

СВЕЧЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ПЕРФТОРАЛКАНАХ, ПЕРФТОРАЛКИЛАМИНАХ И ПЕРФТОРТОЛУОЛЕ

И. М. Воскобойников

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва, voskob@chph.ras.ru

Измерена яркость свечения ударного фронта в перфторированных декалине, триэтилаmine, трибутилаmine, толуоле и трансформаторном масле, а также яркость свечения вещества на контактной границе этих соединений с оконными материалами, которые сохраняют оптическую прозрачность за фронтом ударной волны. Значения температуры, соответствующие измеренным яркостям свечения сравнивались со значениями, рассчитанными в предположении сохранения и деструкции исходного соединения за фронтом волны. Деструкция перфторированных алкиламинов и алканов наблюдалась при температурах выше $2000 \div 2200$ К и связана с разрывом связи между атомами углерода. При деструкции исходного соединения за фронтом ударной волны температуры фронта и вещества за фронтом различаются. Это объясняется экранировкой конечного продукта со стороны фронта свечения слоями вещества с неполным превращением.

Ключевые слова: перфторированные соединения, адиабаты Гюгонио (ударные адиабаты), свечение ударной волны, температуры и превращения вещества за фронтом волны.

Органические соединения за фронтами достаточно интенсивных ударных волн претерпевают деструкцию. Обычно это устанавливается по адиабатам Гюгонио (ударным адиабатам), на которых появляются особенности из-за аномального изменения удельного объема. При малых изменениях удельного объема для обнаружения деструкции исходного соединения можно использовать результаты измерения других параметров (например, температуры и прозрачности сжатых веществ, скорости звука за фронтом волны и т. д.). Однако такие измерения проводились крайне редко, и в литературе имеется мало сведений о критической интенсивности волн, при превышении которой происходит деструкция соединений некоторых классов, и в частности, перфторированных алканов. Для алкиламинов и перфторированных алкиламинов такие сведения практически отсутствуют.

При исследовании свечения ударных волн в жидких сероуглероде, бензоле и ацетонитриле [1–3] было обращено внимание на различие температур ударного фронта и вещества за фронтом волны. Последние находили экстраполяцией температур вещества, измеренных на границах с оконными материалами, к состоя-

нию в проходящей волне. При деструкции ацетонитрила и сероуглерода различие температур достигало 450 К, а при деструкции бензола — 250 К. Объясняли это экранировкой конечных продуктов со стороны фронта свечения слоями вещества с неполным превращением. Деструкция бензола и сероуглерода подтверждается аномальным изменением удельного объема, а деструкция ацетонитрила — изменением скорости звука за фронтом с ростом интенсивности волны. Поскольку различие температур зафиксировано только при деструкции исходного соединения, его появление было решено использовать для оценки критической интенсивности волны, выше которой происходит деструкция перфторированных жидкостей.

Были измерены температуры ударных фронтов в жидких перфтортрибутилаmine $N(C_4F_9)_3$, перфтортриэтилаmine $N(C_2F_5)_3$, перфтордекалине $C_{10}F_{18}$, перфтортолуоле C_7F_8 и перфторированном вакуумном масле. Масло является раствором перфторалканов с массовым содержанием углерода 0,25, причем в структуре молекул некоторых перфторалканов при отсутствии кратных связей по углероду имеются циклические фрагменты. Кроме того, были измерены температуры вещества вблизи контактной границы указанных соединений с оконными материалами, которые не теряют оптической прозрачности за фронтом ударной волны в исследуемом

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 00-03-32162 а) и комплексной программы РАН «Физика и химия экстремального состояния вещества».

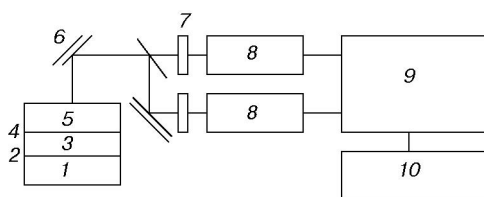


Рис. 1. Схема проведения опытов:

1 — заряд взрывчатого вещества с генератором плоского фронта, 2 — фольга (дно кюветы с жидкостью), 3 — исследуемая жидкость, 4 — пленка из полипропилена, 5 — жидкий оконный материал, 6 — зеркала, 7 — светофильтры, 8 — фотоумножители, 9 — регистрирующая аппаратура, 10 — блок синхронизации

диапазоне давлений. По результатам расчетов, схема которых приведена ниже, не ожидалось заметных особенностей в ходе адиабат Гюгонио указанных соединений, за исключением перфтортолуола (из-за деструкции за фронтом волны). Такой прогноз подтверждается ходом адиабат Гюгонио тефлона и спиртов-теломеров [4, 5], имеющих, как и исследуемые соединения, большое содержание фтора в молекулах при несущественных отличиях в строении молекул.

При выборе в качестве объекта исследования фторсодержащих соединений учитывалось, что обычно органические жидкости, полимерные материалы и монокристаллы (углеводороды, спирты, алкиламины, сложные эфиры, кислоты и др.) сохраняют оптическую прозрачность за фронтом волны в отсутствие химических превращений (см., например, [6]). Как следствие, температуры ударно-волнового сжатия исходных соединений не могут быть измерены оптическими методами, которые только и применяются для этого. Исключения составляют галогенпроизводные метана [7–9] и, возможно, другие галогенсодержащие соединения. Для перфторированных алканов и алкиламинов, к тому же, несколько проще определение возможных компонентов продуктов деструкции.

1. ПОСТАНОВКА ОПЫТОВ

Схема проведения опытов представлена на рис. 1. Для создания ударной волны в исследуемой жидкости использовалась детонация контактирующего с ней заряда. Между зарядом и жидкостью помещалась фольга из алюминия или меди столь малой толщины, что ее наличие

не отражалось на виде регистрируемых сигналов.

В опытах измеряли яркости свечения ударного фронта и вещества за фронтом на контактных границах с оконными материалами (глицерином и деканом) на двух длинах волн — 420 и 740 нм, причем измеряемые температуры на обеих длинах волн совпадали. Использование двух или более фотоумножителей, когда нахождение цветовой температуры не является целью измерения, вызвано желанием подобрать корректирующие нейтральные светофильтры за минимальное число регистраций при неопределенности температуры. Сложность подбора связана с сильной зависимостью спектральной яркости свечения от температуры. Точность измерения цветовой температуры при одинаковой относительной ошибке измерения яркостей заметно меньше, чем яркостной температуры, и обратно пропорциональна диапазону выбранных длин волн. При фиксированном изменении температуры яркость в синей области изменяется больше, чем в красной. В синей области выше точность измерения яркостной температуры, но меньше диапазон измеряемых в одной регистрации температур.

Адиабаты Гюгонио глицерина и тем более декана на диаграмме «давление — массовая скорость» расположены несколько ниже рассчитанных адиабат Гюгонио исследуемых перфторированных жидкостей, и в отсутствие деструкции исходного соединения за фронтом волны заметного уменьшения яркости свечения можно ожидать только на контактной границе. Обычно между слоями жидкостей использовалась пленка из полипропилена. Для большей интенсивности волны она иногда заменялась на более толстую пленку из полиэтилена. При толщине пленки из полиэтилена 0,4 мм в одном опыте регистрировались яркости свечения двух состояний на изоэнтропе вещества за фронтом волны.

Этот вариант был реализован при создании волн большей интенсивности детонацией заряда взрывчатого вещества с давлением за фронтом $p_f = 36,8$ ГПа и массовой скоростью $u_f = 2,3$ мм/мкс. Для перфтортрибутиламина интенсивность свечения уменьшалась на 20 % на контактной границе с полиэтиленом и поднималась на 10 % относительно свечения ударного фронта после прихода волны от контактной границы с глицерином. Для перфтортри-

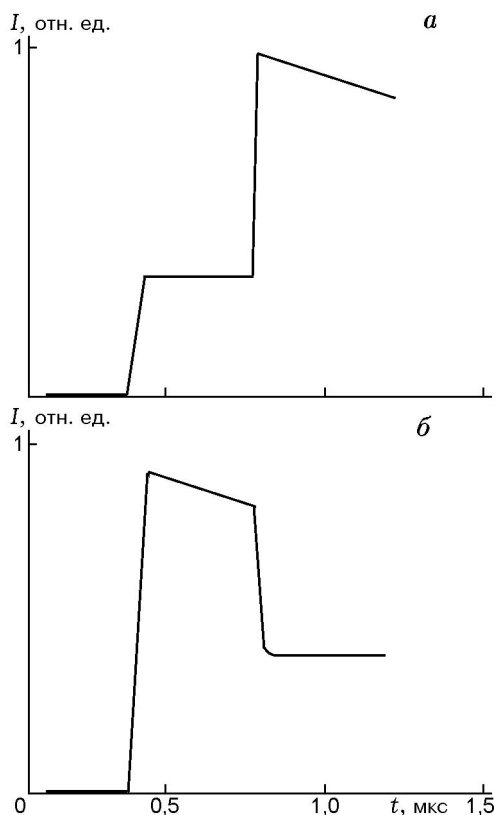


Рис. 2. Изменение яркости свечения на контактной границе перфтортрибутиламин — глицерин (а), перфтордекалин — глицерин (б)

этиламина зафиксирован спад на 15 %, а затем подъем на 5 % на эффективной длине волны излучения 740 нм. При большей интенсивности волны также не было заметного изменения яркости свечения на контактных границах глицерина с перфтордекалином, перфтортолуолом и перфторированным маслом.

Иная картина наблюдалась при создании волн меньшей интенсивности детонацией заряда с $p_J = 26,4$ ГПа и $u_J = 2,07$ мм/мкс. На контактной границе перфтортрибутиламина с глицерином яркость увеличивалась примерно в четыре раза (см. рис. 2, а), а на границе с деканом — почти в три раза. На контактной границе перфтортолуола с деканом яркость свечения почти не изменялась относительно яркости свечения фронта (на границе с глицерином она могла только возрасти в несколько раз). Для этих жидкостей при меньшей интенсивности волны, как и для всех перфторированных жидкостей при большей интенсивности волны, яркость свечения на контактной границе ис-

следуемой жидкости с глицерином возрастала или изменялась слабо. Качественно по-другому вели себя перфторированные декалин и вакуумное масло при меньшей интенсивности волны: яркость свечения на границе с глицерином уменьшалась в два раза (см. рис. 2, б). В качественном отношении именно так должно быть при сохранении перфторированных декалина и масла за фронтом волны. Есть основания считать, что во всех других случаях, кроме этого, исходные соединения разлагались за фронтами ударных волн.

По времени распространения ударных волн в заданных толщинах слоев исследуемых жидкостей, в принципе, можно найти скорости ударных волн u_s . В проведенных опытах со слоями толщиной ≈ 3 мм погрешность определения скорости составляла не менее 10 % от измеряемой величины и сравнима с различием (при постоянной массовой скорости u_p) значений u_s , рассчитанных при разных предположениях относительно сохранности исходного соединения за фронтом волны. Результаты этих оценок здесь не приводятся, так как не представляют интереса для дальнейшего рассмотрения.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице для сравнения приведены температуры T , рассчитанные в предположении отсутствия превращения исходного соединения за фронтом волны и деструкции его до CF_4 и углерода в алмазной фазе, и измеренные температуры T_H вещества за фронтом, которые были найдены экстраполяцией температур вещества вблизи контактной границы с оконным материалом к давлению в проходящей волне.

Для расчета параметров ударно-волнового сжатия в отсутствие деструкции исходного соединения за фронтом волны использовались соотношения и схемы расчета, приведенные в работах [10, 11] и [1, 12] соответственно. Адиабата Гюгонио исходного соединения, кроме оговоренных ниже случаев для расчета температуры исходного соединения непосредственно за передним фронтом волны (T_3), описывалась обобщенной зависимостью $u_s = c_0 + 2u_p - 0,1u_p^2/c_0$, где c_0 — скорость звука, определяемая объемной сжимаемостью в начальном состоянии. Температура за фронтом ударной волны вычислялась из уравнения

Соединение	Плотность, г/см ³	p , ГПа	u_s , мм/мкс	T , К	T_H , К	T_3 , К	T_f , К	
N(C ₄ F ₉) ₃ (перфтортрибутиламин)	1,869	(1)	21,8	4,8	2010	2700	—	—
		(2)	23,5	5,42	2900	2700	2200	2450
		(1)	28,5	5,35	2570	3450	—	—
		(2)	30,5	5,87	3600	3450	2600	3350
N(C ₂ F ₅) ₃ (перфтортриэтиламин)	1,745	(1)	20,0	4,55	2200	2750	—	—
		(2)	22,2	5,26	3140	2750	2300	—
		(1)	26,3	5,0	2700	3550	—	—
		(2)	29,0	5,83	3700	3550	2900	3450
C ₇ F ₈ (перфтортолуол)	1,776	(1)	22,0	5,16	1910	2750	—	—
		(2)	23,0	5,51	3000	2750	1800	2500
		(1)	29,0	5,73	2400	3600	—	—
		(2)	30,5	6,24	3500	3600	2350	3500
C ₁₀ F ₁₈ (перфтордекалин)	1,965	(1)	22,0	4,82	2000	2050	—	2050
		(2)	24,0	5,43	2600	2050	—	—
		(1)	29,0	5,18	2620	3000	—	—
		(2)	31,5	6,05	3300	3000	2350	2900
(C _{2,11} F ₄) _n (перфторированное вакуумное масло)	1,942	(1)	22,0	4,72	1980	1950	—	1950
		(2)	23,7	5,35	2700	1950	—	—
		(1)	29,0	5,26	2500	2950	—	—
		(2)	31,2	5,95	3300	2950	1950	2850

Примечания. (1) — расчет в предположении отсутствия превращения исходного вещества за фронтом волны, (2) — расчет в предположении деструкции исходного вещества до CF₄ и углерода в алмазной фазе.

$$c_v \left(\frac{dT_1}{du_p} \right) = u_p - \left(\frac{c_0 + au_p^2}{u_s} \right) \left(u_p - \frac{c_{v1}\Gamma T_1}{u_s - u_p} \right),$$

полученного дифференцированием уравнения сохранения энергии. Здесь c_v — полная теплоемкость, c_{v1} — теплоемкость, связанная с межмолекулярным взаимодействием ($\geq 6R$ на моль для многоатомных молекул, R — универсальная газовая постоянная), Γ — коэффициент Грюнайзена (в проведенных расчетах отношение коэффициента Грюнайзена к удельному объему v принималось постоянным). Изменение температуры на изоэнтропе ударно-сжатого вещества определяли по формуле $\Delta T/T \approx (c_{v1}\Gamma/c_v)\Delta u_p/c$, где Δu_p — изменение массовой скорости в отраженной волне; c — скорость звука за фронтом ударной волны, ее находили (при записи адиабаты Гюгонио в виде $u_s = c_0 + 2u_p - au_p^2$) из уравнения $c^2 = (u_s - u_p)^2[u_s + (u_s - c_0 - au_p^2)$

$$(1 - (c_{v1}\Gamma/c_v)u_p)/u_s]/(c_0 + au_p^2).$$

Результаты измерений температур на изоэнтропе сжатого вещества были использованы для уточнения теплоемкости и тепловой части давления в модели молекулярного кристалла. При температурах меньше 2000 К, когда исходное соединение сохраняется за фронтом волны, изменению температуры перфтордекалина C₁₀F₁₈ или перфторированного трансформаторного масла (C_{2,11}F₄)_n в изоэнтропической волне на 100 К соответствует изменение массовой скорости на 0,5 мм/мкс. Для исходных соединений произведение коэффициента Грюнайзена на отношение теплоемкости межмолекулярного взаимодействия к полной теплоемкости близко к 0,7, а для продуктов деструкции — 0,6 ÷ 1,1. Вклад ячейки (—CF₂—CF₂—) в межмолекулярную теплоемкость многоатомных молекул оценен как $6R$.

Параметры ударно-волнового сжатия при

деструкции исходного соединения рассчитывались по схемам [1, 12] в предположении образования в продуктах деструкции CF_4 и углерода, а также азота и воды для аминов и спиртов. Предполагалась аддитивность удельных объемов и внутренних энергий продуктов по соответствующим величинам для компонентов при равных давлениях и температурах. Удельные объемы и внутренние энергии компонентов рассчитывались из адиабат Гюгонио в предположении постоянства отношения Γ/v . Ниже приведены соотношения с описанием температур ударно-волнового сжатия компонентов линейным уравнением $T_{\text{Hi}} = kp_{\text{Hi}} + T_{0i}$ (такой вид зависимости не обязателен, хотя и согласуется с результатами расчетов, и выбран из-за возможности получения более простых и наглядных выражений). Для выбранного давления p находилось такое значение T , чтобы выполнялась система уравнений:

$$p_{\text{Hi}} = \frac{p - c_{v1i}\Gamma_{0i}(T - T_{0i})/v_{0i}}{1 - c_{v1i}\Gamma_{0i}k_i/v_{0i}},$$

$$p_{\text{Hi}} = u_{si}u_{pi}/v_{0i},$$

$$v_i = v_{0i}(1 - u_{pi}/u_{si}), \quad T_{\text{Hi}} = k_i p_{\text{Hi}} + T_{0i},$$

$$\Gamma_i/v_i = \Gamma_{0i}/v_{0i},$$

$$\left(\frac{\partial v_i}{\partial p}\right)_{\text{H}} = -\frac{v_{0i}^2(c_{0i} + a_i u_{pi}^2)}{u_{si}^2(c_{0i} + 2b_i u_{pi} - 3a_i u_{pi}^2)},$$

$$\left(\frac{\partial v_i}{\partial p}\right)_{\text{T}} = \left(\frac{\partial v_i}{\partial p}\right)_{\text{H}} \frac{1}{1 - c_{v1i}\Gamma_{0i}k_i/v_{0i}},$$

$$\left(\frac{\partial v_i}{\partial T}\right)_{\text{p}} = -\left(\frac{\partial v_i}{\partial p}\right)_{\text{H}} \frac{c_{v1i}k_i\Gamma_{0i}}{v_{0i}(1 - c_{v1i}\Gamma_{0i}k_i/v_{0i})},$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_{\text{T}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\frac{\partial v_i}{\partial p}\right)_{\text{T}},$$

$$v = \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i, \quad \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_{\text{p}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\frac{\partial v_i}{\partial T}\right)_{\text{p}},$$

$$0,5p(v_0 - v) + Q = 0,5 \sum_{i=1}^n \alpha_i p(v_{0i} - v_i) + \sum_{i=1}^n \alpha_i c_{vi}(T - T_{\text{Hi}}),$$

$$-\frac{c^2}{v^2} = \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{\text{S}} = \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{\text{T}} \left[1 - \frac{T}{c_v} \frac{(\partial v/\partial T)_{\text{p}}^2}{(\partial v/\partial p)_{\text{T}}}\right],$$

$$c_v = \sum_{i=1}^n \alpha_i c_{vi}, \quad u_s^2 = \frac{v_0^2 p}{v_0 - v},$$

$$u_p^2 = p(v_0 - v),$$

где n — число компонентов, α_i — доля i -го компонента, Q — полная теплота разложения.

Как следует из соотношения яркостей свечения фронта и вещества вблизи контактной границы с оконным материалом, только при меньшей интенсивности волны в перфторированных декалине и масле измеренные температуры (они в данном случае совпадают с температурами фронта T_f) близки к ожидаемым температурам для сжатия исходного соединения. В остальных случаях температуры T_{H} лучше согласуются со значениями, рассчитанными в предположении деструкции исходного соединения.

В таблице приведены расчетные температуры (T_3) сжатого исходного соединения. Расчет проведен со значениями скоростей u_s , которые соответствуют условиям, реализуемым в экспериментах (деструкция или сохранение исходного соединения за фронтом волны). Температура T_3 в общем случае отличается от расчетной температуры T продуктов превращения исходного соединения. Указанные значения являются крайними во временном профиле температуры вещества, между ними находятся значения для слоев вещества с неполным превращением. Значения T и T_3 совпадают при отсутствии превращения. При расчете T_3 использовались результаты проведенного ниже сравнения для адиабат Гюгонио перфторированных спиртов, тефлона и поливинил-иденфторида, поскольку значения T_3 зависят от выбранного вида адиабаты Гюгонио исходного соединения.

Из опыта измерения температур ударно-волнового сжатия при деструкции сероуглерода, бензола и ацетонитрила [1–3] известно об экранировке со стороны фронта свечения конечных продуктов, имеющих более высокую температуру, слоями вещества с неполным превращением. Также известно о подсветке вещества в конечном состоянии, имеющей пониженную температуру при диссоциации

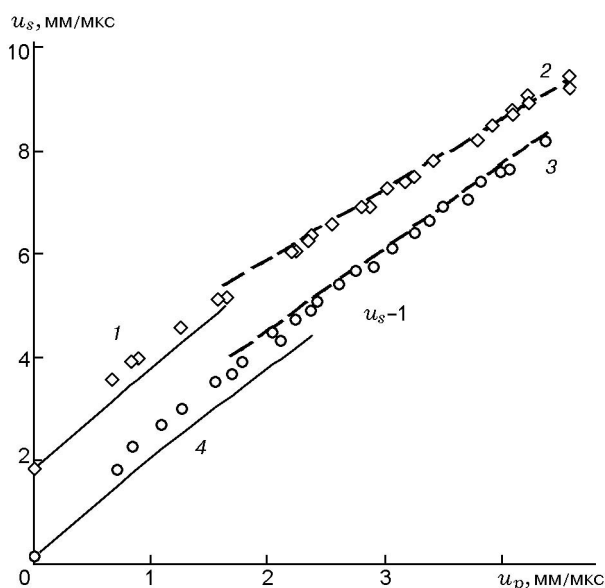


Рис. 3. Сравнение расчетных адиабат Гюгоню поливинилиденфторида (кривые 1, 2) и тефлона (кривые 3, 4) с экспериментальными (значки):

сплошные линии — обобщенная зависимость, штриховые — расчет в предположении деструкции исходного соединения с образованием CF_4

галогенпроизводных метана [7–9], веществом непосредственно за фронтом. Судя по соотношению температур T_3 и T_f , этого не наблюдается при деструкции перфторированных соединений: температура исходного вещества меньше температуры продуктов деструкции.

С ростом интенсивности волны время превращения исходного соединения за фронтом уменьшается, и температуры фронта T_f меньше отличаются от температур вещества в конечном состоянии T_H , а различия в 100 К, возникающие из-за погрешности в расчете ударных адиабат исходных соединений, сравнимы с погрешностями экстраполяции температур вещества на границах с оконными материалами к температуре в проходящей волне. Подобная ситуация наблюдалась для ударно-волнового сжатия сероуглерода [1].

Точность прогнозирования адиабат Гюгоню фторсодержащих соединений иллюстрирует сравнение результатов расчета с измеренными значениями для тефлона $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$, поливинилиденфторида $(\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2)_n$ и спиртов-теломеров $\text{H}(\text{CF}_2\text{CF}_2)_n\text{CH}_2\text{OH}$, $n = 1, 2, 3$ (см. рис. 3, 4). При больших интенсивностях волн, когда исходное соединение подвергается деструкции за фронтом, ударные адиабаты

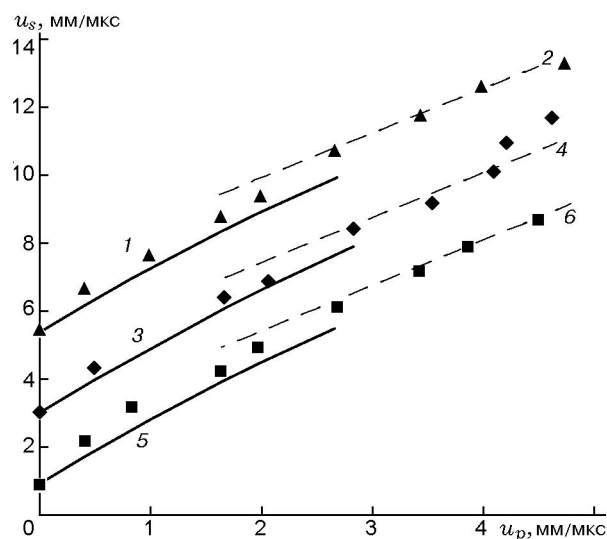


Рис. 4. Сравнение расчетных адиабат Гюгоню $\text{CH}_3\text{C}_2\text{F}_4\text{OH}$ (кривые 1, 2), $\text{CH}_3(\text{C}_2\text{F}_4)_2\text{OH}$ (кривые 3, 4) и $\text{CH}_3(\text{C}_2\text{F}_4)_3\text{OH}$ (кривые 5, 6) с экспериментальными (значки):

сплошные линии — обобщенная зависимость, штриховые — расчет в предположении деструкции исходного соединения с образованием CF_4

удается с хорошей точностью прогнозировать в предположении образования CF_4 (штриховые линии на рисунках). Сплошные линии на рисунках соответствуют обобщенной зависимости, которая правильно описывает начальные участки адиабат Гюгоню подавляющего большинства органических жидкостей и полимерных материалов. Соединения с большим содержанием фтора составляют исключение, экстраполяция скоростей распространения волн к нулевой массовой скорости за фронтом дает большее значение, чем объемная скорость звука при начальных условиях. Различие возрастает с увеличением содержания фтора в молекуле, но не превышает 0,5 мм/мкс для тефлона. Из рис. 3, 4 видно, что наклоны экспериментальных и рассчитанных адиабат Гюгоню близки, но имеется смещение, которое при желании можно оценить априори. С учетом этого смещения расчетные значения скорости распространения волны в предположении сохранения и деструкции исходного соединения за фронтом волны при массовых скоростях $2 \div 3$ мм/мкс мало различаются. Отмеченное смещение было учтено при оценке температур T_3 .

Температура, при которой по регистрациям яркости свечения ударной волны наблюдается деструкция перфторалканов за фронтом,

близка к 2000 К. При такой же температуре за фронтом волны в исходном соединении зарегистрированы изменения зависимости $c(u_p)$ для тефлона и хода адиабат Гюгонио поливинилиденфторида и спиртов-теломеров [4, 5]. Характерным временам превращений за фронтом ударной волны ($0,01 \div 0,1$ мкс), которые получены из кинетических данных для реакции первого порядка в экспериментах в ударных трубах для паров соединений, подобных исследованным, при сильном разбавлении аргонном и при температурах до 1600 К ($E_a/R = 4 \cdot 10^4$ и $z = 10^{17}$), соответствуют температуры $1800 \div 1950$ К. Эти значения достаточно близки к приведенным выше (2000 К), что указывает на возможность использовать в оценках времени превращения за фронтом волны перфторалканов и перфторалкиламинов кинетические данные о разложении паров в мономолекулярной реакции, полученные в экспериментах в ударных трубах при больших температурах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потеря оптической прозрачности вещества за фронтом волны при исследовании алканов, алкиламинов [6] и предельных спиртов, в молекуле которых нет фтора, происходит, судя по результатам расчетов, при температуре 2000 К. Как и для перфторалканов, это объясняется значениями энергии разрыва связей C—C и C—N, которые определяют развитие превращения за фронтом волны в содержащих и не содержащих фтор алканах, алкиламинах и предельных спиртах. Энергии разрыва связей C—H и C—F существенно больше и не являются лимитирующими для развития процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воскобойников И. М.** Свечение ударной волны в жидком сероуглероде // Хим. физика. 1991. Т. 10, № 5. С. 672–678.
2. **Воскобойников И. М., Толстов И. К.** Свечение ударно-сжатых бензола и 1,3-пентадиена // Хим. физика. 1993. Т. 12, № 9. С. 1288–1293.
3. **Воскобойников И. М., Толстов И. К.** Свечение ударной волны в ацетонитриле // Хим. физика. 1997. Т. 16, № 5. С. 108–112.
4. **Morris C. E., Fritz J. N., and McQueen R. G.** The equation of state of polytetrafluoroethylene to 80 GPa // J. Chem. Phys. 1984. V. 80, N 10. P. 5203–5218.
5. **Трунин Р. Ф., Жерноклетов М. В., Кузнецов Н. Ф. и др.** Сжатие жидких органических веществ в ударных волнах // Хим. физика. 1992. Т. 11, № 3. С. 424–432.
6. **Воскобойников И. М.** Оценка оптической прозрачности некоторых аминов и предельных углеводородов за ударными фронтами с давлениями до 20 ГПа // Хим. физика. 1997. Т. 16, № 3. С. 108–113.
7. **Воскобойников И. М., Богомолов В. М., Афанасенков А. Н., Шевелев В. Н.** Определение температур органических веществ в ударных волнах // Докл. АН СССР. 1968. Т. 182, № 4. С. 807–810.
8. **Гоголя М. Ф., Воскобойников И. М.** Излучение ударно-сжатых галогенпроизводных метана // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 6. С. 127–134.
9. **Долгобородов А. Ю., Воскобойников И. М., Толстов И. К.** О диссоциации галогенпроизводных метана при ударном сжатии // Хим. физика. 1991. Т. 10, № 5. С. 679–686.
10. **Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М.** Обобщенная ударная адиабата конденсированных веществ // ПМТФ. 1969. № 4. С. 137–141.
11. **Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф.** Описание состояния вещества за фронтом ударной волны // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 3. С. 105–110.
12. **Воскобойников И. М.** Оценка параметров ударно-волнового сжатия фторсодержащих соединений // Хим. физика. 1998. Т. 17, № 9. С. 132–137.

Поступила в редакцию 24/IV 2002 г.