как $\sim t$. Следовательно, при малых временах основную роль должны играть поверхностные очаги, у которых начальная поверхность горения больше. Однако зависимость выгоревшей массы ВВ от времени у них более слабая — линейная, поэтому начиная с некоторого момента ситуация изменится и доминирующим станет вклад в выгорание от точечных очагов.

Локально выгоревшие тонкие протяженные слои наблюдались одновременно с мало-размерными «горячими точками» при исследовании образцов ВВ, сохраненных после ударного воздействия [6]. Вывод о важной роли поверхностного горения при инициировании детонации был сделан в работе [7] на основе анализа экспериментальных данных по ударно-волновому инициированию гетерогенных ВВ.

Причиной возникновения поверхностных очагов могут быть микротрещины, которые неизбежно присутствуют в прессованных ВВ. При прохождении ударной волны через трещины может происходить локальное повышение температуры и возникать поверхностный очаг,

из которого будет распространяться волна горения [3]. Еще один возможный механизм образования «горячих поверхностей» — это локальное повышение температуры на границах зерен и последующее горение, направленное внутрь зерен [8].

Совместное действие двух типов очагов будем учитывать в аддитивном приближении, и полное выгорание ВВ (g), т. е. массовую концентрацию ПВ в гетерогенной реагирующей смеси ВВ и ПВ, представим в виде суммы двух слагаемых, соответствующих вкладам от двух типов очагов: $g = g_1 + g_2$. Допустимость такого приближения следует из формулы (1), согласно которой длительность промежутка времени, когда оба типа очагов дают сравнимый вклад в полное выгорание, должна быть мала. Таким образом, предполагается, что на начальной стадии доминирует вклад поверхностных очагов и выгорание от сферических очагов пренебрежимо мало, а затем происходит быстрый переход к режиму с преобладанием вклада точечных очагов и выгорает основная часть ВВ.

В аддитивном приближении величины g_1 и g_2 определяются независимо друг от друга из уравнений очаговой макрокинетики [1, 5]:

$$\frac{dg_i}{dt} = Z_i G_i(p_f) D(p, T) F_i(g_i),$$

где индексом i обозначены величины, соответствующие горению точечных ($i = 1$) и поверхностных ($i = 2$) микроочагов, p и T — текущие значения давления и температуры, p_f — давление на фронте инициирующей ударной волны, $G(p_f)$ — величина, обратная среднему расстоянию между соседними микроочагами данного типа, возникшими после прохождения первой ударной волны, D — скорость распространения волны горения из микроочагов, $F(g)$ — геометрический фактор, Z — константа.

Геометрический фактор учитывает изменение топологии горения в ходе гетерогенной реакции превращения ВВ в ПВ. В работе [9] на основе модельных расчетов был получен геометрический фактор для случая «горячих точек», т. е. когда из точечных микроочагов распространяются сферические волны горения:

$$F_1(g_1) = C_1 g_1^{2/3} (1 - g_1),$$

где C_1 — константа. Это выражение учитывает перекрытие сферических очагов на конечной стадии горения [9].

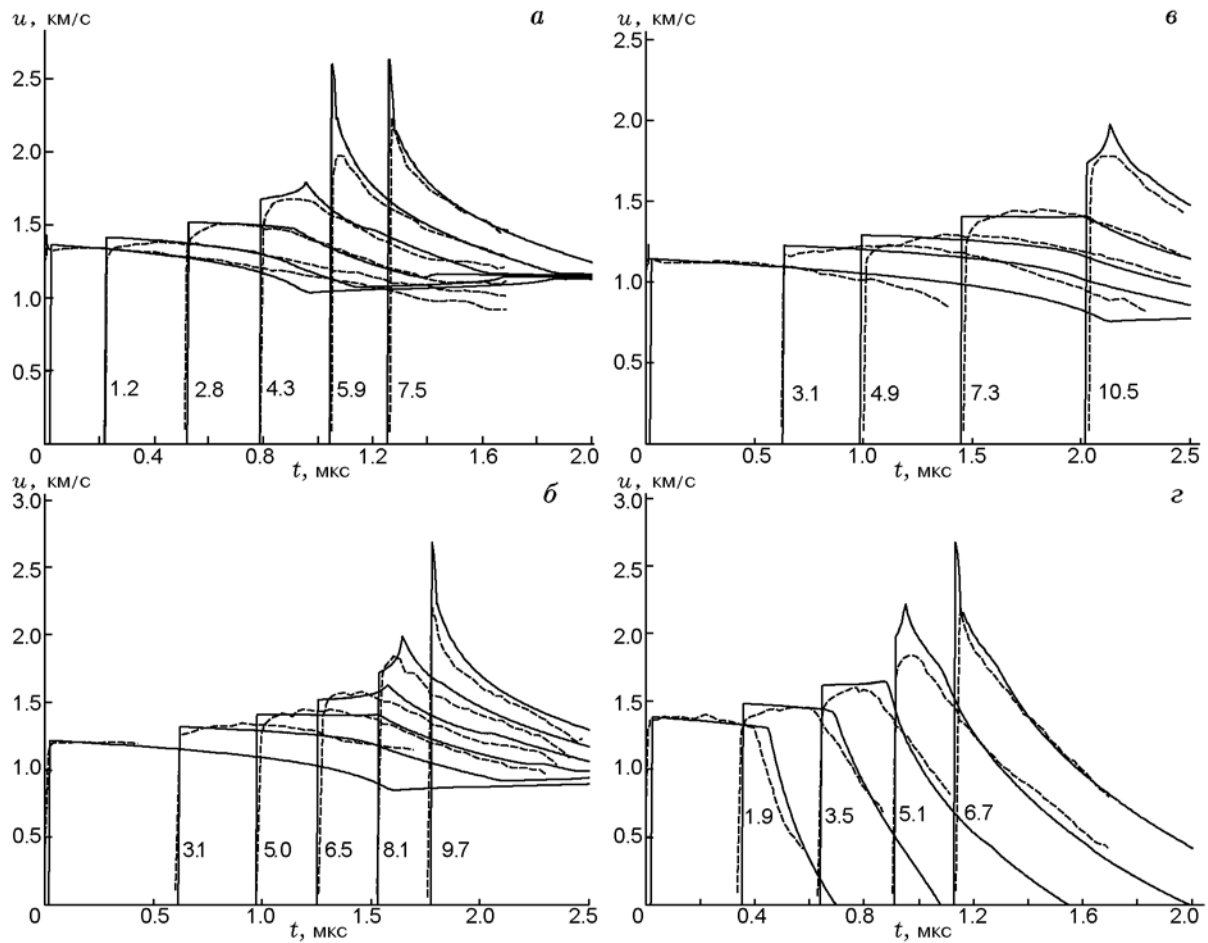


Рис. 2. Профили массовой скорости на различной глубине (указана около линий, мм) от поверхности инициирования, полученные в опытах [12]: 2s-118 (а), 2s-69 (б), 2s-70 (в), 2s-100 (г, короткий импульс):

штриховые линии — эксперимент, сплошные — расчет

Очевидно, что геометрический фактор для поверхностных очагов можно считать константой (см. обсуждение геометрического фактора в [9]), причем на начальной стадии горения ВВ можно пренебречь перекрытием очагов.

Фактор плотности «горячих точек» моделировался в данной работе ступенчатой функцией

$$N_i(p_f) = \begin{cases} 1 & \text{при } p_f \geq p_{0i}, \\ 0 & \text{при } p_f < p_{0i}, \end{cases}$$

где p_{0i} — константа. Как показано в [5], такое приближение применимо для низкочувствительных взрывчатых составов на основе ТАТБ.

Скорость волны горения моделируется экспоненциальной функцией давления $D \sim$

$\exp(\alpha p)$ [5]. Естественно, эта функция одинакова для точечных и поверхностных очагов.

При проведении расчетов учитывалось так называемое «медленное энерговыделение», обусловленное ростом наночастиц конденсированного углерода в ПВ, по модели [10].

Описанная выше модель макрокинетики химических реакций реализована в программном комплексе [11], обеспечивающем решение уравнений газовой динамики и кинетики химических реакций. Тестирование модели проводилось по результатам недавних экспериментов по ударно-волновому инициированию детонации во взрывчатом составе на основе ТАТБ РВХ 9502 [12]. В цилиндрическом заряде ВВ размещались датчики, позволяющие регистрировать профили массовой скорости в отдельных точках заряда, тем самым не только из-

мерялась глубина возникновения детонации, но и фиксировались тонкие особенности процесса инициирования. В опытах варьировались амплитуда и длительность инициирующего импульса.

При проведении расчетного моделирования экспериментов были приняты следующие значения констант модели: $Z_1 = 0.007 \text{ мкс}^{-1}$, $Z_2 = 0.0138 \text{ мкс}^{-1}$, $\alpha = 0.27 \text{ ГПа}^{-1}$, $p_{01} = 5.0 \text{ ГПа}$, $p_{02} = 2.0 \text{ ГПа}$, $C_1 = 4.5$ [9], $C_2 = 1.0$. Использовалось уравнение состояния ВВ, приведенное в работе [13]. В качестве условия замыкания при определении уравнения состояния гетерогенной смеси ВВ и ПВ использовалось условие изоэнтропичности ВВ [3]. Параметры, характеризующие медленное энерговыделение, и уравнение состояния ПВ взяты без изменений из работы [10]. Тем самым сохраняется расчетное описание [10] экспериментов по метанию пластин и затуханию ударной волны в преградах, контактирующих с ВВ. Эти эксперименты проводятся в условиях сильного инициирования, и, как показали расчеты, на результаты их моделирования кинетика выгорания ВВ не влияет.

Результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными [12] приведены на рис. 2. Наблюдается их хорошее согласие, чего не удавалось добиться в рамках предыдущей версии модели [2], в которой учитывались только точечные микроочаги.

Таким образом, в данной работе предложена полуэмпирическая модель инициирования детонации в гетерогенных ВВ, учитывающая возможность совместного действия двух типов очагов реакций: «горячих точек» и «горячих поверхностей». Исходя из этих представлений описаны результаты измерения роста давления при возбуждении детонации во взрывчатом составе на основе ТАТБ. Отмечена определяющая роль поверхностных очагов при формировании профилей давления в ударно-сжатом ВВ на начальной стадии процесса, когда степень разложения ВВ невелика. Однако полное время протекания гетерогенных реакций в основном определяется интенсивным горением точечных очагов. Поэтому модели, основанные на предположении о наличии только точечных очагов, например модель, изложенная в работе [2], хорошо описывают критические условия инициирования детонации, но не соответствуют результатам измерений профилей давления при развитии детонации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лобанов В. Ф.** Моделирование детонационных волн в гетерогенном конденсированном ВВ // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 6. — С. 113–116.
2. **Гребенкин К. Ф., Жеребцов А. Л., Тараник М. В., Царенкова С. К., Шнитко А. С.** Физическая модель ударно-волнового инициирования детонации пластифицированного ТАТБ // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 5. — С. 117–126.
3. **Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортгов В. Е.** Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996.
4. **Уртъев П. А., Тарвер К. М.** Ударное инициирование энергетических материалов при различных начальных температурах (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 6. — С. 181–192.
5. **Гребенкин К. Ф.** Сравнительный анализ физических механизмов инициирования детонации в октогене и в низкочувствительном взрывчатом веществе (ТАТБ) // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 1. — С. 89–99.
6. **Demol G., Lambert P., Trumel H.** A study of microstructure of pressed ТАТБ and its evolution after several kinds of insults // Proc. 11th Detonation Symp. — 1998. — P. 309–316.
7. **Wackerle J., Anderson A. B.** Burning topology in the shock-induced reaction of heterogeneous explosives // Shock Waves in Condensed Matter-1983. — Elsevier Sci. Publ., 1984. — P. 601–604.
8. **Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Лобанов В. Ф.** Моделирование ударного инициирования детонации гетерогенных ВВ // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 132–147.
9. **Гребенкин К. Ф., Тараник М. В., Царенкова С. К., Шнитко А. С.** Физическая модель низкоскоростной детонации в пластифицированном октогене // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 1. — С. 102–112.
10. **Grebenkin K. F., Taranik M. V., Zherebtsov A. L.** Computer modeling of scale effects at heterogeneous HE detonation // Thirteenth Symp. (Intern.) on Detonation, Norfolk, 2006. — Office of Naval Research. — ONR 351-07-01. — P. 496–505.
11. **Куропатенко В. Ф., Коваленко Г. В., Кузнецова В. И. и др.** Комплекс программ «Волна» и неоднородный разностный метод для расчета неустановившихся движений сжимаемых сплошных сред. Часть 1. Неоднородный разностный метод // ВАИТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. — 1989. — Вып. 2. — С. 9–17.

12. **Gustavsen R. L., Sheffield S. A., Alcon R. R.** Measurements of shock initiation in the tri-amino-tri-nitro-benzene base explosive PBX 9502: Wave forms from embedded gauges and comparison of four different material lots // *J. Appl. Phys.* — 2006. — V. 99. — P. 114907-1–114907-17.
13. **Аминов Ю. А., Вершинин А. В., Еськов Н. С., Костицын О. В., Лобойко Б. Г., Любимов В. С., Любятинский С. Н., Рыкованов Г. Н., Стриженов М. А.** Исследование ударно-волновой чувствительности пластифицированного ВВ на основе ТАТБ // *Физика горения и взрыва.* — 1995. — Т. 31, № 1. — С. 103–108.

Поступила в редакцию 1/VIII 2009 г.
