

УДК 534.222.2

ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СМЕСЕЙ ТЕТРАНИТРОМЕТАНА С МЕТАНОЛОМ И НИТРОБЕНЗОЛОМ

А. В. Уткин, В. М. Мочалова, В. Е. Рыкова

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, utkin@icp.ac.ru

С использованием многоточечного лазерного интерферометра исследована структура детонационных волн в смесях тетранитрометана с метанолом и нитробензолом. Наблюдается плохая воспроизводимость профилей массовой скорости, измеренных в разных опытах при фиксированном составе смесей. Одновременная регистрация волновых профилей в нескольких точках детонационного фронта и различных сечениях образца показала, что при этом течение является одномерным и устойчивым по отношению к продольным возмущениям. Это означает, что в каждом эксперименте реализуется стационарный детонационный режим, параметры которого отличаются от опыта к опыту. Наряду с отсутствием воспроизводимости профилей массовой скорости, в исследуемых смесях зарегистрированы неклассические режимы детонации, проявляющиеся в отсутствии химпика в зоне реакции. Обсуждается возможная взаимосвязь этих двух явлений.

Ключевые слова: тетранитрометан, метанол, нитробензол, детонация, химпик, параметры Чепмена — Жуге, воспроизводимость экспериментальных данных, неклассические режимы детонации.

DOI 10.15372/FGV20210309

ВВЕДЕНИЕ

Детонационные параметры конденсированных взрывчатых веществ (ВВ), как правило, с хорошей точностью воспроизводятся от опыта к опыту. Это относится прежде всего к скорости детонации, давлению и массовой скорости в точке Чепмена — Жуге. Однако при исследовании жидких ВВ на основе тетранитрометана обнаружен значительный разброс экспериментальных данных при фиксированном составе смесей. Так, например, в смесях тетранитрометана с нитробензолом в окрестности стехиометрического состава в работах [1–3] разброс в измерениях скорости детонации достигал сотен метров в секунду, тогда как в работах [1, 4] отмечалось, что в пределах экспериментальной погрешности скорость детонации постоянна. Наблюдается также плохая воспроизводимость профилей массовой скорости в детонационных волнах [5–7], что, по мнению авторов [5, 6], может быть обусловлено распространением и взаимодействием косых и поперечных детонационных волн.

Такое расхождение результатов требует

более детальных исследований. В частности, необходимо выяснить, являются ли наблюдаемые особенности следствием нестационарного, пульсирующего режима распространения детонационных волн, либо в каждом эксперименте устанавливается стационарный детонационный режим, параметры которого варьируются от опыта к опыту в некотором интервале их значений. Первое предположение выглядит более естественным, поскольку детонационные волны в жидких ВВ неустойчивы по отношению к малым поперечным возмущениям, если отношение энергии активации к температуре за ударным скачком превышает критическое значение [8–12]. К аналогичному выводу пришли авторы [11, 12] и для случая продольных возмущений, при которых возмущенное течение, как и исходное, остается одномерным. Детальные теоретические исследования продольной неустойчивости [13–19], учитывающие распределение параметров в зоне реакции, подтверждают этот вывод. Тем не менее, экспериментальные доказательства реализации подобных режимов в жидких ВВ отсутствуют, поэтому необходимо рассмотреть и другие возможные причины плохой воспроизводимости волновых профилей. С этой целью в данной работе проведены экспериментальные

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0089-2019-0001.

© Уткин А. В., Мочалова В. М., Рыкова В. Е., 2021.

исследования детонационных процессов в смесях тетранитрометана (ТНМ) с метанолом (М) и нитробензолом (НБ).

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИССЛЕДУЕМЫЕ ВВ

В опытах использовался ТНМ начальной плотности $\rho_0 = 1.64 \text{ г/см}^3$ со скоростью детонации $D = 6.48 \text{ км/с}$ [1, 8]. ТНМ является окислителем с положительным кислородным балансом 49 %, и в окрестности стехиометрической концентрации, равной 75.4/24.6 и 76.85/23.15 % (мас.) для смесей ТНМ/М и ТНМ/НБ соответственно, добавка горючего заметно увеличивает теплоту взрыва и детонационные параметры смесей [1]. Возрастает при этом и ударно-волновая чувствительность ВВ. С целью исследования воспроизводимости результатов проведены эксперименты с регистрацией структуры волновых профилей при выходе детонационных волн на границу с водой для составов ТНМ/М 85/15 и ТНМ/НБ 76/24. Смесь с нитробензолом близка к стехиометрической, тогда как при использовании метанола кислородный баланс положительный и равен +19.1 %. Это позволяет проследить влияние не только природы разбавителя, но и отклонения состава ВВ от стехиометрии на воспроизводимость экспериментальных данных.

Схема экспериментов показана на рис. 1. Детонация в исследуемом ВВ инициировалась плосковолновым генератором 1. Волновые профили регистрировались двумя многоточечными лазерными интерферометрами VISAR с постоянными скоростями 280 и 1280 м/с. Зондирующее излучение отражалось от 7-микронной алюминиевой фольги 3, расположенной между торцом заряда и прозрачным окном 2. Исследуемое жидкое ВВ помещалось в оболочку 4 из полипропилена или полиметилметакрилата

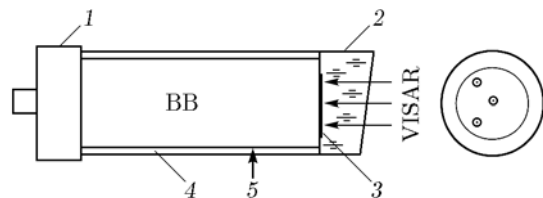


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — генератор плоской ударной волны, 2 — водяное окно, 3 — алюминиевая фольга, 4 — оболочка, 5 — датчик

с внутренним диаметром 36 мм и толщиной стенки 2 мм. Длина заряда составляла 150 мм. На рис. 1 показан также фронтальный вид экспериментальной сборки при регистрации профилей скорости в трех точках, одна из которых расположена на оси цилиндрической оболочки, а две другие — на расстоянии, равном половине радиуса.

Одновременно с массовой скоростью в каждом эксперименте измерялась скорость детонации D , для чего использовался датчик 5 как точка отсчета времени. Вторая метка времени соответствовала началу регистрации массовой скорости интерферометром. Погрешность определения D не превышала $\pm 0.5 \%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Влияние концентрации разбавителей на структуру волновых профилей

На рис. 2 приведены типичные профили массовой скорости в зависимости от времени для ТНМ и его смесей с метанолом и нитробензолом. Профиль скорости для чистого ТНМ соответствует представлениям классической модели детонации Зельдовича — Неймана — Дёринга (ЗНД) [20]: за ударным скачком наблюдается резкий спад с формированием химпика в зоне реакции. Время реакции было найдено ранее — $175 \pm 25 \text{ нс}$ [21]. Параметры в точке Чепмена — Жуге определяются в результате анализа течения в плоскости давление p — массовая скорость u [22] и равны

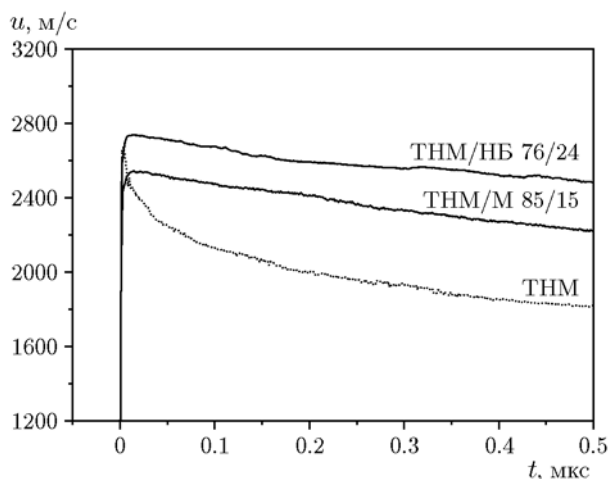


Рис. 2. Профили скорости в ТНМ и его смесях с нитробензолом и метанолом на границе с водой (цифры — состав ВВ, % (мас.))

$u_{СJ} = 1.55 \pm 0.02$ км/с и $p_{СJ} = 16.5 \pm 0.2$ ГПа. Полученные значения согласуются с данными других авторов [5, 6, 8, 23].

При добавлении разбавителей детонационные параметры смесей ТНМ/М и ТНМ/НБ возрастают и достигают максимального значения в окрестности стехиометрии. При 24 % нитробензола средние значения массовой скорости и давления в точке Чепмена — Жуге равны 1.97 км/с и 22.3 ГПа. Скорость детонации при этом увеличивается до 7.50 км/с. Для смеси с метанолом $u_{СJ} = 1.90$ км/с, $p_{СJ} = 18.2$ ГПа, $D = 6.79$ км/с. Наиболее существенными, однако, в плане развития представлений о структуре детонационных волн являются следующие результаты. Во-первых, принципиально меняется вид профилей скорости по сравнению с чистым ТНМ (см. рис. 2). За ударным скачком скорость не уменьшается, а продолжает возрастать с формированием пологого максимума в окрестности 10 нс. Последующий спад скорости неотличим от разгрузки в волне разрежения, т. е. химпик в зоне реакции, в его классическом понимании, отсутствует. Такой характер течения обусловлен реакцией ВВ непосредственно во фронте волны сжатия [24, 25]. Более того, согласно данным, приведенным в работе [1], критический диаметр детонации смеси ТНМ/НБ в окрестности стехиометрии не превышает 0.05 мм. Согласно критерию Харитона [26] это означает, что характерное время реакции около 10 нс, т. е. максимум скорости практически совпадает с точкой Чепмена — Жуге. Данная оценка времени реакции в значительной мере условна, поскольку при приближении к критическому диаметру течение в зоне реакции становится существенно неоднородным, реакция не заканчивается в плоскости Чепмена — Жуге и продолжается в волне разгрузки. Тем не менее факт распространения детонации при столь малых диаметрах свидетельствует о выделении значительной доли энергии за время порядка 10 нс.

Во-вторых, как в чистом ТНМ, так и в его смесях с метанолом и нитробензолом в широком интервале концентраций профили скорости являются гладкими (см. рис. 2), без каких-либо особенностей, появление которых неизбежно при ячеистой структуре детонационной волны. Это означает, что детонационные волны в смесях ТНМ/НБ и ТНМ/М устойчивы по отношению к возмущениям кривизны фронта. Первые признаки неустойчивости обнаружи-

ваются лишь при приближении к предельной концентрации разбавителя, равной 62 и 76 % для метанола и нитробензола соответственно [7, 22, 27].

Воспроизводимость экспериментальных данных

Как сказано выше, ряд авторов отмечали плохую воспроизводимость экспериментальных данных в смесях ТНМ с нитробензолом и метанолом в окрестности стехиометрической концентрации разбавителей. Аналогичное явление наблюдалось и в данной работе, что проявлялось в различии профилей скорости, полученных при одинаковых условиях проведения экспериментов. На рис. 3 приведены шесть профилей скорости для смеси ТНМ/НБ 76/24. Во всех опытах параметры экспериментальных сборок совпадали: использовалась оболочка из полиметилметакрилата с внутренним диаметром 36 мм, толщиной стенки 2 мм и длиной 150 мм. Иницировалась детонация одинаковыми зарядами ВВ. Внешние условия, способ и время от момента приготовления смеси до проведения эксперимента также совпадали. Тем не менее видно, что расхождение между профилями скорости достигает 200 м/с при точности измерения ± 5 м/с. Изменение диаметра оболочки и иницирующего заряда не приводит к улучшению воспроизводимости результатов. Следует отметить, что для чистого ТНМ профили скорости, полученные в разных опытах, совпадают с точностью экспериментальной погрешности. Этот факт отмечался ранее [22] и

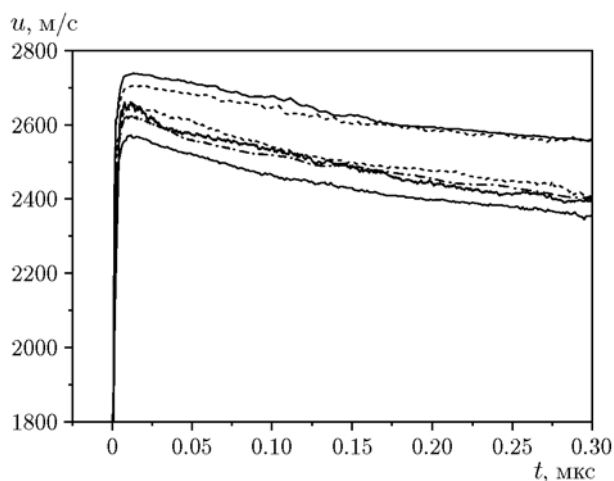


Рис. 3. Профили скорости на границе смеси ТНМ/НБ с водой при концентрации нитробензола 24 %

проверен в данной работе. Отсутствие воспроизводимости результатов в смеси ТНМ/НБ начинается с концентрации нитробензола 10 % и продолжается до 40 %. Поэтому на рис. 2 для концентраций НБ из этого диапазона показан только один из профилей скорости, занимающий среднее положение в массиве данных, приведенном на рис. 3.

В отличие от массовой скорости, скорость детонации при фиксированном составе смеси воспроизводилась от опыта к опыту с точностью экспериментальной погрешности измерений. Так, например, для смеси ТНМ/НБ 76/24 она оставалась постоянной — $D = 7.50 \pm 0.02$ км/с. Этот результат согласуется с данными авторов [1, 4]. Возможно, разброс значений D , отмечавшийся в работах [2, 3], связан с методикой измерений.

В смеси ТНМ/М также наблюдается плохая воспроизводимость профилей скорости при концентрации метанола 10 ÷ 40 %. Рис. 4 демонстрирует характерный разброс экспериментальных данных при 15 % разбавителя. Все опыты, количество которых превышало 30, были проведены при одинаковых условиях в той же постановке, что и для смеси ТНМ/НБ (см. рис. 3). И лишь в нескольких случаях профили скорости совпали в пределах погрешности измерения. Максимальное расхождение между ними достигает 400 м/с, причем скорость детонации остается постоянной — $D = 6.79 \pm 0.02$ км/с.

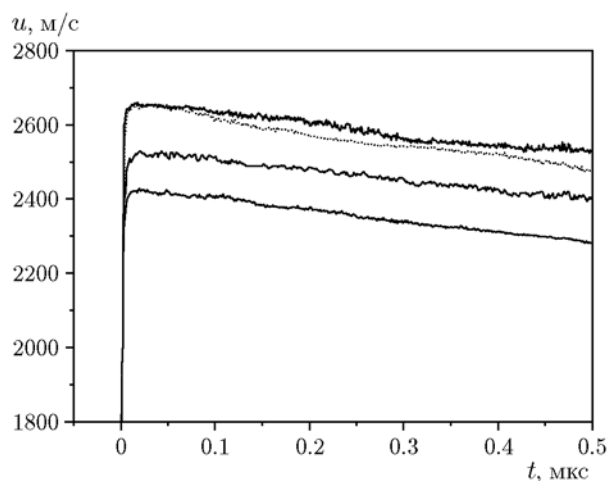


Рис. 4. Профили скорости на границе смеси ТНМ/М с водой при концентрации метанола 15 %

Столь значительный разброс экспериментальных данных может быть обусловлен несколькими причинами. Во-первых, детонационный фронт не является плоским, что может быть связано с природой инициирования жидких ВВ, с влиянием оболочки и с другими факторами, приводящими к крупномасштабному искривлению фронта. То есть плохая воспроизводимость результатов означает, что детонационная волна не является одномерной. Во-вторых, в определенном интервале концентраций детонационные волны в смесях ТНМ с разбавителями теряют устойчивость по отношению к продольным возмущениям. В этом случае разброс экспериментальных данных отражает продольные колебания скорости относительно среднего значения. И наконец, возможно, как предполагают авторы [2], это обусловлено многостадийностью химических реакций в условиях детонации подобных смесей, в результате чего энерговыделение зависит от многих факторов, влияние каждого из которых трудно определить.

Для проверки предположения о возможности нарушения одномерности течения, были проведены эксперименты, в которых профили массовой скорости регистрировались в различных точках детонационного фронта. Схема опытов показана на рис. 1. Результаты двух опытов для смеси ТНМ/М 85/15 приведены на рис. 5 (профили 1 и 2). В опыте 1 скорость измерялась на оси заряда и в двух различных

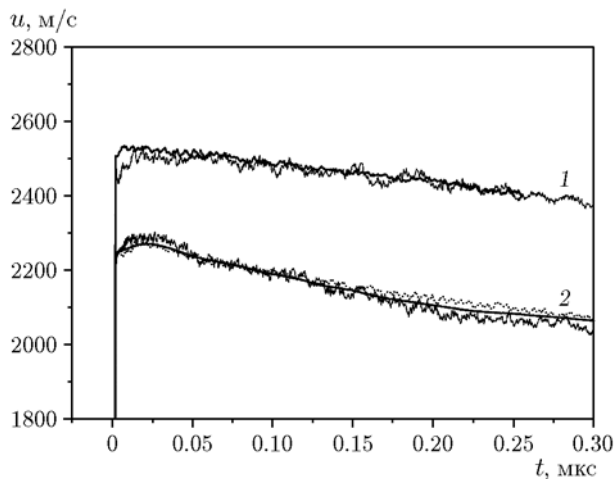


Рис. 5. Профили скорости на границе смеси ТНМ/М 85/15 с водой, регистрируемые на оси заряда и на расстоянии от центра, равном половине радиуса заряда, в опытах 1 и 2

точках, удаленных от центра на расстояние, равное половине радиуса заряда. Видно, что профили совпадают в пределах точности измерения. В опыте 2 также наблюдается хорошее совпадение двух профилей скорости, измеренных в разных точках, но разброс между результатами опытов 1 и 2 оказывается столь же значительным, как и на рис. 4. Заметные осцилляции профилей скорости, обозначенных тонкими сплошными линиями на рис. 5, связаны с использованием интерферометра с большой постоянной скоростью 1280 м/с.

Аналогичные эксперименты были проведены для смеси ТНМ/НБ. На рис. 6 представлены результаты одного из опытов при концентрации нитробензола 24 %. Как и в случае с метанолом, наблюдается хорошее совпадение профилей скорости, зарегистрированных в различных точках фронта детонационной волны. Таким образом, полученные данные показывают, что детонационный фронт является плоским и наблюдаемый разброс экспериментальных данных не связан с его крупномасштабным (порядка радиуса заряда) искривлением.

Для проверки второго предположения, о потери устойчивости детонационных волн по отношению к продольным возмущениям, необходимо в одном опыте осуществить регистрацию волновых профилей в различных сечениях образца. Если волна является пульсирующей, то все детонационные параметры должны изменяться относительно средних значений

по мере ее распространения. Поэтому расстояние между сечениями, в которых ведется регистрация течения, должно быть порядка характерного периода колебаний. Хорошая точность, с которой воспроизводится скорость детонации, может быть обусловлена тем, что база ее измерения ($60 \div 80$ мм) намного больше этого периода. В этом случае расстояние между сечениями должно быть на порядок меньше, и в проведенных экспериментах оно составляло 8 мм. Схема опыта аналогична приведенной на рис. 1, но торец оболочки, граничащей с водяным окном, выполнен в виде ступеньки, как показано на вставке рис. 7. Внутренний диаметр полипропиленовой оболочки составлял 56 мм, что позволяло исключить влияние возмущений, вызванных наличием ступеньки, на течение в сечении 2 за время регистрации. Результат эксперимента со смесью ТНМ/М 85/15 показан на рис. 7. Для наглядности профили скорости совмещены по времени, и видно, что в пределах точности измерений они совпадают. В аналогичной постановке было проведено три опыта, и во всех случаях наблюдалось хорошее согласие профилей скорости, измеренных в различных сечениях образца. Предположение, что детонационная волна на базе измерения осциллирует и полученное совпадение случайно, маловероятно. Поэтому полученные результаты позволяют утверждать, что детонационные параметры остаются постоянными по мере распространения волны вдоль заряда, т. е. течение

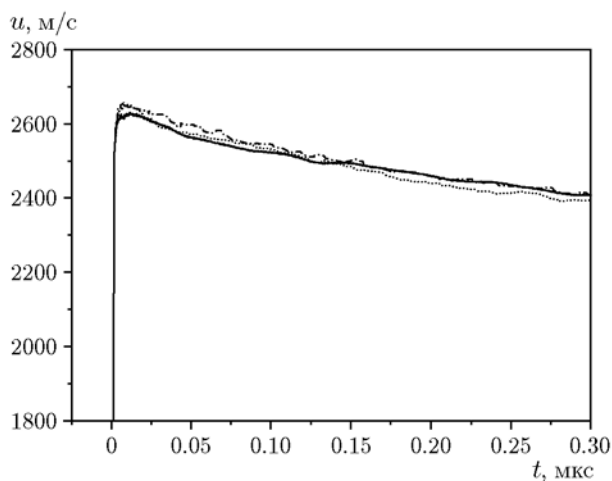


Рис. 6. Профили скорости на границе смеси ТНМ/НБ 76/24 с водой, регистрируемые на оси заряда и на расстоянии от центра, равном половине радиуса заряда

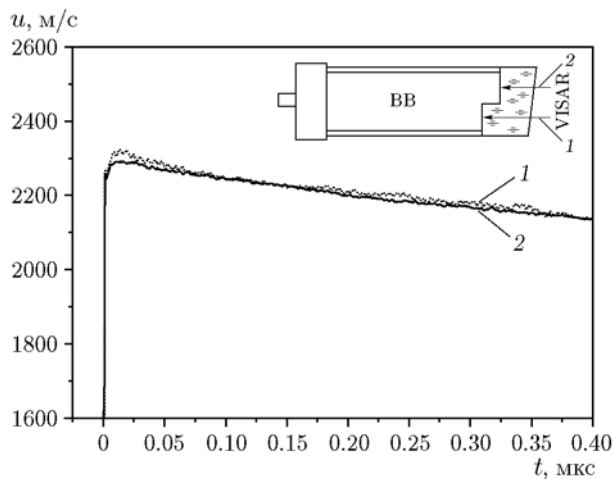


Рис. 7. Профили скорости на границе смеси ТНМ/М 85/15 с водой, регистрируемые в двух сечениях образца (на врезке — схема эксперимента)

устойчиво по отношению к продольным возмущениям.

Отсутствие продольных осцилляций и одномерность течения в исследованных детонационных волнах дают основание предположить, что плохая воспроизводимость профилей массовой скорости отражает практически равновесную возможность реализации стационарных детонационных режимов с различными значениями массовой скорости в точке Чепмена — Жуге. Возможно, это действительно обусловлено зависимостью энерговыделения от многих факторов, влияние каждого из которых трудно определить.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты экспериментов убедительно свидетельствуют о том, что в смесях ТНМ с метанолом и нитробензолом при концентрации разбавителей в интервале $10 \div 40$ % наблюдается плохая воспроизводимость профилей массовой скорости, измеренных в разных опытах при фиксированном составе ВВ. В смесях ТНМ/М 85/15 и ТНМ/НБ 76/24 расхождение абсолютных значений скорости достигает 15 %. При этом необходимо отметить, что скорость детонации остается постоянной в пределах экспериментальной погрешности, не превышающей 1 %. Выполненные эксперименты показывают, что течение в детонационных волнах является одномерным и устойчивым по отношению к продольным возмущениям. Это означает, что в каждом эксперименте реализуется стационарный детонационный режим, параметры которого отличаются от опыта к опыту.

Возможно, как уже отмечалось, наблюдаемое явление обусловлено сложной кинетикой химических реакций в смесевых ВВ в условиях детонации. Следует отметить, что это предположение согласуется с характером изменения профилей массовой скорости во времени. Действительно, в рамках классической модели детонации в точке Чепмена — Жуге химическая реакция заканчивается и детонационные параметры не зависят от кинетики, а полностью определяются термодинамическими характеристиками ВВ. На измеренных профилях массовой скорости химик отсутствует и в зоне реакции давление и массовая скорость возрастают, а не уменьшаются, как это должно быть в модели ЗНД. Более того, есть основания считать, что момент достижения скоростью мак-

сима совпадает с характерным временем реакции. В такой ситуации конечное состояние в зоне реакции может находиться как в точке Чепмена — Жуге, так и на недосжатой ветви детонационной адиабаты, что определяется, в частности, кинетикой химической реакции [24, 25]. Условие касания волновым лучом детонационной адиабаты приводит к тому, что малые отклонения от состояния Чепмена — Жуге, не вызывая заметного изменения скорости детонации, существенно влияют на давление и массовую скорость, что и наблюдается в проведенных экспериментах.

Совпадение интервала концентраций, в котором отсутствует воспроизводимость профилей массовой скорости, с интервалом, где наблюдаются неклассические режимы детонации смесей ТНМ/М и ТНМ/НБ, могут свидетельствовать, таким образом, о реализации в этих ВВ недосжатых режимов детонации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зотов Е. В.** Электроискровое инициирование жидких взрывчатых веществ. — Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2004.
2. **Апин А. Я., Воскобойников И. М., Соснова Г. С.** Протекание реакции в детонационной волне смесевых взрывчатых веществ // ПМТФ. — 1963. — № 5. — С. 115–117.
3. **Roth J. F.** The explosive properties of mixtures of tetranitromethane and nitrobenzene: a contribution in support of the hydrodynamic theory // Z. Gesamte Schiess-Sprengstoffwes. — 1941. — N 36. — S. 4–28.
4. **Utkin A. V., Mochalova V. M.** Non-classical detonation regimes of liquid high explosives // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — V. 946. — 012056. — DOI: 10.1088/1742-6596/946/1/012056.
5. **Федоров А. В., Михайлов А. Л., Меньших А. В., Назаров Д. В., Финюшин С. А., Давыдов В. А.** Об устойчивости детонационного фронта смесевых жидких ВВ: тетранитрометан — нитробензол и тетранитрометан — нитрометан // Хим. физика. — 2007. — Т. 26, № 12. — С. 34–39. — DOI: 10.1134/S1990793107060140.
6. **Fedorov A. V., Mikhaylov A. L., Men'shikh A. V., Nazarov D. V., Finyushin S. A., Davydov V. A.** On the stability of the detonation wave front in the high explosive liquid mixture tetranitromethane/nitrobenzene // J. Energ. Mater. — 2010. — V. 28, N 1. — P. 205–215. — DOI: 10.1080/07370651003639371.
7. **Mochalova V. M., Utkin A. V., Rykova V. E., Koldunov S. A., Zhukov A. N.** Detonation properties of the mixture of tetranitromethane/nitrobenzene // Combust. Flame. —

2019. — V. 208. — P. 158–163. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.06.033.
8. **Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К.** Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
 9. **Щелкин К. И.** Два случая неустойчивого горения // ЖЭТФ. — 1959. — Т. 36, № 2. — С. 600–606.
 10. **Щелкин К. И., Трошин Я. К.** Газодинамика горения. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.
 11. **Зайдель Р. М., Зельдович Я. Б.** Одномерная неустойчивость и затухание детонации // ПМТФ. — 1963. — № 6. — С. 59–65.
 12. **Щелкин К. И.** Неустойчивость горения и детонации газов // Успехи физ. наук. — 1965. — Т. 87, вып. 2. — С. 273–302.
 13. **Erpenbeck J. J.** Stability of idealized one-reaction detonations // Phys. Fluids. — 1964. — V. 7, N 5. — P. 684–696. — DOI: 10.1063/1.1711269.
 14. **Lee H. I., Stewart D. S.** Calculation of linear detonation instability one-dimensional instability of plane detonation // J. Fluid Mech. — 1990. — V. 216. — P. 103–132. — DOI: 10.1017/S0022112090000362.
 15. **Clavin P., He L.** Stability and nonlinear dynamics of one-dimensional overdriven detonations in gases // J. Fluid Mech. — 1996. — V. 306. — P. 353–378. — DOI: 10.1017/S0022112096001334.
 16. **Sharpe G. J.** Linear stability of idealized detonation // Proc. Roy. Soc. Lond. A. — 1997. — V. 453. — P. 2603–2625. — DOI: 10.1098/rspa.1997.0139.
 17. **Watt S. D., Sharpe G. J.** One-dimensional linear stability of curved detonations // Proc. Roy. Soc. Lond. A. — 2004. — V. 460. — P. 2551–2568. — DOI: 10.1098/rspa.2004.1290.
 18. **Tumin A.** Initial-value problem for small disturbances in an idealized one-dimensional detonation // Phys. Fluids. — 2007. — V. 19. — 106105. — DOI: 10.1063/1.2793156.
 19. **Short M., Anguelova I. I., Aslam T. D., Bdzil J. B., Henrick A. K., Sharpe G. J.** Stability of detonations for an idealized condensed-phase model // J. Fluid Mech. — 2008. — V. 595. — P. 45–82. — DOI: 10.1017/S0022112007008750.
 20. **Зельдович Я. Б.** К теории распространения детонации в газообразных системах // ЖЭТФ. — 1940. — Т. 10, вып. 5. — С. 542–568.
 21. **Mochalova V., Utkin A.** Determination of detonation parameters for liquid high explosives // AIP Conf. Proc. — 2012. — V. 1426, N 1. — P. 303–306. — DOI: 10.1063/1.3686279.
 22. **Мочалова В. М., Уткин А. В., Гаранин В. А., Торунов С. И.** Исследование структуры детонационных волн в тетранитрометане и его смесях с метанолом // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 3. — С. 95–100.
 23. **Bourasseau E., Dubois V., Desbiens N., Maillet J. B.** Molecular simulations of Hugoniot of detonation product mixtures at chemical equilibrium: Microscopic calculation of the Chapman — Jouguet state // J. Chem. Phys. — 2007. — V. 127, N 8. — 084513. — DOI: 10.1063/1.2766939.
 24. **Hirshfelder J. O., Curtiss C. F.** Theory of detonations. I. Irreversible unimolecular reaction // J. Chem. Phys. — 1958. — V. 28, N 6. — P. 1130–1147. — DOI: 10.1063/1.1744357.
 25. **Фикетт У.** Введение в теорию детонации. — М.: Мир, 1989.
 26. **Харитон Ю. Б.** О детонационной способности взрывчатых веществ // Вопросы теории взрывчатых веществ. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. — Кн. 1. — С. 7–28.
 27. **Ананьин А. В., Колдунов С. А., Гаранин В. А., Торунов С. И.** Детонационные характеристики разбавленных жидких взрывчатых веществ: смеси тетранитрометана с метанолом // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 122–126.

Поступила в редакцию 22.05.2020.

После доработки 30.06.2020.

Принята к публикации 07.07.2020.