

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗБАВЛЕННЫХ ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ: СМЕСИ НИТРОМЕТАНА С МЕТАНОЛОМ

С. А. Колдунов, А. В. Ананьин, В. А. Гаранин, В. А. Сосиков,
С. И. Торунюв

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

Исследуется детонация в смесях нитрометана с метанолом в качестве инертного (невзрывчатого) разбавителя. В экспериментах по подрыву смесей в стальных трубах различного диаметра получена информация о влиянии степени разбавления на детонационную способность. При неустойчивом фронте детонации во всех исследуемых смесях регистрировались профили массовой скорости с характерным для детонационных волн хемпином. Это позволяло выделить состояние Чепмена — Жуге и получить достаточно полный набор детонационных параметров. Установлена зависимость давления в продуктах детонации от концентрации метанола, которая необходима, в частности, для нахождения истинного (абсолютного) предела распространения детонации по концентрации разбавленных жидких взрывчатых веществ методом, предложенным и обоснованным А. Н. Дрёминым. Обращено внимание на противоречие некоторых результатов с одномерной теорией детонации.

Ключевые слова: детонация, нитрометан, концентрационный предел, электромагнитный метод.

ВВЕДЕНИЕ

Разбавление жидкого взрывчатого вещества (ВВ) инертной (невзрывчатой) жидкостью приводит к падению скорости (параметров) детонации и в итоге к потере способности такой смеси детонировать в реальных условиях [1–3 и др.]. Эта ситуация вполне прогнозируема с энергетической точки зрения: с ростом содержания инертного компонента в смеси уменьшается запас ее химической энергии. При некоторой концентрации разбавителя этой энергии становится недостаточно, чтобы обеспечить распространение детонационного процесса в самоподдерживающемся режиме. По аналогии с взрывчатыми газовыми смесями можно говорить о наступлении предела распространения детонации по концентрации [4]. Однако сугубо энергетический подход не может привести к пониманию механизма такого предела, требуется учет всей специфики детонационного превращения жидких ВВ. Согласно представлениям, которые последовательно развивал А. Н. Дрёмин, в основе всех известных пределов детонации жидких (гомогенных) энергосодержащих материалов (пределы инициирования, распростране-

ния детонации, кинетической неустойчивости фронта, пределы по концентрации) лежит явление «срыва» химической реакции тепловыделения (теплого взрыва) волнами разрежения, которые неизбежно сопровождают детонационный процесс. Возможность срыва реакции связывается с сильной зависимостью скорости тепловыделения от температуры, т. е. в случае ударно-волновых процессов — от давления ударного сжатия и его спада при разрежении. Это означает, что природа всех указанных пределов — кинетическая. Энергетический фактор при прочих равных условиях может, очевидно, оказывать влияние на количественные характеристики соответствующего предела, например, на критический диаметр детонации, размер неоднородностей на детонационном фронте, соотношение компонентов вблизи предела детонации по концентрации.

В недавно опубликованной работе [5] А. Н. Дрёмин высказал соображение о том, что с помощью используемых в настоящее время методов не может быть установлен истинный предел детонации по концентрации. Такому пределу соответствует содержание невзрывчатого разбавителя, выше которого смесь будет неспособна детонировать в принципе, несмотря на сколь угодно благоприятные условия для распространения процесса (бесконечный диаметр,

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект № 3394).

жесткая оболочка и т. д.). В [5] предложен также метод определения содержания разбавителя, которое отвечает истинному пределу детонации по концентрации: предельная концентрация находится по пересечению зависимостей давления продуктов детонации p_{CJ} и критического давления ударно-волнового инициирования p_{cr} от содержания инертного разбавителя C . То есть достижение истинного предела по концентрации определяется условием $p_{CJ} = p_{cr}$. При этом отмечается, что устанавливаемая таким способом предельная концентрация должна превышать значения, определенные какими-либо другими известными методами, в частности по влиянию степени разбавления ВВ на критический диаметр детонации.

Одной из целей настоящей работы является получение зависимости $p_{CJ}(C)$, а также данных по детонационной способности для смесей нитрометана (НМ) с метанолом (М). Результаты имеют непосредственное отношение к обоснованию существования и возможности определения истинного (абсолютного) предела детонации по концентрации в соответствии с введением этого понятия А. Н. Дрёминым. В этой связи в дальнейшем предполагается получение аналогичной информации и для других смесей. Однако исследования в этом направлении обусловлены не только практической необходимостью в обосновании критериев соответствующих пределов и методов их определения, но и представляют интерес с точки зрения расширения и углубления существующих представлений собственно о механизме детонации.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Задачу определения по возможности полного набора параметров, характеризующих распространение детонационного процесса в конденсированных средах, нельзя считать окончательно решенной. С этой точки зрения использование в настоящей работе электромагнитного метода записи профиля массовой скорости $u(t)$ ударных и детонационных волн представляется наиболее целесообразным. Электромагнитный метод давно нашел широкое и эффективное применение при исследовании твердых ВВ, отличающихся многообразием исходной структуры и степенью неоднородности зарядов (литые, прессованные, насыпные) [1]. На осциллограммах профиля детонационных волн $u(t)$ регистрирует-

ся характерный пик, который отождествляется с «химпиком», предсказанным гидродинамической теорией Зельдовича — Неймана — Дёринга (ЗНД), и который впервые был выявлен в конденсированных ВВ методом «откола» [6]. Регистрация в электромагнитных измерениях профиля с пиком в зарядах различной структуры рассматривалась как доказательство справедливости и, в известной степени, универсальности теории ЗНД по отношению к структуре и состоянию вещества [7]. В этом случае положение точки излома (перегиба) на осциллограмме $u(t)$ соответствует состоянию Чепмена — Жуге, что позволяет получать значения массовой скорости продуктов детонации u_{CJ} и времени превращения вещества во фронте детонационной волны t_{CJ} . Измеряя скорости детонации D с помощью ступенчатого электромагнитного датчика, можно рассчитать давление продуктов детонации по формуле сохранения импульса: $p_{CJ} = \rho_0 D u_{CJ}$.

В сравнении с изучением твердых ВВ количество работ, в которых электромагнитный метод целенаправленно привлекался бы для соответствующих исследований в жидких (гомогенных) средах, невелико. Экспериментальные сведения о параметрах детонации многих представляющих практический интерес индивидуальных и смесевых жидких ВВ ограничиваются, по существу, данными по скорости детонации, поскольку этот параметр наиболее легко поддается измерению. К объяснению такой ситуации можно подходить с самых разных точек зрения. Обратим внимание на два фактора, которые определяют отличие в поведении твердых и жидких ВВ при ударно-волновых воздействиях, а именно на исходную гомогенность (физическую однородность) жидкой среды и сильную (аррениусовскую) зависимость скорости объемной реакции химического тепловыделения от температуры. В совокупности они вызывали опасения, что взаимодействие детонационного фронта с металлической поверхностью электромагнитного датчика (инородного тела вообще) может существенно повлиять на процесс энерговыделения и быть причиной искажения записей $u(t)$ с точки зрения их соответствия истинному профилю детонационной волны.

Этому вопросу было уделено, в свое время, внимание в работе [8] и сделан вывод, что подобного рода влияние можно свести к минимуму надлежащим выбором толщины датчи-

ка. В настоящей работе использовались датчики из алюминиевой фольги различной толщины: 120 (обычно используемые в опытах с зарядами твердых ВВ), 50, 30, 20 и 10 мкм. На основании проведенных экспериментов был сделан вывод, что наиболее достоверными данными следует считать результаты обработки осциллограмм, которые получены с датчиками толщиной $30 \div 50$ мкм.

Схема экспериментальной сборки приведена на рис. 1. В основном использовались оболочки из нержавеющей (немагнитной) стали, внутренний диаметр оболочки $d = 50$ мм, толщина стенок 3 мм. Надежное инициирование (с небольшим пересжатием) осуществлялось зарядом прессованного тротила диаметром 60 мм через слой плексигласа толщиной 6 мм. Датчики с площадью рабочей поверхности 10×10 мм устанавливались на расстоянии $120 \div 130$ мм от плексигласа, база измерения скорости детонации составляла $20 \div 25$ мм. Использование металлических оболочек в электромагнитной методике в принципе не желательно. В настоящих исследованиях их применение вызвано необходимостью подрыва как можно меньшего количества вещества между полюсами стационарной электромагнитной установки. Сталь-

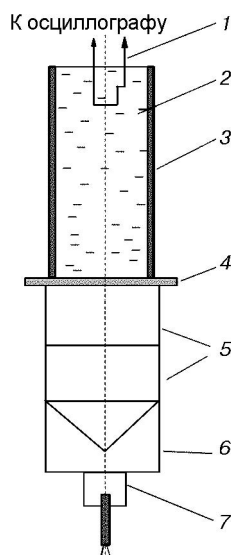


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки по измерению параметров детонации:

1 — ступенчатый электромагнитный датчик, 2 — исследуемая смесь, 3 — оболочка, 4 — экран из плексигласа, 5 — прессованный тротил, 6 — взрывная линза, 7 — таблетка под электродетонатор

ные оболочки относительно небольшого диаметра (50 мм) обеспечивали устойчивое (без затухания) прохождение детонационного процесса во всех исследуемых смесях, детонационная способность которых по мере приближения к концентрационному пределу должна только падать. В оболочках из медной фольги толщиной 0.2 мм (для минимизации повреждений) смесь НМ/М 75/25 оказалась уже неспособной к устойчивой детонации. В стеклянных оболочках (диаметр 56 мм, толщина $3 \div 4$ мм) незатухающий процесс наблюдался только в наименее разбавленной смеси НМ/М 90/10. Отметим, что изменение материала оболочек не влияло на регистрируемые в опыте значения скорости устойчивой детонации. При этом эксперименты в стеклянной оболочке позволяли учесть возможное влияние на результаты измерений определенного типа наводок, связанных с использованием металлических оболочек. В частности, на осциллограммах перед записью основного сигнала, т. е. до прихода фронта процесса непосредственно к рабочей поверхности датчика, как правило, наблюдалось отклонение луча осциллографа (Tektronix-TDS3034B) от исходного положения. Это обстоятельство вносило некоторую неопределенность в оценку амплитуды сигналов, определяющих значения соответствующих массовых скоростей. Опыты со стеклянными оболочками способствовали решению этого вопроса.

При исследовании детонационной способности определялись предельные для распространения детонации диаметры при подрыве смесей различной концентрации в стальных трубах внутреннего диаметра $d = 22, 30, 50, 80$ мм с толщиной стенок 3 мм. Оболочки заполнялись на всю исходную длину — от $15d$ до $5d$. Факт прохождения или затухания детонации в зарядах диаметром $d \leq 50$ мм устанавливался в основном с помощью щелевой фоторегистрации процесса с торца заряда. Для инициирования смесей в оболочках диаметром 22 и 30 мм использовались таблетки тротила диаметром 40 мм (через слой плексигласа толщиной 6 мм). В опытах с зарядом диаметром 80 мм оболочка устанавливалась на железной массивной плите и заполнялась исследуемой смесью. Дно оболочки (дюраль толщиной 6 мм) находилось в непосредственном контакте с плитой. Иницирующий заряд диаметром 80 мм из двух таблеток тротила и взрывной линзы погружался (в полиэтиленовой пленке)

примерно на $15 \div 20$ мм в смесь. Соответствующие выводы делали по результатам измерения скорости фронта детонации с использованием электроконтактных датчиков, которые располагались вдоль образующей с внешней стороны оболочки ближе к ее донной части (две-три базы измерения по $50 \div 60$ мм). Характер воздействия на донную часть и характер разрушения оболочки служили дополнительной информацией.

В работе использовались нитрометан (плотность 1.136 г/см³, показатель преломления 1.3816) и метанол (0.793 г/см³ и 1.3288 соответственно). Измеренная скорость детонации нитрометана составила 6.27 ± 0.02 км/с. Температура смесей в экспериментах поддерживалась на уровне $18 \div 22$ °С. Напряженность магнитного поля в опытах на стационарной электромагнитной установке находилась в пределах $315 \div 320$ Э и контролировалось в каждой серии опытов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам испытаний смесей на детонационную способность (рис. 2) можно сделать вывод, что смеси НМ/М сохраняют способность детонировать при содержании метанола, по крайней мере, до $40 \div 42$ %. Известно, что фронт детонации в чистом нитрометане не является гладким. На рис. 3 приведена щелевая фоторазвертка распространения фронта детонации в смеси НМ/М 65/35 в стальной оболочке диаметром 50 мм. Видно, что фронт неустойчив. При этом во всех исследуемых смесях на осциллограммах $u(t)$ регистрировался характерный для профиля детонационной волны пик (рис. 4), что позволяет выделить состояние Чепмена — Жуге и получить достаточно полный набор параметров детонационного процесса, которые приведены в таблице. Данные

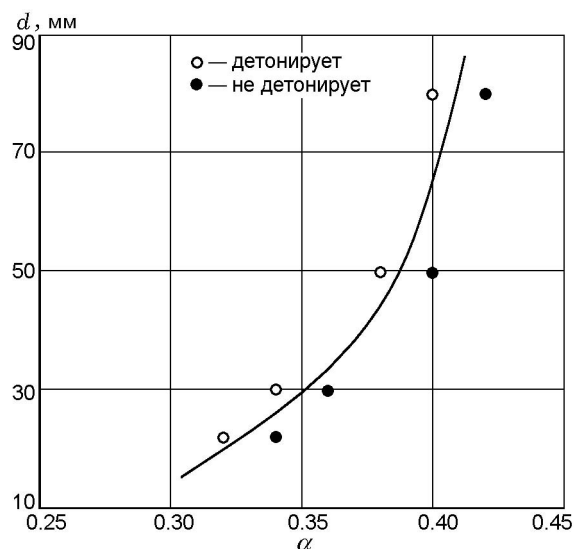


Рис. 2. Результаты опытов по изучению детонационной способности смесей НМ/М в стальной оболочке толщиной 3 мм

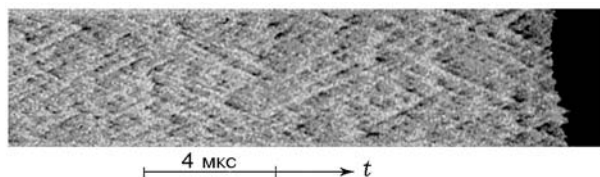


Рис. 3. Щелевая фоторазвертка распространения фронта детонации в смеси НМ/М 65/35: заряд в стальной оболочке длиной 300 мм; фрагмент записи на участке около 90 мм от торца заряда

по массовой скорости $u_{СД}$ представлены средними значениями по результатам 3–6 опытов для каждой смеси при максимальном отклонении от измеренных в опыте не более ± 1.5 %.

Значения скоростей детонации взяты непосредственно из зависимости $D = 6.25 -$

Параметры детонации смесей НМ/М

Состав НМ/М	ρ_0 , г/см ³	D , км/с	$u_{СД}$, км/с	$p_{СД}$, ГПа	$t_{СД}$, мкс	n	a , мм
90/10	1.088	5.91	1.46	9.4	$0.13 \div 0.20$	3.0	$0.58 \div 0.89$
80/20	1.044	5.58	1.39	8.1	$0.14 \div 0.22$	3.0	$0.59 \div 0.92$
75/25	1.024	5.41	1.38	7.6	$0.20 \div 0.28$	2.9	$0.81 \div 1.13$
70/30	1.005	5.25	1.36	7.2	≈ 0.30	2.9	≈ 1.17
65/35	0.985	5.08	1.35	6.8	≈ 0.30	2.8	≈ 1.12

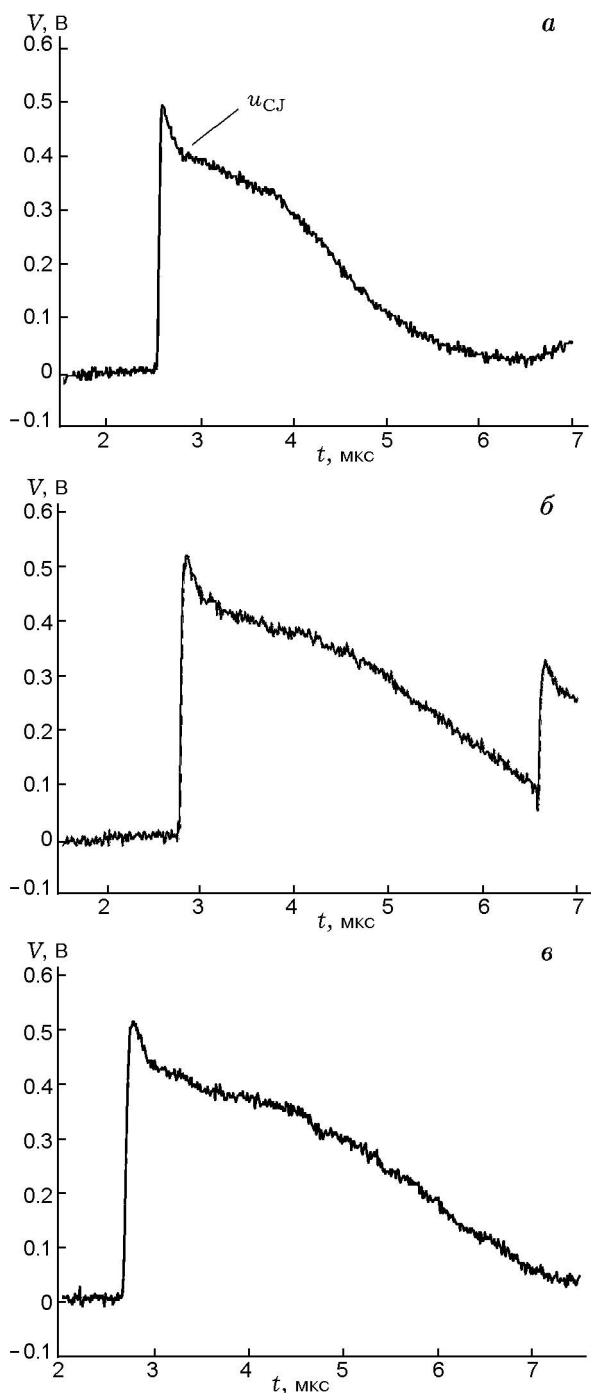


Рис. 4. Осциллограммы записи массовой скорости $u(t)$ в смеси НМ/М 70/30 (а, б) и НМ/М 65/35 (в):

а — датчик из алюминиевой фольги толщиной 30 мкм, б — ступенчатый датчик толщиной 50 мкм, в — датчик толщиной 50 мкм

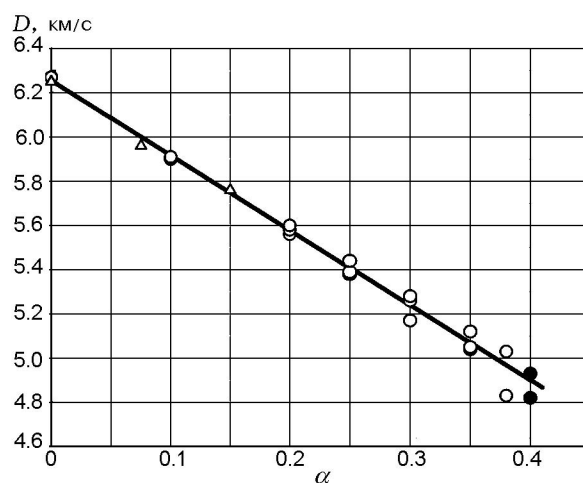


Рис. 5. Зависимость скорости детонации от массовой доли метанола:

○ — заряды в стальной оболочке диаметром 50 мм, ● — в стальной оболочке диаметром 80 мм (результаты электроконтактных измерений); Δ — данные [3]

3.39 α [км/с], которой аппроксимируются результаты измерений (α — массовая доля разбавителя). Эта зависимость вместе с данными эксперимента приведена на рис. 5 (данные для смесей НМ/М 62/38 и 60/40, близких к пределу детонации по концентрации, при аппроксимации не учитывались). Установленная для смесей НМ/М экспериментальная зависимость $D(\alpha)$ проходит ниже расчетных, в частности приведенной в [3], а также рассчитанной по методике, предложенной в [9]. Вблизи предела детонации по концентрации расхождение расчетных и экспериментальных данных может превышать 0.5 км/с. Давление продуктов детонации p_{CJ} вычислено по формуле сохранения импульса с использованием приведенных в таблице значений ρ_0 , D и u_{CJ} . Изменение давления p_{CJ} с ростом содержания метанола в смеси хорошо аппроксимируется зависимостью

$$p_{CJ}(\alpha) = 11.26 - 20\alpha + 21\alpha^2 \text{ [ГПа]}.$$

Показатель политропы $n = D/u_{CJ} - 1 \approx 3.0$ находится в пределах значений, общепринятых для продуктов детонации конденсированных ВВ. Была выполнена оценка ширины детонационного фронта в соответствии с формулой гидродинамической теории $a = (D - u_{CJ})t_{CJ}$. Оставляя без комментариев приведенные в таблице результаты этой оценки, отметим, что характерный размер любой структурной неоднородности детонационного фронта в направле-

нии его распространения, очевидно, не должен превышать найденные значения a .

При анализе результатов было обнаружено, что волновые скорости D_{sh} , получаемые подстановкой значений массовых скоростей на фронте осциллограмм профиля детонационной волны $u(t)$ в соответствующие ударные адиабаты, оказались заметно ниже скоростей детонации D , наблюдаемых в эксперименте: примерно на 400 м/с для смеси состава 90/10 и на 800 м/с для смеси 65/35. (Использовались ударные адиабаты смесей, полученные из обобщенной зависимости для ударной сжимаемости органических жидкостей: $D_{sh} = 1.2c_0 + 1.7u$ [10], где c_0 — объемная скорость звука, которая рассчитывалась для каждой концентрации аддитивным методом по известным значениям для НМ и М: 1 346 и 1 123 м/с.) Различие скоростей при наблюдаемом «завале» фронта осциллограмм (времени достижения максимального значения скорости) $0.05 \div 0.12$ мкс не может быть существенно уменьшено за счет использования в расчетах значений массовых скоростей, полученных экстраполяцией к моменту времени $t = 0$. Этот факт входит в противоречие с одномерной теорией детонации ЗНД, согласно которой передняя граница фронта детонационной волны представляет собой гладкий фронт ударного сжатия, распространяющийся с детонационной скоростью.

Разбавление жидких ВВ невзрывчатой жидкостью приводит к появлению пульсаций на фронте, т. е. к негладкости и, соответственно, неоднородности детонационного фронта. Смеси НМ/М не являются исключением. Представляет интерес, в какой степени именно это обстоятельство может иметь отношение, например, к расхождению экспериментальных и расчетных данных по скорости детонации D , но более всего — насколько оно может быть причиной указанного выше «несоответствия» скоростей детонационного фронта массовым скоростям на фронте детонационной волны. Отметим в этой связи, что вопрос о правомерности или степени применимости одномерной теории ЗНД к детонации жидких ВВ с кинетически неустойчивым негладким фронтом (правило отбора скорости и определение параметров детонации, предельные явления) неоднократно рассматривался (см., например, [1, 11, 12 и др.]) и не утратил актуальности до настоящего времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование в настоящих исследованиях электромагнитного метода записи профиля массовой скорости детонационных волн позволило получить достаточно большой объем информации о параметрах, характеризующих распространение процесса в смесях НМ/М с различным содержанием метанола в качестве инертного (невзрывчатого) разбавителя. Это оказалось возможным благодаря регистрации электромагнитным датчиком характерной для профиля детонационной волны области повышенных параметров потока, т. е. химпика, предсказанного гидродинамической теорией. Следует иметь в виду, что в сравнении с рядами твердых, физически неоднородных ВВ получение в подобных экспериментах надежного результата в жидких (гомогенных) средах усложняется. Поэтому сам факт регистрации в исследованных смесях типичного для детонации профиля волны приобретает важное и во многих отношениях принципиальное значение. Именно в этом случае представляется возможным выделить состояние Чепмена — Жуге, которое согласно теории определяет состояние продуктов детонации и ее параметры в целом как термодинамического процесса. В частности, установлена зависимость давления продуктов детонации от концентрации метанола $p_{CJ}(C)$, которая необходима для нахождения истинных пределов детонации по концентрации при разбавлении жидких ВВ и вообще энергосодержащих жидких смесей и растворов. Однако в случае жидкостей с кинетической природой неустойчивости детонационного фронта сохраняется вопрос о пространственной структуре и роли состояния Чепмена — Жуге в механизме распространения самоподдерживающегося режима, а отсюда и о степени достоверности в трактовке результатов, получаемых теми или иными (в том числе электромагнитным) методами, причем и при выборе метода, и при трактовке результатов во многом руководствуются классическим одномерным вариантом гидродинамической теории детонации. Имеются основания полагать, что определенную роль в решении этих вопросов (или, по крайней мере, в их большей конкретизации) могут сыграть результаты исследований, связанных с установлением для жидких энергосодержащих смесей истинных (абсолютных) пределов детонации по концентрации в соответствии с обоснованием А. Н. Дрёминым су-

ществования такого предела и метода его определения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
2. Kusakabe M., Fujiwara Sh. Effects of liquid diluents of detonation propagation in nitromethane // Proc. of 6th Symp. (Intern.) on Detonation. — San Diego, California, USA, 1976. — P. 133–142.
3. Presles H. N., Brochet C., Kato Y., Tanaka K. Influence of additives on nitromethane detonation characteristics // Proc. of 7th Symp. (Intern.) on Detonation. — Annapolis, USA, 1981. — P. 583–588.
4. Нестеренко Д. А., Еременко Л. Т. Концентрационные пределы детонации жидких гомогенных смесевых систем // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 4. — С. 145–148.
5. Dremmin A. N. On the limit of detonation on concentration of liquid explosives' mixtures with nonexplosive diluents // Proc. of 13th Symp. (Intern.) on Detonation. — Norfolk, USA, 2006. — P. 720–724.
6. Duff R. E., Houston E. Measurement of Chapman — Jouguet pressure and reaction zone length in a detonating high explosive // J. Chem. Phys. — 1955. — V. 23, N 7. — P. 1268–1272.
7. Веретенников В. А., Дремин А. Н., Розанов О. К., Шведов К. К. О применимости гидродинамической теории к детонации конденсированных ВВ // Физика горения и взрыва. — 1967. — Т. 3, № 1. — С. 3–10.
8. Дремин А. Н., Розанов О. К., Коба И. Г. Исследование времени реакции при детонации жидких ВВ электромагнитным методом // Физика горения и взрыва. — 1965. — Т. 1, № 3. — С. 93–98.
9. Пепекин В. И., Лебедев Ю. А. Критерий оценки параметров детонации // Докл. АН СССР. — 1977. — Т. 234, № 6. — С. 1391–1394.
10. Воскобойников И. М., Афанасенков А. Н., Богомолов В. Н. Обобщенная ударная адиабата органических жидкостей // Физика горения и взрыва. — 1967. — Т. 3, № 4. — С. 585–593.
11. Дремин А. Н., Нелин В. М., Трофимов В. С. Структура неустойчивого фронта детонации в жидких ВВ // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 3. — С. 82–92.
12. Дремин А. Н. Открытия в исследовании детонации молекулярных конденсированных взрывчатых веществ в XX веке // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 31–44.

Поступила в редакцию 28/IV 2009 г.