

энергетически неотличимом от состояния равновесных электронов. Это позволяет считать распределение по энергиям электронов в пламени, мало отличающимся от максвелловского, а величины шумовой и электронной температур — совпадающими между собой.

Следует отметить, что даже при значительном отклонении функции распределения от максвелловской шумовая температура является лучшим показателем средней энергии электронов, нежели электронная температура, полученная зондовым методом [5]. Кроме того, применение зондовой методики для измерения электронной температуры пламени накладывает ряд ограничений, связанных с температурой зонда, чистотой поверхности и др. Указанные факторы не играют роли при измерениях шумовой температуры пламени.

*Сибирский технологический институт,
Красноярск*

*Поступила в редакцию
16/VIII 1976*

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. С. Иващенко, Ю. Г. Коробченко, Т. С. Бондаренко. ФГВ, 1975, 11, 6, 825.
2. А. Ван-дер-Зил. Флуктуации в радиотехнике и физике. М.—Л., ГЭИ, 1958.
3. P. Parzen, L. Goldstein. Phys. Rev., 1950, 79, 2, 190.
4. Г. И. Епифанов. Физические основы микроэлектроники. М., «Сов. радио», 1971.
5. R. A. Messenger. A. van der Ziel. Physica, 1970, 47, 1, 64.

ТОНКАЯ СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА ЖВВ

Г. В. Кришкевич

Одномерная теория детонации Я. Б. Зельдовича [1] представляет детонационную волну, как аддитивный комплекс ударной волны, идущей по невозмущенному ВВ и протекающей за ней химической реакции, которая поддерживает энергетически ударную волну. Теоретически неустойчивость такого одномерного режима рассмотрена в [2—4]. Экспериментальные исследования детонации в газах [5, 6] выявили пульсирующий (на пределе детонации — спиновый) ее характер — ударная волна детонационного комплекса оказалась сложной по структуре. Исследования детонационного фронта в жидких взрывчатых веществах (ЖВВ) [7] показали, что во многих случаях детонационный фронт в ЖВВ, так же как и в газах, имеет сложную структуру, которая не описывается одномерной теорией. Мелкомасштабность такой структуры фронта затрудняет ее количественный анализ и не всегда имеется возможность однозначно определить характер детонации (пульсирующий или одномерный).

Методика исследования тонкой структуры детонационного фронта [8, 9], в которой информацию о структуре фронта несет отраженный от него луч света, позволила обнаружить очень мелкие неоднородности $(\Delta z^2)^{1/2} \approx 10^{-5}$ см по нормали к фронту на фронте нормальной детонации в жидком ВВ — стехиометрической смеси азотной кислоты и дихлорэтана [9]. При такой «шероховатости» фронта отражение света от него носит волновой характер, когда присутствуют компоненты зеркального и диффузного отражения, суммарная интенсивность которых равна интенсивности регулярного отражения от гладкого фронта. В [7] по диффузному характеру отражения света от детонационного фронта

сделан качественный вывод о наличии мелкомасштабных неоднородностей на детонационном фронте в нитрометане, смеси его с ацетоном, а по зеркальному характеру отражения — об одномерном режиме детонации в тетранитрометане.

В данной работе методом [9] определен характерный размер неоднородностей на детонационном фронте в нитрометане и его смеси с ацетоном (75:25 по объему)¹, исследуется гладкость детонационного фронта в тетранитрометане с разрешающей способностью $2 \cdot 10^{-6}$ см по нормали к фронту.

Постановка эксперимента

На рис. 1, *а* представлена схема эксперимента. Исследуемое ЖВВ 3 через экран 2 (оргстекло) контактирует с зарядом ВВ 1, создающим в нем детонационную или ударную волну. Под углом к фронту детонации 4 (который задается геометрией толуоловой призмы 5 со стеклянными гранями) располагается взрывной источник света — стакан с аргоном 6, где ударная волна создается зарядом ВВ 7. Щель *S* на торце источника света, расположенная нормально плоскости рисунка, вырезает пучок света *I*. Последний, отражаясь от оптических границ, распадается на несколько пучков *II—IV*, попадающих в объектив фоторегистратора. Проходя через вторую щель, расположенную в камере СФР перпендикулярно щели *S*, эти пучки попадают на вращающееся зеркало СФР, которое разворачивает их во времени на фотопленке.

Взрывы главного 1 и вспомогательного 7 зарядов ВВ производятся так, чтобы ударная волна в аргоне начала светиться несколько раньше, чем в экране 2 начнет распространяться ударная волна. При этом на фотохронограмме (рис. 1, *б*) первоначально будет регистрироваться отражение от неподвижных оптических границ — линии *II* и *IV*, соответствующие пучкам *II* и *IV* (рис. 1, *а*). При входе ударной волны в экран (в данном случае — оргстекло) падающий пучок света отражается от ударного фронта (линия 8 на рис. 1, *б*). При входе ударной волны в нитрометан в течение времени индукции взрыва τ ЖВВ ведет себя как инертное вещество — свет отражается от ударного фронта в ЖВВ (линия 9 на рис. 1, *б*, переходящая в размытую линию 10 — отражение от детонационного фронта).

Как видно из фотохронограммы, картина преддетонационного режима схожа с развитием детонации в порошкообразных ВВ малой плотности [10]. Фронт догона ударной волны в нитрометане детона-

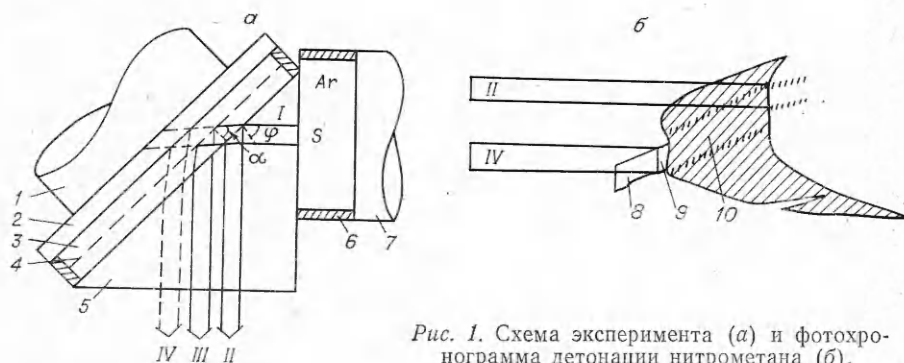


Рис. 1. Схема эксперимента (*а*) и фотохронограмма детонации нитрометана (*б*).

¹ Далее везде смесь нитрометана с ацетоном используется в таком соотношении.

ционной волной, идущей по уже сжатому нитрометану (сверхскоростная детонация), отмечаемому по появлению собственного свечения детонации, имеет седловидную форму — детонация зарождается на некотором расстоянии от оси заряда ЖВВ. Всплески зеркального отражения света от детонационного фронта вызваны отражением света от пересеченной детонационной волны при догоне сверхскоростной детонацией ударной волны в нитрометане.

Качественно (размыта или нет линия 10) фотохронограмма дает ответ о наличии или отсутствии на фронте волны неоднородностей $(\overline{\Delta z^2})^{1/2} \gg \overline{\lambda}/4\pi$, $\overline{\lambda}$ — среднее значение длины волны источника света.

Для количественной оценки шероховатости по нормали к детонационному фронту необходимо знать отношение [9]

$$I/I_0 = \exp[-4(2\pi/\overline{\lambda})^2 \overline{\Delta z^2} \cos^2 \alpha],$$

где I и I_0 — соответственно интенсивность света, отраженного под углом зеркального отражения от шероховатого и гладкого фронтов; α — угол падения света на фронт. Средний период шероховатостей \overline{h} (размер вдоль фронта) определяется из полученной картины диффузного отражения [9]

$$\overline{h} = \text{const}(\overline{\lambda/x}), \quad \overline{x} = \frac{\int_0^{x_m} I(x) x dx}{\int_0^{x_m} I(x) dx},$$

где значения константы определяются оптическими параметрами регистрирующей системы.

В эксперименте регистрируется величина I (интенсивность луча III рис. 1, а); интенсивность I_0 можно найти, зная показатель преломления n ударно-сжатого ЖВВ.

Показатель преломления ударно-сжатого нитрометана, смеси нитрометана с ацетоном, тетранитрометана

Представленная на рис. 1 схема эксперимента позволяет определить коэффициент отражения света R от фронта гладкой ударной или детонационной волны. Для этого количественно сопоставляется интенсивность отраженного от фронта волны светового потока I_3 (луч III и линия 9 на рис. 1) с интенсивностью света I_2 (луч II), отраженного от оптической границы с известной отражательной способностью:

$$I_3/I_2 = R[1 - R^0(\varphi)]^2/R^0(\varphi). \quad (1)$$

При работе с неполяризованным светом (как в настоящем случае) соотношение (1) выполняется с хорошей точностью при углах φ , близких к углу Брюстера. При иных углах расчет ведется для каждого компонента смешанного света в отдельности:

$$I_3/I_2 = \frac{R_{\perp}(1 - R_{\perp}^0)^2 + R_{\parallel}(1 - R_{\parallel}^0)^2}{R^0}.$$

В этом случае строится семейство линий $R=f(n_{21}, \varphi)$, где n_{21} — относительный показатель преломления оптической границы сжатого и несжатого вещества, и методом последовательных приближений находится значение R , дающее экспериментально найденное отношение I_3/I_2 . Затем на основе известных соотношений Френеля и Снеллиуса находится показатель преломления n сжатого ЖВВ.

На рис. 2 приведены зависимости показателя преломления ударно-сжатых исследуемых ЖВВ от плотности ρ ($\rho = \sigma \rho_0$, σ — степень сжатия), полученные по экспериментально найденным коэффициентам отражения R описанным выше методом, а также экспериментальные данные для нитрометана [11]. Ошибка определения n в одном опыте $\pm 2\%$. Здесь же приведена экспериментально полученная в [12] зависимость для $n(\rho)$ ацетона: $n-1=0,45\rho$, подчиняющаяся эмпирическому соотношению Глэдстона — Дэйла $n-1=a\rho$. Для тетранитрометана экспериментальные данные описываются линейной зависимостью $n-1=0,27\rho$, подтверждая общий линейный характер изменения показателя преломления ударно-сжатых диэлектриков с плотностью (как жидких [12], так и твердых [13]).

В этом отношении поведение нитрометана аномально. Начиная с давлений в ударной волне ~ 45 кбар ($\rho \approx 1,66$ г/см³), экспериментальные данные лежат ниже зависимости по Глэдстону — Дэйлу $n-1=0,34\rho$, но их также можно аппроксимировать линейной зависимостью $n-1,41=0,09\rho$ в области давлений 45—260 кбар ($\rho = 1,66-2,27$ г/см³)². Зависимость $n(\rho)$ смеси нитрометана с ацетоном, рассчитанная по экспериментально определенным показателям преломления компонентов в предположении аддитивности удельных рефракций и удельных объемов компонентов смеси при сжатии, до давлений в волне $\rho \approx 45$ кбар, имеет вид $n-1=0,35\rho$; при $45 < \rho < 260$ кбар $n-1,28=0,18\rho$.

Проведенный для контроля эксперимент (см. рис. 2) подтвердил справедливость принятых предположений.

Для определения плотности за ударным фронтом режима детонации (нормальный или пересжатый) необходимо знать ударные и детонационные адиабаты ЖВВ, параметры инициирования.

Адиабаты ЖВВ, параметры инициирования

Специфика экспериментального нахождения ударной адиабаты ВВ — применимость известных динамических методов только в области давлений, где ВВ ведет себя как инертное вещество, — обуславливает необходимость экстраполяции экспериментально полученной удар-

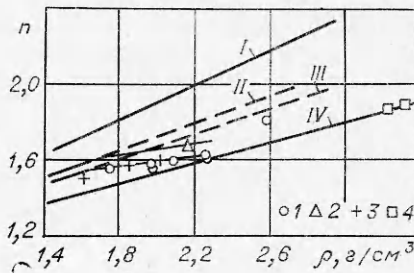


Рис. 2. Зависимость показателя преломления ударно-сжатых ЖВВ от плотности.

Расчет по Глэдстону — Дэйлу: I — ацетон, $n_0=1,36$, $\rho_0=0,8$ г/см³, II — нитрометан + ацетон, $n_0=1,376$, $\rho_0=1,05$ г/см³, III — нитрометан, $n_0=1,383$, $\rho_0=1,14$ г/см³, IV — тетранитрометан, $n_0=1,44$, $\rho_0=1,64$ г/см³. Эксперимент: 1 — нитрометан, 2 — нитрометан + ацетон, 3 — нитрометан [11], 4 — тетранитрометан.

² При давлении в волне ~ 400 кбар ($\rho = 2,59$ г/см³) эксперимент не описывается данной зависимостью. Возможное объяснение (как и в случае четыреххлористого углерода [12]) в том, что зарегистрированный высокий коэффициент отражения связан не с большим n , а с металлизацией ударно-сжатого нитрометана; в этом случае соотношение Френеля неприменимо.

ной адиабаты в область давлений детонации. Корректность экстраполяции в известной мере определяется динамическими параметрами детонационной волны, определенными электромагнитным методом.

Адиабата нитрометана и его смеси с ацетоном определена экспериментально [14] в области давлений до 100 кбар. Однако точность полученных адиабат не позволяет экстраполировать их в область давлений детонации, ибо экстраполированная адиабата смеси нитрометана с ацетоном идет жестче адиабат компонентов, хотя смесь инертна, и в этом случае удельные объемы компонентов аддитивны при сжатии.

Ударные адиабаты жидкостей, динамические жесткости которых близки, можно описать [15] единой зависимостью

$$D/c_0 - 1 = A \cdot u/c_0 - B (u/c_0)^2,$$

где D , u , c_0 — волновая, массовая скорости и скорость звука соответственно; A , B — коэффициенты, одни и те же для разных жидкостей. При использовании ударной адиабаты воды [16] как динамического репера для определения A , B получена обобщенная ударная адиабата нитрометана, ацетона, их смеси и тетранитрометана

$$D/c_0 - 1 = 2u/c_0 - 0,16 (u/c_0)^2,$$

описывающая эксперимент [14] в области низких давлений. Скорость звука смеси нитрометана с ацетоном определялась по формуле [15]

$$c_{1,2} = c_1 c_2 \cdot [\beta \rho_2 - (1 - \beta) \rho_1] / [\beta \rho_2 c_2 + (1 - \beta) \rho_1 c_1],$$

где $c_1 c_2$, ρ_1 , ρ_2 — скорости звука и плотности компонентов при нормальных условиях соответственно; β — весовая доля первого компонента. Уравнение состояния продуктов взрыва ВВ и нитрометана принималось в степенном виде, показатель политропы которых заимствован в [17].

Для инициирования детонации в ЖВВ использовались заряды различных ВВ — тротил (литой и прессованный), гексоген, смесь и сплав тротила с гексогеном. Диаметр зарядов активного ВВ составлял 60—120 мм, длина 1—2 диаметра. Диаметр жидкого ВВ $d = 94$ мм при толщине слоя ЖВВ $x = 10—20$ мм.

Наибольшее сжатие нитрометана получено при использовании специальной геометрии инициирующего заряда. Нитрометан заливался в полый цилиндр ВВ (ТГ 40/60) с внешним диаметром 60, внутренним 30 мм. ЖВВ от твердого ВВ отделяла тонкая (0,05 мм) латунная фольга, так как нитрометан растворяет ВВ.

При инициировании дополнительным зарядом ВВ в нитрометане развивается стационарная пересжатая детонационная волна со скоростью, равной скорости детонации окружающего твердого ВВ, — детонация твердого ВВ ведет (выталкивает в нитрометане маховскую волну) детонацию в нитрометане. Фронт маховской волны слегка вогнут (радиус кривизны ≈ 3 см) по отношению к направлению распространения детонации и его диаметр составляет приблизительно половину диаметра заряда ЖВВ.

Динамические параметры детонирующих ЖВВ определялись экспериментально (волновая скорость D_0) и расчетным путем (волновая D_p и массовая скорость u) по p — u -диаграмме.

Структура детонационного фронта

В табл. 1 приведены полученные результаты. Принятые обозначения: p_x — давление в химпике, $u_n/u_{ж}$ — степень пересжатия (отношение скорости поршня к скорости ПВ в точке Жуге при непересжатой детонации). Остальные обозначения приведены ранее. Эффективная длина волны аргонового источника $\bar{\lambda} = 5 \cdot 10^{-5}$ см. Для нитрометана приведены средние по нескольким опытам значения размера неоднородностей, разброс не превышал 30%. На рис. 3—6 представлены фотохронограммы различных режимов детонации нитрометана.

Проведенные эксперименты выявили тонкую структуру детонационного фронта в нитрометане и его смеси с ацетоном, аналогичную обнаруженную в смеси азотной кислоты с дихлорэтаном [9]. В тетранитрометане детонационный фронт гладок с точностью до разрешения метода (давление в химпике при нормальной детонации нитрометана составляет ~ 325 кбар).

Такая тонкая структура детонационного фронта чрезвычайно чувствительна к давлению в химпике. Так, в нитрометане при изменении давления в химпике на 20% размер неоднородностей уменьшился на порядок. Разбавление нитрометана ацетоном приводит к увеличению неоднородностей на детонационном фронте. При разбавлении нитрометана ацетоном неоднородности на фронте нормальной детонации ($p_x = 150$ кбар) становятся настолько большими, что не разрешаются методикой, и необходимо увеличить давление в химпике в 1,5 раза (по сравнению с 20% в чистом нитрометане), чтобы детонационный фронт стал гладким с точностью до разрешения метода. Микроструктура детонационного фронта в ЖВВ устойчива к искусственно созданным в нем возмущениям. При помещении на пути распространения детонации в нитрометане сетки из стальной проволоки диаметром 1 мм (ячейка размером 1×1 см²) размер неоднородностей на фронте детонации не меняется.

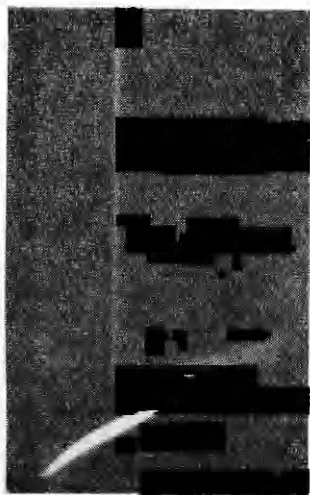


Рис. 3. Фотохронограмма нормальной детонации нитрометана, $u_n/u_{ж} = 1$.

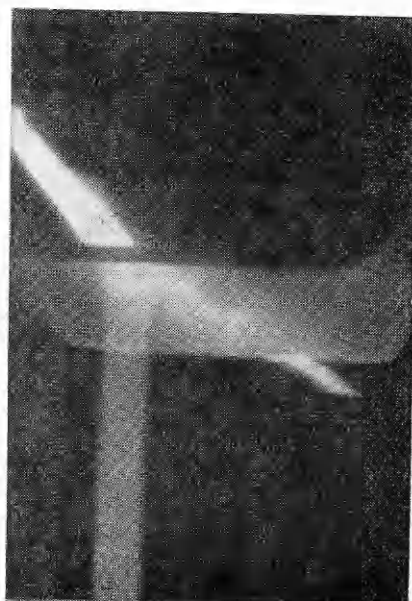


Рис. 4. Фотохронограмма слабо пересжатой детонации нитрометана, $u_n/u_{ж} = 1,05$.

Таблица 1

ЖВВ	Экран	d, мм	x, мм	D _э , км/с	D _р , км/с	u _x , км/с	σ _x	p _x , кбар	u _п /u _ж	I/I ₀	α, град	$\frac{(\Delta z)_{1/2}}{10^3, \text{ см}}$	T _п ·10 ⁴ , см	Номер рисунка
Нитрометан	Латунь	30	100	—	6,3	3	1,91	215	1	≤0,1	71	20	30	3
	Оргстекло	94	5 ÷ 15	6,3 ± ±0,1	6,37	3,06	1,92	220	1,05	0,18	71	15	10	4
			4,5 ÷ 6 мм	6,43 ± ±0,03	6,50	3,20	1,96	235	1,30	0,3	51	7	8	5
	Латунь	30	94	6,8 ± ±0,1	6,75	3,40	2,01	260	1,5	1	51	≤2	—	6
			80	—	7,9	4,45	2,29	400	—	~1	33	≤2	—	—
Нитрометан + ацетон	Оргстекло	94	10	6,4	—	3,18	2,0	215	>1	0,45	71	10	30	—
	Оргстекло	94	10	6,6	—	3,38	2,05	235	—	1	51	≤2	—	—
Тетранитрометан	Оргстекло	94	20	6,4	—	3,17	1,96	325	≈1	1	47	≤2	—	—
	Оргстекло	94	20	6,55	—	3,24	2	345	—	1	47	≤2	—	—



Рис. 5. Фотохронограмма пересжатой детонации нитрометана, $u_n/u_{ж} = 1,30$.

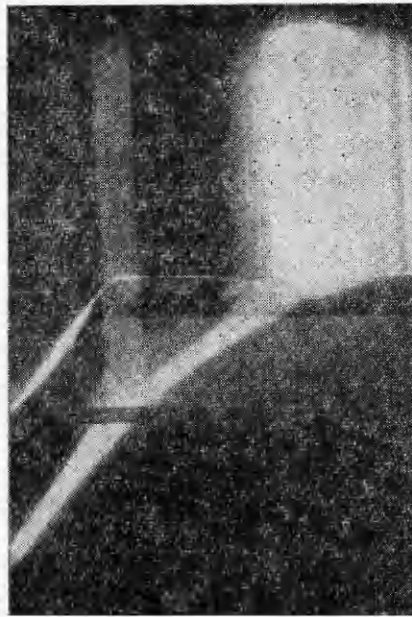


Рис. 6. Фотохронограмма сильно пересжатой детонации нитрометана, $u_n/u_{ж} = 1,5$.

Резкая зависимость размера неоднородностей от параметров в химпике соответствует картине теплового взрыва с аррениусовой кинетикой химической реакции. В табл. 2 приведена для исследованных ЖВВ рассчитанная ширина фронта детонации $L = D\tau$, где τ — время индукции теплового взрыва, в зависимости от температуры T ударного разогрева ЖВВ.

Для мономолекулярного распада, как в настоящем случае, константа скорости реакции k связана с долей разложившегося вещества b соотношением

$$k = 1/t \cdot \ln[1/(1-b)].$$

Определим период индукции τ как время, за которое разложился 1% ЖВВ, считая, что при такой доле разложения в ударной волне

Таблица 2

ЖВВ	p_x , кбар	D , км/с	T , К	k , с ⁻¹	τ , с	$L \cdot 10^6$, см	$\frac{(\Delta z^2)^{1/2}}{\cdot 10^6}$, см
Нитрометан	215	6,30	1970	$2,7 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^{-11}$	23	20
	220	6,37	2020	$3,6 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^{-11}$	18	15
	235	6,50	2160	$8,1 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	8	7
	260	6,75	2400	$3 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^{-12}$	2,2	≤ 2
Нитрометан + ацетон	150	5,75	1370	10^4	10^{-6}	$5,7 \cdot 10^5$	
	215	6,40	1970	$2,7 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^{-11}$	24	10
	235	6,60	2160	$8,1 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	8	≤ 2
Тетра- нитро- метан	325	6,40	2230	10^{13}	10^{-15}	$6,4 \cdot 10^{-4}$	≤ 2

саморазогревом можно пренебречь. Для нитрометана [18]

$$k = 10^{14} \exp(-50/RT),$$

для тетранитрометана [19]

$$k = 10^{17.5} \exp(-41/RT).$$

Для смеси нитрометана с ацетоном предполагаем константу, равную константе чистого нитрометана.

Рассчитанные температуры в химпике для соответствующих p_x нитрометана и тетранитрометана взяты из [20]. Для смеси нитрометана с ацетоном температура в химпике предполагалась равной температуре в химпике в чистом нитрометане при одинаковых давлениях.

Как видно из табл. 2, размер неоднородностей на детонационном фронте в нитрометане хорошо коррелирует с шириной детонационного фронта, в смеси нитрометана с ацетоном сделанные предположения привели к некоторому завышению L .

Кинетика реакции в тетранитрометане такова, что для нормальной детонации ширина фронта получается на молекулярном уровне. В этом случае реакция идет практически без периода индукции, тепловой взрыв вырожден и детонация одномерна. Но если при нормальной детонации смеси нитрометан — ацетон $L = 0,6$ см, и косые и поперечные детонационные волны на фронте детонации, у которых $l = 0,01L$, регистрируются экспериментально [7], то в чистом нитрометане фронт нормальной детонации квазидиомерен: регистрируемые неоднородности характеризуют степень «рыхлости» фронта — концентрацию реагирующих молекул, возмущения от которых искажают ударный фронт.

*Институт физики
Земли АН СССР,
Москва*

*Поступила в редакцию
21/VI 1976*

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1940, 10, 542.
2. К. И. Щелкин. ЖЭТФ, 1959, 36, 600.
3. Р. М. Зайдель, Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1963, 6, 59.
4. В. В. Пухначев. Докл. АН СССР, 1963, 149, 798.
5. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
6. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Толчяин. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
7. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
8. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер и др. Докл. АН СССР, 1964, 158, 1051.
9. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер и др. Докл. АН СССР, 1966, 171, 65.
10. В. А. Васильев, Л. Г. Болховитинов. ФГВ, 1969, 5, 4.
11. С. Н. Буравова, А. Н. Дремин. ПМТФ, 1964, 6.
12. К. Б. Юшко, Г. В. Кришкевич, С. Б. Кормер. Письма в ЖЭТФ, 1968, 7, 12.
13. С. Б. Кормер, К. Б. Юшко, Г. В. Кришкевич. Письма в ЖЭТФ, 1966, 3, 64.
14. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Изв. АН СССР. Сер. хим. наук, 1964, 8, 1513.
15. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов, И. М. Воскобойников. ПМТФ, 1966, 4, 137.
16. I. M. Walsh, M. H. Rice. J. Chem. Phys., 1957, 26, 815.
17. А. Н. Дремин. Докт. дис. ИХФ АН СССР, 1966.
18. A. Makovsky, T. Gruenewald. Trans. Far. Soc., 1959, 55, 952.
19. J. M. Sullivan, A. B. Axworthy. Phys. Chem., 1966, 70, 3366.
20. В. М. Богомолов. Канд. дис. ИХФ АН СССР, 1966.