

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ ГИДРАЗИНА И ЕГО МЕТИЛПРОИЗВОДНЫХ

А. А. Васильев, А. И. Валишев, В. А. Васильев, Л. В. Панфилова

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены основные газодинамические характеристики процессов детонации, мгновенного сгорания (взрыва) в постоянном объеме, горения при постоянном давлении и дефлаграционного горения для гидразина, метилгидразина, 1,1- и 1,2-диметилгидразина, триметилгидразина в смесях с кислородом и воздухом при разбавлении их аргоном и варьировании начальных значений давления и температуры. Проанализированы основные параметры процессов как для случая газообразного топлива, так и для случая гетерогенной смеси, когда топливо представляет собой мелкодисперсное распыленное облако в среде окислителя. Расчеты выполнены с помощью компьютерной программы «БЕЗОПАСНОСТЬ». Результаты расчетов согласуются с достоверными экспериментальными данными.

ВВЕДЕНИЕ

Гидразин и его производные известны как традиционно используемые компоненты ракетного топлива. Вопросы комплексного изучения взрывобезопасности подобных систем привлекают большое внимание как с научной, так и с практической точек зрения, хотя количество открытых публикаций по этой тематике весьма ограничено (см., например, [1–3]). Цель данной работы — заполнить существующий пробел количественной информации, и прежде всего — в вопросах безопасности при детонации и горении.

Известно, что определяющая роль в иницировании и распространении многофронтной детонации принадлежит поперечным волнам как главным элементам структуры детонационного фронта. Движение поперечных волн носит периодический характер, а их траектории образуют упорядоченную структуру с характерным масштабом, называемым размером ячейки a . С использованием размера ячейки определяются важнейшие параметры многофронтной детонации с размерностью длины: критические диаметры «выхода» детонационной волны (ДВ) из трубки в объем d_{**} ; геометрические характеристики каналов для предельного распространения ДВ: d_s — диаметр трубы для спиновой детонации и l_{lim}, δ_{lim} — предельные ширина и глубина плоского канала, в котором наблюдается предельный режим распространения ДВ; критические диаметры свободных газовых зарядов d_* ; линейные размеры газовых зарядов для формирования ДВ L_{form} ;

размеры препятствий и порядок их расположения в турбулизующих устройствах для искусственного перевода горения в детонацию и т. д. [4–7].

Через размер ячейки a и энергию газа в области соударения поперечных волн $E_{0\nu}$ определяются критические энергии иницирования детонации $E_{*\nu}$ для различных случаев симметрии ($\nu = 1 \div 3$), диаметры быстролетящего тела для возбуждения детонационного режима сгорания смеси d_w и т. д.

С помощью параметра a можно определить такие кинетические параметры индукционной зоны, как эффективная энергия активации, предэкспоненциальный множитель и эффективный порядок реакции.

Методика расчета размера ячейки a и важнейших параметров многофронтной детонации (через a) наиболее подробно изложена в [4, 5, 8] и положена в основу программы «БЕЗОПАСНОСТЬ» [9].

ПРОГРАММА «БЕЗОПАСНОСТЬ»

Разработанная авторами компьютерная программа расчета детонационной опасности горючих систем [9] включает:

- 1) банк термодинамических данных индивидуальных веществ (химическая формула, признак состояния, молекулярная масса, коэффициенты полинома для энтальпии, стандартная теплота образования и др. [10–16]);
- 2) банк кинетических данных различных смесей — коэффициенты формулы Арре-

ниуса для индукционного периода τ (в рамках обобщенной кинетики):

$$\tau = \frac{A \exp(E/RT)}{[f]^{k_1} [o]^{k_2} [in]^{k_3}},$$

или ее логарифмического аналога

$$\lg\{[f]^{k_1} [o]^{k_2} [in]^{k_3} \tau\} = A + B/T,$$

где E — энергия активации «лимитирующей» реакции индукционного периода, R — универсальная газовая постоянная, T — температура смеси в зоне индукции, в квадратных скобках — концентрации компонентов смеси (f — топливо, o — окислитель, in — инертная добавка), A и k_i — численные коэффициенты (см., например, [17–19, 4]);

- 3) подпрограмму расчета параметров мгновенного взрыва ($V_0 = \text{const}$);
- 4) подпрограмму расчета сгорания при $p_0 = \text{const}$;
- 5) подпрограмму расчета характеристик детонации (как, например, в [12, 20, 21]);
- 6) подпрограмму расчета характеристик дефлаграционного горения;
- 7) подпрограмму расчета параметров ударных волн (в том числе для химпика ДВ);
- 8) подпрограмму расчета нормальных и косых соударений детонационных волн;
- 9) подпрограмму расчета размера элементарной ячейки a и ее параметров;
- 10) подпрограмму расчета критических энергий инициирования детонации для различных случаев симметрии;
- 11) подпрограмму расчета важнейших геометрических параметров многофронтной детонации (см. выше);
- 12) подпрограмму расчета кинетических констант («обращение» задачи о ячейке);
- 13) подпрограмму расчета жидких компонентов (в исходной смеси);
- 14) банк экспериментальных данных о параметрах детонации.

Расчеты ведутся в предположении химического равновесия продуктов (включая ионы и конденсированные компоненты), газовые компоненты рассчитываются в рамках модели идеального газа.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Применительно к решаемой проблеме безопасности для банка термодинамических данных программы «БЕЗОПАСНОСТЬ» были предварительно рассчитаны коэффициенты полиномов для энтальпии и энтропии гидразина и его метилпроизводных для диапазона температур, типичных для процессов горения и детонации. В качестве исходных использованы табличные данные [22] для этих веществ в диапазоне температур $298,15 \div 1500$ К.

Что касается кинетических данных (банк 2), то в [1] отмечено, что используемая ныне детальная кинетическая схема элементарных реакций для окисления гидразина (98 элементарных реакций для 23 компонентов), примененная к расчету зоны реакции идеальной детонационной волны, предсказывает корректные результаты в достаточно ограниченной области параметров. Аналогичный расчет с использованием формулы Аррениуса для усредненной задержки воспламенения

$$\tau = [N_2H_4]^{-1} \cdot 1,2 \cdot 10^{-17} \exp(217000/RT),$$

в свою очередь, дает результаты, заметно отличающиеся от предсказываемых в рамках модели детальной кинетики (концентрация — в моль/см³, τ — в с, энергия активации — в Дж/моль). Более того, эффективная энергия активации с ростом давления снижается до значения 157000 Дж/моль. Для метилгидразина (с небольшой добавкой аргона) в [3] предложена формула

$$\tau = 2,247 \cdot 10^{-3} x^{-0,6} y^{-1,5} z^{0,6} (p/RT)^{-1,5} \times \exp(95760/RT),$$

где x , y , z — мольные доли метилгидразина, кислорода и аргона соответственно (p — в кПа, τ — в мкс). При сильном разбавлении аргоном

$$\tau = 9,013 \cdot 10^{-3} x^{-0,6} y^{-1,7} (p/RT)^{-2,3} \times \exp(101600/RT).$$

Для 1,1-диметилгидразина согласно [2]

$$\tau = 1,0 \cdot 10^{-3} x^{0,06} y^{-1,44} z^{0,94} (p/RT)^{-0,44} \times \exp(107750/RT).$$

Расхождение в эффективных энергиях активации связано с методикой определения численных коэффициентов в формулах для детальной или усредненной кинетики по экспериментальным данным: как правило, измерения проводятся в условиях, далеких от детонационных параметров (сильное разбавление инертными газами, низкое начальное давление или концентрация). Для корректной идентификации экспериментальных данных требуется информация о параметрах индукционной зоны для смесей с различным разбавлением аргоном (традиционно используемый инертный газ при измерениях задержек воспламенения). Для гидразина и его метилпроизводных эта проблема также была объектом исследований данной работы.

Гидразин и его метилпроизводные при обычных условиях представляют собой жидкости с невысоким давлением насыщенного пара [23–25] (например, 1,9 кПа при температуре 25 °С для гидразина), что позволяет проводить экспериментальные исследования с газообразными гидразином и его производными лишь при достаточно глубоком вакууме. С повышением начальной температуры (подогрев детонационной трубы и контейнера со смесью) ситуация упрощается и приближается к традиционно рассматриваемой с точки зрения безопасности газообразных топлив — стандартному атмосферному давлению.

Поскольку при обычных условиях большая часть гидразина и его производных находится в жидкой фазе (например, гидразин кипит при температуре 113,5 °С), то влияние жидкой фазы, строго говоря, должно учитываться в рамках модели гетерогенной среды с уравнением состояния для жидких компонентов. Однако приближенная оценка влияния жидкой фазы может быть сделана и в рамках модели идеального газа при следующих допущениях: жидкая фаза представляется в виде мелкодисперсного распыленного облака капель с пренебрежимо малыми размерами, когда можно пренебречь всеми физическими релаксационными процессами (ускорение, дробление, срыв погранслоя), а энтальпия и энтропия исходного топлива «подправляются» на величины, соответствующие фазовому переходу жидкость — газ (при данной температуре). В такой постановке часть химической энергии смеси будет затрачена на фазовый переход, что повлечет за собой изменение основных параметров горе-

ния и детонации (в той или иной мере, заранее трудно предсказуемой).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе представлена часть наиболее интересных результатов. За стандартное состояние выбраны значения $p_0 = 10^5$ Па и $T_0 = 298$ К, расчеты проведены также для других значений давления и температуры. Поведение основных параметров представлено на рис. 1–20, а в тексте приведены лишь данные для отдельных составов с целью их привязки к графическому материалу. На графиках по оси x отложена мольная доля (концентрация) топлива в смеси (C), вертикальными штриховыми линиями обозначены стехиометрические мольные концентрации топлива (0,50 и 0,1736 — для смеси гидразина с кислородом и воздухом; 0,2857 и 0,0775 — для смеси метилгидразина с кислородом и воздухом; 0,2 и 0,0499 — для смеси диметилгидразина с кислородом и воздухом; 0,1538 и 0,0368 — для смеси триметилгидразина с кислородом и воздухом).

Гидразин

Унитарный газообразный гидразин (молекулярная масса $\mu_0 = 32,05$ г/моль, показатель адиабаты $\gamma_0 = 1,200$, скорость звука $c_0 = 305$ м/с) характеризуется следующими параметрами детонации: скорость детонационной волны $D_0 = 2482$ м/с (соответствующее число Маха $M_0 = 8,15$), отношение давлений $P = p/p_0 = 34,9$, температура $T = 1992$ К, массовая скорость $u = 1056$ м/с, удельное энерговыделение $Q = 814$ кал/г, безразмерный тепловой эффект $q = Q/c_0^2 = 36,7$, равновесный и замороженный показатели адиабаты продуктов $\gamma_e = 1,311$ и $\gamma_f = 1,314$, динамический напор $\rho u^2 = 25,4$ атм, размер ячейки $a = 2,4$ мм, критические энергии инициирования для плоского, цилиндрического и сферического случаев соответственно $E_1 = 7,7$ Дж/см², $E_2 = 13$ Дж/см и $E_3 = 780$ Дж. Продукты реакции — Н₂ (66,6 %) и N₂ (33,3 %), молекулярная масса $\mu = 10,68$.

В химпике ДВ $T_2 = 1464$ К, $P_2 = 75,5$, $u_2 = 2320$ м/с, $c_2 = 642$ м/с, отношение плотностей $s_2 = \rho_2/\rho_0 = 15,4$, $\rho u^2 = 1084$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 2394$ К, $P_3 = 1261$, $c_3 = 817$ м/с, $s_3 = 157$ (скорость отраженной волны $W = 252$ м/с, ее число Маха $M_w = 4,0$).

При мгновенном сгорании в объеме унитарного газообразного гидразина $T = 1752$ К,

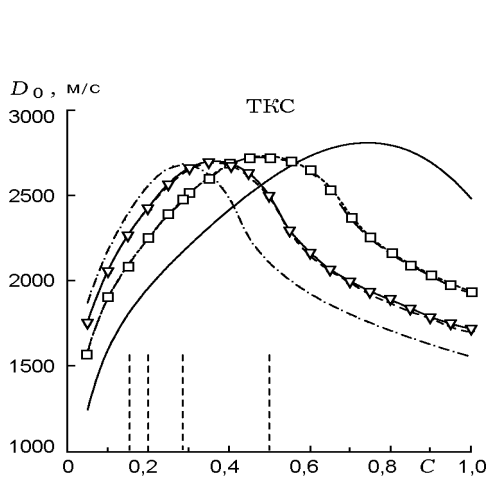


Рис. 1

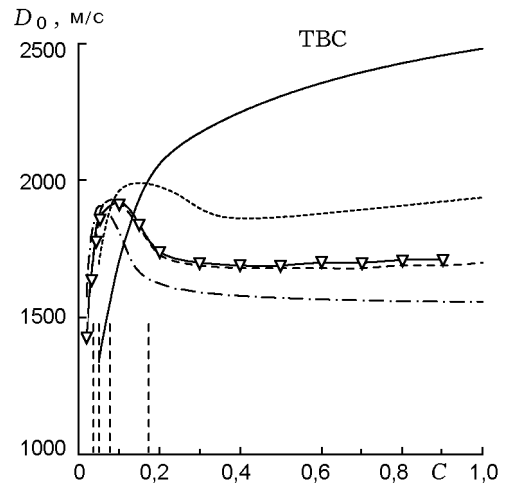


Рис. 2

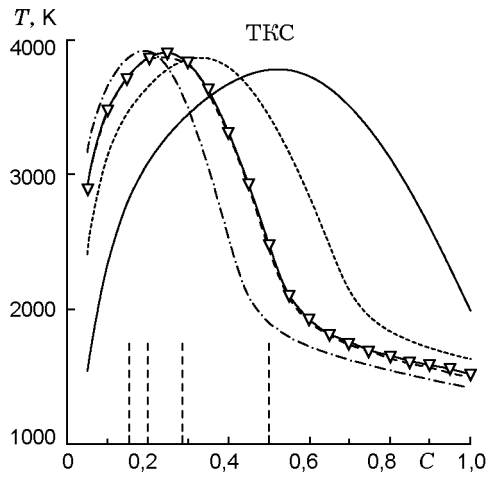


Рис. 3

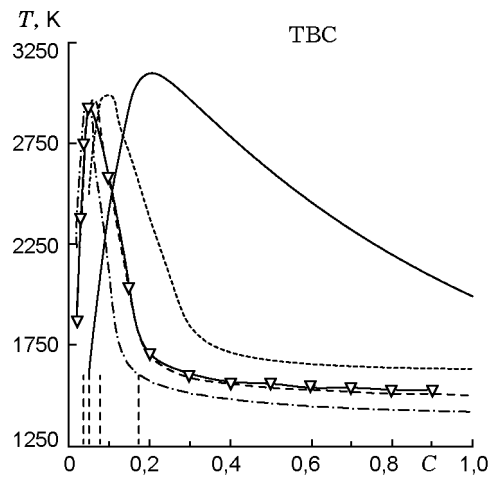


Рис. 4

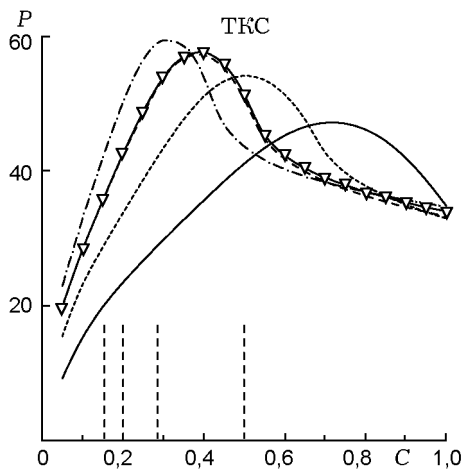


Рис. 5

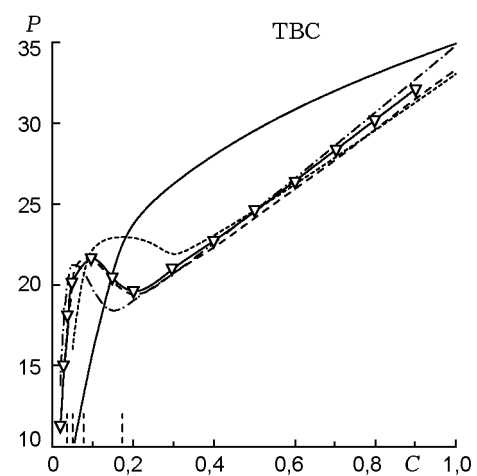


Рис. 6

— гидразин, ··· метилгидразин, --- 1,1-диметилгидразин, - - - - - триметилгидразин, □□□ аэрозин, ∇∇∇ 1,2-диметилгидразин

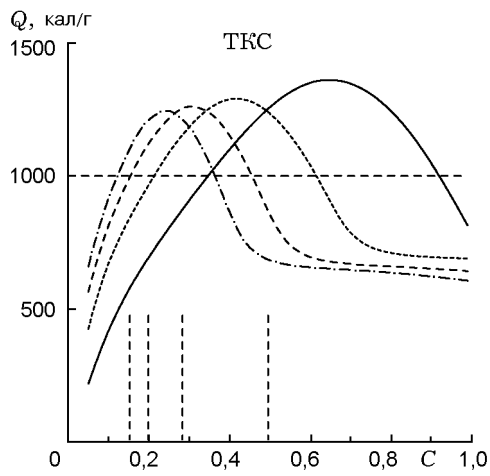


Рис. 7

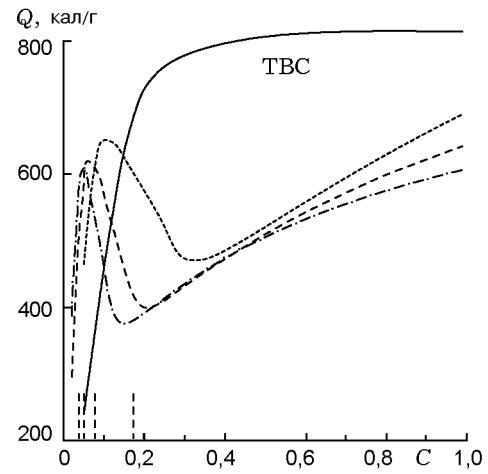


Рис. 8

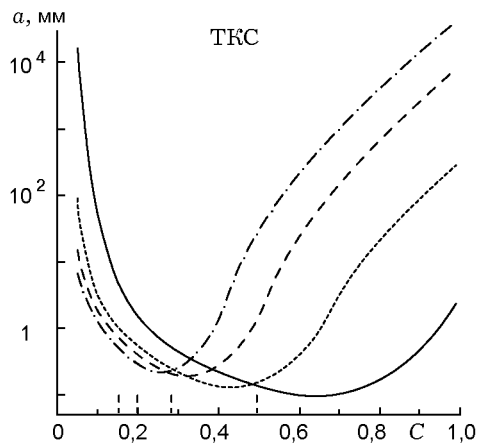


Рис. 9

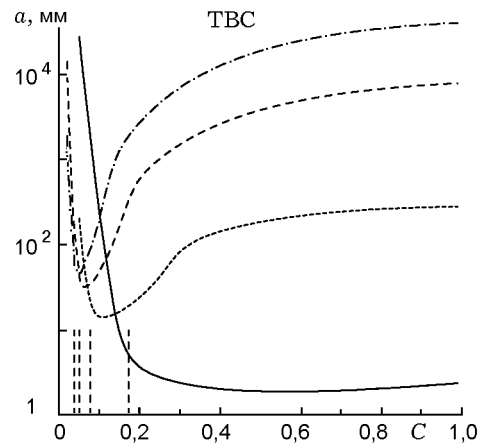


Рис. 10

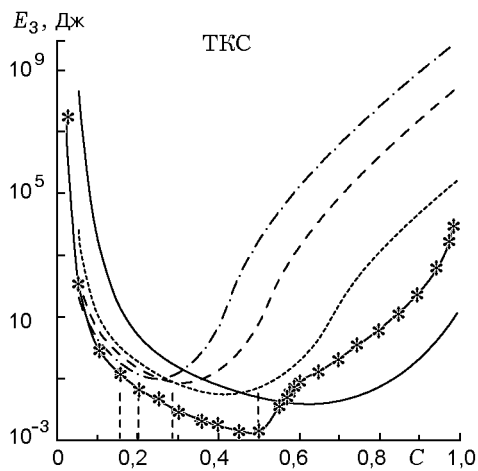


Рис. 11

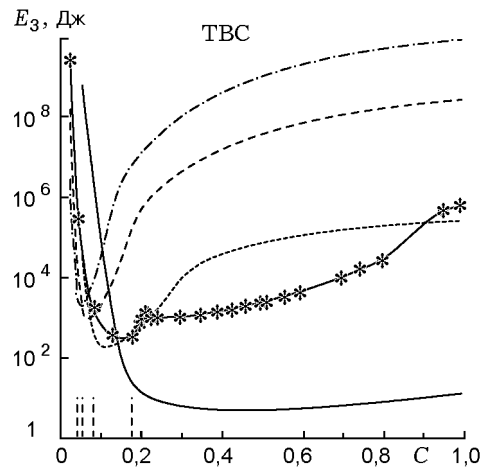


Рис. 12

— гидразин, ··· метилгидразин, --- 1,1-диметилгидразин, -·-·-· триметилгидразин, * * * ацетилен с O₂ (рис. 11) и воздухом (рис. 12), расчет выполнен с учетом возможной конденсации углерода

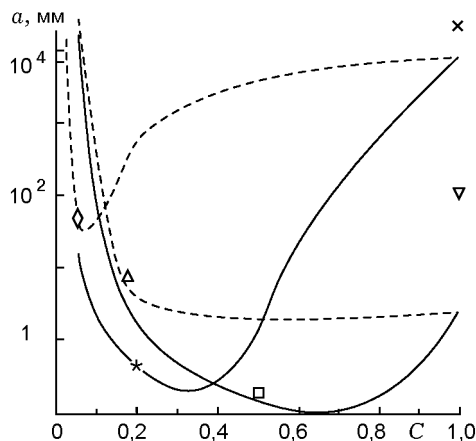


Рис. 13. Сплошные линии — смеси гидразина и 1,1-диметилгидразина с O_2 , штриховые — с воздухом; ∇ , \times — распыленные монотоплива; \square , \star — стехиометрические смеси распыленного топлива в O_2 , \triangle , \diamond — в воздухе

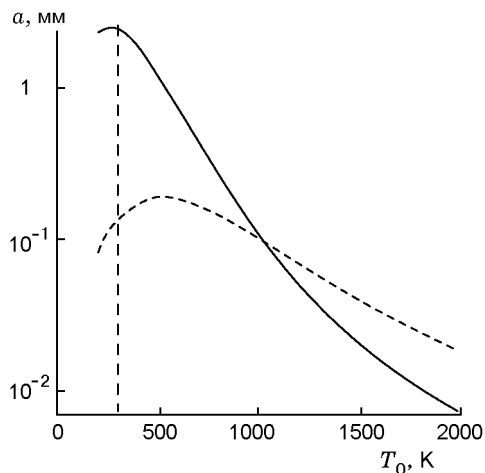


Рис. 14. Сплошная линия — N_2H_4 , штриховая — $N_2H_4 + O_2$

$P = 17,6$, $Q = 815$ кал/г, $q = 36,7$; горение при постоянном давлении дает $T = 1339$ К, $Q = 815$ кал/г, $q = 36,7$; при дефлаграционном горении $D_f = 41,5$ м/с, $u_f = -1055$ м/с, $T = 1139$ К, $Q = 815$ кал/г, $q = 36,7$.

Стехиометрическая смесь газообразного гидразина с кислородом ($C_* = 0,5$, $\mu_0 = 32,02$ г/моль, $\gamma_0 = 1,268$, $c_0 = 313$ м/с) характеризуется следующими параметрами детона-

ции: $D_0 = 2595$ м/с и $M_0 = 8,28$, $P = 41,1$, $T = 3784$ К, $u = 1197$ м/с, $Q = 1252$ кал/г, $q = 53,4$, $\gamma_e = 1,204$ и $\gamma_f = 1,228$, $\rho u^2 = 34,8$ атм, $a = 0,14$ мм, $E_1 = 0,3$ Дж/см², $E_2 = 0,025$ Дж/см и $E_3 = 0,043$ Дж. Продукты реакции ($\mu = 18,34$) — H_2O (37,4%), N_2 (27,5%), H_2 (12,3%), OH (9,4%), H (5,8%), O (2,5%), O_2 (2,9%), NO (2,2%).

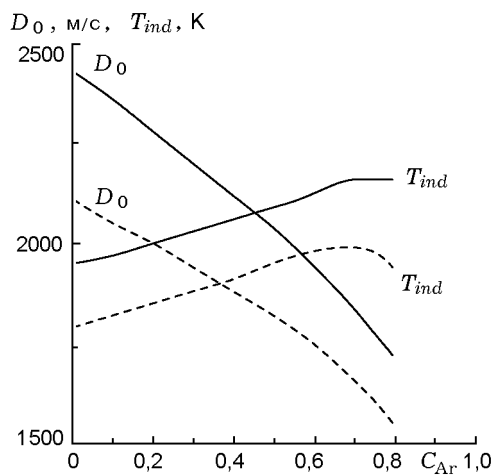


Рис. 15

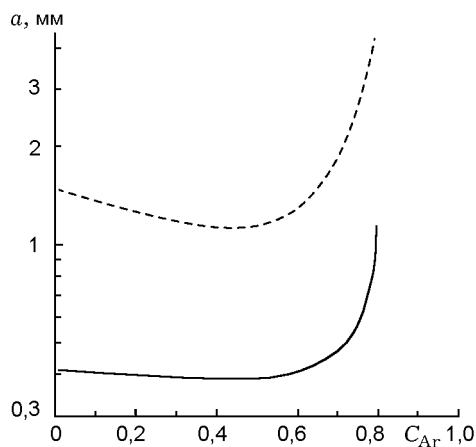


Рис. 16

Сплошные линии — 1,1-диметилгидразин + $4O_2 + zAr$, штриховые — 1,1-диметилгидразин + $8O_2 + zAr$

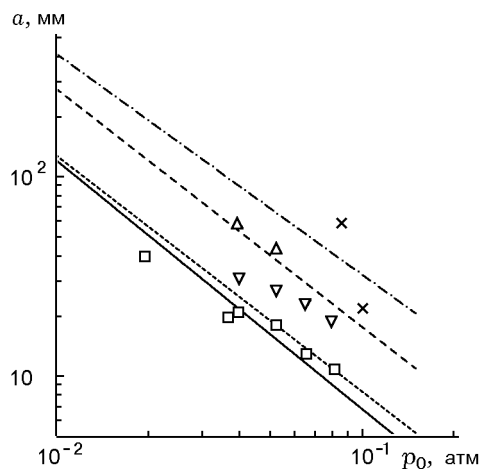


Рис. 17. —, □ 1,1-диметилгидразин + 4 O₂ + 50% Ar; ···, △ 1,1-диметилгидразин + 4 O₂ + 75% Ar; ---, ▽ 1,1-диметилгидразин + 8 O₂ + 50% Ar; - · - · - , × 1,1-диметилгидразин + 8 O₂ + 75% Ar

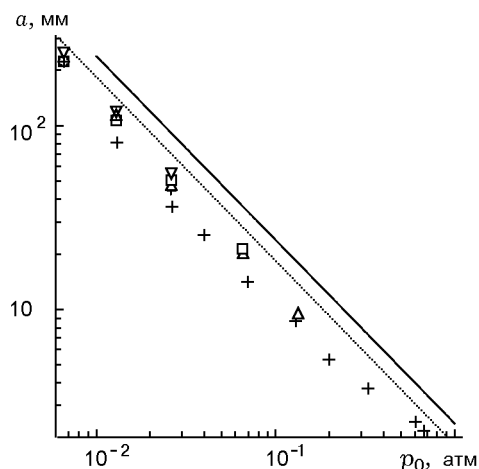


Рис. 18. Гидразин: сплошные линии — $T = 298$ К, пунктирные — $T = 398$ К, данные расчета; эксперимент: ▽ — $T = 308$ К, □ — $T = 323$ К, △ — $T = 343$ К, + — $T = 393$ К

В химпике ДВ $T_2 = 1984$ К, $P_2 = 80,8$, $u_2 = 2382$ м/с, $c_2 = 760$ м/с, $s_2 = 12,2$, $\rho u^2 = 902$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ достигаются значения $T_3 = 3461$ К, $P_3 = 1102$, $c_3 = 1000$ м/с, $s_3 = 94,8$ ($W = 350$ м/с, $M_w = 3,59$).

При мгновенном сгорании в объеме стехиометрической смеси гидразин — кислород $T = 3581$ К, $P = 20,7$, $Q = 1338$ кал/г,

$q = 57,0$; горение при постоянном давлении дает $T = 3027$ К, $Q = 1384$ кал/г, $q = 59,0$; при дефлаграционном горении $D_f = 34,8$ м/с, $u_f = -1154$ м/с, $T = 2885$ К, $Q = 1469$ кал/г, $q = 62,6$.

Стехиометрическая смесь газообразного гидразина с воздухом ($C_* = 0,1736$, $\mu_0 = 29,50$ г/моль, $\gamma_0 = 1,351$, $c_0 = 337$ м/с) характеризуется следующими параметрами детона-

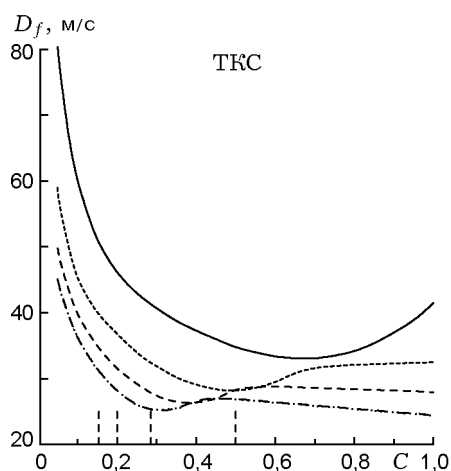


Рис. 19

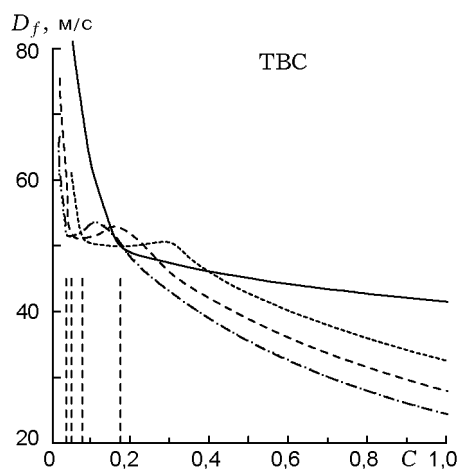


Рис. 20

— гидразин, ··· метилгидразин, --- 1,1-диметилгидразин, - · - · - триметилгидразин

ции: $D_0 = 2003$ м/с и $M_0 = 5,94$, $P = 22,5$, $T = 3056$ К, $u = 901$ м/с, $Q = 684$ кал/г, $q = 25,2$, $\gamma_e = 1,180$ и $\gamma_f = 1,248$, $\mu = 24,46$, $\rho u^2 = 17,8$ атм, $a = 5,2$ мм, $E_1 = 9,6$ Дж/см², $E_2 = 25,4$ Дж/см и $E_3 = 2230$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1676$ К, $P_2 = 42,4$, $u_2 = 1737$ м/с, $c_2 = 755$ м/с, $s_2 = 7,5$, $\rho u^2 = 275$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 2993$ К, $P_3 = 381$, $c_3 = 1002$ м/с, $s_3 = 37,9$ ($W = 432$ м/с, $M_w = 2,87$).

При мгновенном сгорании в объеме стехиометрической смеси гидразина — воздух $T = 2847$ К, $P = 11,4$, $Q = 722$ кал/г, $q = 26,6$; горение при постоянном давлении дает $T = 2433$ К, $Q = 764$ кал/г, $q = 28,1$; при дефлаграционном горении $D_f = 50$ м/с, $u_f = -892$ м/с, $T = 2234$ К, $Q = 790$ кал/г, $q = 29,1$.

Мелкодисперсный распыл жидкого гидразина характеризуется следующими параметрами детонации унитарного топлива: $D_0 = 2008$ м/с, $M_0 = 6,59$, $P = 22,7$, $T = 1318$ К, $u = 834$ м/с, $Q = 816$ кал/г, $q = 36,8$, $\gamma_e = 1,345$ и $\gamma_f = 1,345$, $\rho u^2 = 15,6$ атм, $a = 112$ мм, $E_1 = 234$ Дж/см², $E_2 = 1,7 \cdot 10^4$ Дж/см и $E_3 = 4,4 \cdot 10^7$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1129$ К, $P_2 = 49,1$, $u_2 = 1854$ м/с, $c_2 = 566$ м/с, $s_2 = 13,0$, $\rho u^2 = 584$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 1784$ К, $P_3 = 698$, $c_3 = 707$ м/с, $s_3 = 116,6$ ($W = 232$ м/с, $M_w = 3,68$). При мгновенном сгорании в объеме диспергированного гидразина $T = 1147$ К, $P = 11,5$, $Q = 816$ кал/г, $q = 36,8$.

Мелкодисперсный распыл жидкого гидразина в стехиометрическом соотношении с кислородом характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 2534$ м/с и $M_0 = 8,09$, $P = 39,3$, $T = 3686$ К, $u = 1169$ м/с, $Q = 1383$ кал/г, $q = 58,9$, $\gamma_e = 1,194$ и $\gamma_f = 1,223$, $\rho u^2 = 33,2$ атм, $a = 0,18$ мм, $E_1 = 0,32$ Дж/см², $E_2 = 0,038$ Дж/см и $E_3 = 0,077$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1918$ К, $P_2 = 77,0$, $u_2 = 2323$ м/с, $c_2 = 748$ м/с, $s_2 = 12,0$, $\rho u^2 = 846$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 3333$ К, $P_3 = 1036$, $c_3 = 982$ м/с, $s_3 = 92,6$ ($W = 345$ м/с, $M_w = 3,57$). При мгновенном сгорании в объеме диспергированного в кислороде гидразина (стехиометрия) $T = 3490$ К, $P = 19,8$, $Q = 1463$ кал/г, $q = 62,4$.

Мелкодисперсный распыл жидкого гидразина в стехиометрическом соотношении с воз-

духом характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1962$ м/с и $M_0 = 5,81$, $P = 21,5$, $T = 2946$ К, $u = 879$ м/с, $Q = 721$ кал/г, $q = 26,5$, $\gamma_e = 1,182$ и $\gamma_f = 1,247$, $\rho u^2 = 16,8$ атм, $a = 7,6$ мм, $E_1 = 12,8$ Дж/см², $E_2 = 49,2$ Дж/см и $E_3 = 5980$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1620$ К, $P_2 = 40,5$, $u_2 = 1699$ м/с, $c_2 = 744$ м/с, $s_2 = 7,5$, $\rho u^2 = 259$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 2880$ К, $P_3 = 360$, $c_3 = 744$ м/с, $s_3 = 37,2$ ($W = 425$ м/с, $M_w = 2,86$). При мгновенном сгорании распыленного в воздухе гидразина (стехиометрия) $T = 2735$ К, $P = 10,9$, $Q = 754$ кал/г, $q = 27,7$.

Метилгидразин

Унитарный газообразный метилгидразин (замещение одного атома Н на СН₃) — $\mu_0 = 46,07$ г/моль, $\gamma_0 = 1,136$, $c_0 = 247$ м/с — характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1941$ м/с, $M_0 = 7,85$, $P = 33,2$, $T = 1638$ К, $u = 891$ м/с, $Q = 693$ кал/г, $q = 47,5$, $\gamma_e = 1,200$ и $\gamma_f = 1,203$, $\rho u^2 = 27,6$ атм, $a = 278$ мм, $E_1 = 1240$ Дж/см², $E_2 = 2,4 \cdot 10^5$ Дж/см и $E_3 = 1,9 \cdot 10^9$ Дж. Продукты реакции ($\mu = 14,11$) — Н₂ (44,7%), N₂ (28,9%), СН₄ (20,4%), HCN (3,4%), в количествах более 0,1% имеются С₂Н₂, С₂Н₄, С₆Н₆.

В химпике ДВ $T_2 = 1041$ К, $P_2 = 67,4$, $u_2 = 1840$ м/с, $c_2 = 446$ м/с, $s_2 = 19,3$, $\rho u^2 = 1232$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 1612$ К, $P_3 = 1382$, $c_3 = 553$ м/с, $s_3 = 256$ ($W = 150$ м/с, $M_w = 4,46$).

При мгновенном сгорании в объеме унитарного газообразного метилгидразина $T = 1543$ К, $P = 16,7$, $Q = 728$ кал/г, $q = 49,8$; горение при постоянном давлении дает $T = 1295$ К, $Q = 738$ кал/г, $q = 50,5$; при дефлаграционном горении $D_f = 32,5$ м/с, $u_f = -868$ м/с, $T = 1217$ К, $Q = 770$ кал/г, $q = 52,4$.

Стехиометрическая смесь газообразного метилгидразина с кислородом ($C_* = 0,2857$, $\mu_0 = 36,02$ г/моль, $\gamma_0 = 1,259$, $c_0 = 294$ м/с) характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 2476$ м/с и $M_0 = 8,41$, $P = 42,2$, $T = 3846$ К, $u = 1144$ м/с, $Q = 1155$ кал/г, $q = 55,8$, $\gamma_e = 1,212$ и $\gamma_f = 1,228$, $\rho u^2 = 35,8$ атм, $a = 0,25$ мм, $E_1 = 0,5$ Дж/см², $E_2 = 0,08$ Дж/см и $E_3 = 0,024$ Дж. Продукты реакции ($\mu = 20,48$) — Н₂О (31,9%), N₂ (15,0%), СО (11,4%), ОН (11,0%), Н₂ (8,6%)

и Н (5,4%), O₂ (5,4%), CO₂ (4,8%), O (3,9%), NO (2,4%).

В химпике ДВ $T_2 = 1974$ К, $P_2 = 83,0$, $u_2 = 2279$ м/с, $c_2 = 715$ м/с, $s_2 = 12,5$, $\rho u^2 = 959$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 3496$ К, $P_3 = 1166$, $c_3 = 947$ м/с, $s_3 = 99,4$ ($W = 329$ м/с, $M_w = 3,65$).

При мгновенном сгорании в объеме $T = 3645$ К, $P = 21,2$, $Q = 1235$ кал/г, $q = 59,7$; горение при постоянном давлении дает $T = 3078$ К, $Q = 1278$ кал/г, $q = 61,7$; при дефлаграционном горении $D_f = 32,4$ м/с, $u_f = -1101$ м/с, $T = 2939$ К, $Q = 1358$ кал/г, $q = 65,6$.

Стехиометрическая смесь газообразного метилгидразина с воздухом ($C_* = 0,0775$, $\mu_0 = 30,19$ г/моль, $\gamma_0 = 1,358$, $c_0 = 334$ м/с) характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1894$ м/с и $M_0 = 5,67$, $P = 20,6$, $T = 2952$ К, $u = 851$ м/с, $Q = 613$ кал/г, $q = 23,0$, $\gamma_e = 1,176$ и $\gamma_f = 1,250$, $\mu = 26,31$, $\rho u^2 = 16,2$ атм, $a = 22,2$ мм, $E_1 = 40,6$ Дж/см², $E_2 = 436$ Дж/см и $E_3 = 1,7 \cdot 10^5$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1609$ К, $P_2 = 38,6$, $u_2 = 1629$ м/с, $c_2 = 736$ м/с, $s_2 = 7,2$, $\rho u^2 = 234$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 2905$ К, $P_3 = 331$, $c_3 = 982$ м/с, $s_3 = 34,0$ ($W = 434$ м/с, $M_w = 2,80$).

При мгновенном сгорании в объеме $T = 2753$ К, $P = 10,5$, $Q = 649$ кал/г, $q = 24,3$; горение при постоянном давлении дает $T = 2366$ К, $Q = 691$ кал/г, $q = 25,9$; при дефлаграционном горении $D_f = 51,4$ м/с, $u_f = -844$ м/с, $T = 2178$ К, $Q = 717$ кал/г, $q = 26,9$.

Мелкодисперсный распыл жидкого метилгидразина характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1848$ м/с и $M_0 = 7,48$, $P = 30,1$, $T = 1542$ К, $u = 846$ м/с, $Q = 798$ кал/г, $q = 54,7$, $\gamma_e = 1,191$ и $\gamma_f = 1,198$, $\rho u^2 = 24,9$ атм, $a = 735$ мм, $E_1 = 2,6 \cdot 10^3$ Дж/см², $E_2 = 1,4 \cdot 10^6$ Дж/см и $E_3 = 2,3 \cdot 10^{10}$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 986$ К, $P_2 = 61,1$, $u_2 = 1748$ м/с, $c_2 = 434$ м/с, $s_2 = 18,5$, $\rho u^2 = 1063$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 1513$ К, $P_3 = 1199$, $c_3 = 536$ м/с, $s_3 = 236$ ($W = 148$ м/с, $M_w = 4,37$). При мгновенном сгорании в объеме диспергированного метилгидразина $T = 1450$ К, $P = 15,2$, $Q = 826$ кал/г, $q = 56,6$.

Мелкодисперсный распыл жидкого метилгидразина в стехиометрическом соотношении с

кислородом характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 2454$ м/с и $M_0 = 8,34$, $P = 41,4$, $T = 3811$ К, $u = 1134$ м/с, $Q = 1205$ кал/г, $q = 58,2$, $\gamma_e = 1,207$ и $\gamma_f = 1,226$, $\rho u^2 = 35,2$ атм, $a = 0,28$ мм, $E_1 = 0,53$ Дж/см², $E_2 = 0,093$ Дж/см и $E_3 = 0,3$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1948$ К, $P_2 = 81,5$, $u_2 = 2257$ м/с, $c_2 = 711$ м/с, $s_2 = 12,5$, $\rho u^2 = 936$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 3445$ К, $P_3 = 1139$, $c_3 = 940$ м/с, $s_3 = 98,6$ ($W = 327$ м/с, $M_w = 3,64$). При мгновенном сгорании в объеме диспергированного в кислороде метилгидразина (стехиометрия) $T = 3612$ К, $P = 20,9$, $Q = 1284$ кал/г, $q = 62,0$.

Мелкодисперсный распыл жидкого метилгидразина в стехиометрическом соотношении с воздухом характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1880$ м/с и $M_0 = 5,63$, $P = 20,3$, $T = 2916$ К, $u = 844$ м/с, $Q = 623$ кал/г, $q = 23,4$, $\gamma_e = 1,177$ и $\gamma_f = 1,250$, $\rho u^2 = 15,9$ атм, $a = 25$ мм, $E_1 = 44,5$ Дж/см², $E_2 = 540$ Дж/см и $E_3 = 2,3 \cdot 10^5$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1591$ К, $P_2 = 38,0$, $u_2 = 1616$ м/с, $c_2 = 732$ м/с, $s_2 = 7,1$, $\rho u^2 = 229$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 2870$ К, $P_3 = 325$, $c_3 = 977$ м/с, $s_3 = 33,7$ ($W = 432$ м/с, $M_w = 2,80$). При мгновенном сгорании в объеме диспергированного в воздухе метилгидразина (стехиометрия) $T = 2717$ К, $P = 10,4$, $Q = 658$ кал/г, $q = 24,7$.

Сделаем одно очень важное замечание, касающееся учета образования конденсированного углерода в продуктах реакции. Действительно, в продуктах разложения унитарного метилгидразина (и других гидразинпроизводных с большим количеством метильных групп) всегда присутствуют частицы конденсированного углерода. Например, расчет параметров детонации газообразного метилгидразина с учетом конденсации углерода в продуктах дает $D_0 = 2036$ м/с, $P = 34,8$, $T = 1520$ К, $Q = 647$ кал/г; продукты реакции — Н₂ (69,5%), N₂ (26,0%), СН₄ (4,3%); 83% углерода (от исходного количества) оказывается в конденсированном состоянии! (для сравнения см. данные в начале этого параграфа). Видно, что расчеты с учетом конденсации углерода предсказывают снижение температуры продуктов, а дополнительная энергия за счет конденсации С усиливает скорость и интенсивность ДВ (по сравнению с газообразным С в

продуктах). Следствием этого является некоторое завышение температуры и плотности газа в зоне индукции ДВ, что, в свою очередь, несколько уменьшает размер ячейки и энергии инициирования ДВ и делает монотоплива более опасными (при учете конденсации углерода по сравнению с газообразными продуктами). Полные расчетные данные с учетом конденсации углерода не включены в текст данной статьи, поскольку в настоящее время авторы проводят расчеты для систем гидразин — аммиак, гидразин — закись азота и т. д. и предполагают подготовить новую статью с этими данными, в которой будет изложен и материал по конденсации углерода.

1,1-диметилгидразин

Унитарный 1,1-диметилгидразин (замещение обоих атомов Н, присоединенных к атому N, на два радикала CH_3 — несимметричный диметилгидразин) — $\mu_0 = 60,10$ г/моль, $\gamma_0 = 1,092$, $c_0 = 212$ м/с — характеризуется следующими параметрами газовой детонации: $D_0 = 1701$ м/с, $M_0 = 8,01$, $P = 33,5$, $T = 1509$ К, $u = 789$ м/с, $Q = 647$ кал/г, $q = 60,1$, $\gamma_e = 1,179$ и $\gamma_f = 1,160$, $\rho u^2 = 28,4$ атм, $a = 7600$ мм, $E_1 = 4,8 \cdot 10^4$ Дж/см², $E_2 = 2,3 \cdot 10^8$ Дж/см и $E_3 = 4,9 \cdot 10^{13}$ Дж. Продукты реакции ($\mu = 16,91$) — H_2 (32,8%), CH_4 (33,3%), N_2 (27,1%), C_6H_6 (2,4%), HCN (2,2%), в количествах более 0,1% имеются этилен, ацетилен, толуол, этан.

В химпике ДВ $T_2 = 874$ К, $P_2 = 68,1$, $u_2 = 1630$ м/с, $c_2 = 356$ м/с, $s_2 = 23,2$, $\rho u^2 = 1514$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 1311$ К, $P_3 = 1660$, $c_3 = 434$ м/с, $s_3 = 378$ ($W = 107$ м/с, $M_w = 4,88$).

При мгновенном сгорании чистого газообразного 1,1-диметилгидразина $T = 1427$ К, $P = 16,9$, $Q = 667$ кал/г, $q = 61,9$; горение при постоянном давлении дает $T = 1209$ К, $Q = 654$ кал/г, $q = 60,7$; при дефлаграционном горении $D_f = 27,9$ м/с, $u_f = -770$ м/с, $T = 1142$ К, $Q = 674$ кал/г, $q = 62,6$.

Стехиометрическая смесь 1,1-диметилгидразина с кислородом ($C_* = 0,2$, $\mu_0 = 37,62$ г/моль, $\gamma_0 = 1,242$, $c_0 = 286$ м/с) характеризуется следующими параметрами газовой детонации: $D_0 = 2432$ м/с и $M_0 = 8,50$, $P = 42,5$, $T = 3865$ К, $u = 1124$ м/с, $Q = 1120$ кал/г, $q = 57,2$, $\gamma_e = 1,214$ и $\gamma_f = 1,227$, $\rho u^2 = 36,1$ атм, $a = 0,4$ мм, $E_1 = 0,86$ Дж/см²,

$E_2 = 0,2$ Дж/см и $E_3 = 1,0$ Дж. Продукты реакции ($\mu = 21,35$) — H_2O (29,6%), CO (15,7%), OH (11,4%), N_2 (10,2%), H_2 (7,4%), CO_2 (7,0%), O_2 (6,6%), H (5,2%), O (4,5%), NO (2,2%).

В химпике ДВ $T_2 = 1952$ К, $P_2 = 83,7$, $u_2 = 2242$ м/с, $c_2 = 695$ м/с, $s_2 = 12,8$, $\rho u^2 = 988$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 3472$ К, $P_3 = 1197$, $c_3 = 924$ м/с, $s_3 = 102,8$ ($W = 318$ м/с, $M_w = 3,68$).

При мгновенном сгорании в объеме $T = 3664$ К, $P = 21,4$, $Q = 1198$ кал/г, $q = 61,3$; горение при постоянном давлении дает $T = 3093$ К, $Q = 1239$ кал/г, $q = 63,3$; при дефлаграционном горении $D_f = 31,6$ м/с, $u_f = -1081$ м/с, $T = 2954$ К, $Q = 1317$ кал/г, $q = 67,3$.

Стехиометрическая смесь газообразного 1,1-диметилгидразина с воздухом ($C_* = 0,0499$, $\mu_0 = 30,41$ г/моль, $\gamma_0 = 1,354$, $c_0 = 332$ м/с) характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1860$ м/с и $M_0 = 5,60$, $P = 20,1$, $T = 2918$ К, $u = 836$ м/с, $Q = 591$ кал/г, $q = 22,4$, $\gamma_e = 1,175$ и $\gamma_f = 1,250$, $\mu = 26,92$, $\rho u^2 = 15,8$ атм, $a = 45$ мм, $E_1 = 84$ Дж/см², $E_2 = 1800$ Дж/см и $E_3 = 1,4 \cdot 10^6$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1584$ К, $P_2 = 37,4$, $u_2 = 1597$ м/с, $c_2 = 729$ м/с, $s_2 = 7,1$, $\rho u^2 = 223$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 2865$ К, $P_3 = 318$, $c_3 = 974$ м/с, $s_3 = 33,1$ ($W = 433$ м/с, $M_w = 2,78$).

При мгновенном сгорании в объеме $T = 2722$ К, $P = 10,2$, $Q = 627$ кал/г, $q = 23,8$; горение при постоянном давлении дает $T = 2343$ К, $Q = 669$ кал/г, $q = 25,4$; при дефлаграционном горении $D_f = 51,9$ м/с, $u_f = -829$ м/с, $T = 2157$ К, $Q = 694$ кал/г, $q = 26,3$.

Мелкодисперсный распыл жидкого 1,1-диметилгидразина характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1622$ м/с и $M_0 = 7,64$, $P = 30,5$, $T = 1422$ К, $u = 750$ м/с, $Q = 725$ кал/г, $q = 67,3$, $\gamma_e = 1,174$ и $\gamma_f = 1,157$, $\rho u^2 = 25,6$ атм, $a = 2,2 \cdot 10^4$ мм, $E_1 = 1,2 \cdot 10^5$ Дж/см², $E_2 = 1,6 \cdot 10^9$ Дж/см и $E_3 = 8,7 \cdot 10^{14}$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 832$ К, $P_2 = 61,9$, $u_2 = 1549$ м/с, $c_2 = 347$ м/с, $s_2 = 22,2$, $\rho u^2 = 1308$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 1237$ К, $P_3 = 1441$, $c_3 = 422$ м/с, $s_3 = 347$ ($W = 106$ м/с, $M_w = 4,76$). При мгновенном сгорании в объеме диспергированного 1,1-диметилгидразина $T = 1344$ К, $P = 15,4$, $Q = 740$ кал/г, $q = 68,7$.

Мелкодисперсный распыл жидкого 1,1-диметилгидразина в стехиометрическом соотношении с кислородом характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 2415$ м/с и $M_0 = 8,44$, $P = 41,9$, $T = 3839$ К, $u = 1116$ м/с, $Q = 1157$ кал/г, $q = 59,1$, $\gamma_e = 1,211$ и $\gamma_f = 1,226$, $\rho u^2 = 35,6$ атм, $a = 0,45$ мм, $E_1 = 0,9$ Дж/см², $E_2 = 0,24$ Дж/см и $E_3 = 1,2$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1932$ К, $P_2 = 82,6$, $u_2 = 2225$ м/с, $c_2 = 692$ м/с, $s_2 = 12,7$, $\rho u^2 = 970$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 3433$ К, $P_3 = 1176$, $c_3 = 919$ м/с, $s_3 = 102$ ($W = 317$ м/с, $M_w = 3,67$). При мгновенном сгорании в объеме диспергированного в кислороде 1,1-диметилгидразина (стехиометрия) $T = 3640$ К, $P = 21,1$, $Q = 1234$ кал/г, $q = 63,1$.

Мелкодисперсный распыл жидкого 1,1-диметилгидразина в стехиометрическом соотношении с воздухом характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1851$ м/с и $M_0 = 5,57$, $P = 19,9$, $T = 2893$ К, $u = 831$ м/с, $Q = 599$ кал/г, $q = 22,7$, $\gamma_e = 1,175$ и $\gamma_f = 1,250$, $\rho u^2 = 15,6$ атм, $a = 50$ мм, $E_1 = 90$ Дж/см², $E_2 = 2100$ Дж/см и $E_3 = 1,8 \cdot 10^6$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1571$ К, $P_2 = 37,0$, $u_2 = 1587$ м/с, $c_2 = 726$ м/с, $s_2 = 7,0$, $\rho u^2 = 220$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 2840$ К, $P_3 = 313$, $c_3 = 970$ м/с, $s_3 = 32,9$ ($W = 431$ м/с, $M_w = 2,78$). При мгновенном сгорании в объеме диспергированного в воздухе 1,1-диметилгидразина (стехиометрия) $T = 2697$ К, $P = 10,1$, $Q = 634$ кал/г, $q = 24,0$.

1,2-диметилгидразин

Унитарный 1,2-диметилгидразин (замещение по одному атому Н, присоединенному к различным атомам азота, на радикал СН_3 — симметричный диметилгидразин) — $\mu_0 = 60,10$ г/моль, $\gamma_0 = 1,103$, $c_0 = 213$ м/с — характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1715$ м/с, $M_0 = 8,04$, $P = 34,1$, $T = 1524$ К, $u = 796$ м/с, $Q = 657$ кал/г, $q = 60,4$, $\gamma_e = 1,180$ и $\gamma_f = 1,161$, $\rho u^2 = 29,0$ атм, $a = 4,1 \cdot 10^3$ мм, $E_1 = 2,2 \cdot 10^4$ Дж/см², $E_2 = 6,4 \cdot 10^7$ Дж/см и $E_3 = 7,2 \cdot 10^{12}$ Дж. Продукты реакции ($\mu = 16,81$) — Н_2 (33,6%), СН_4 (32,3%), N_2 (26,8%), $\text{С}_6\text{Н}_6$ (2,5%), HCN (2,3%), в количествах более 0,1% имеются $\text{С}_2\text{Н}_4$, $\text{С}_2\text{Н}_2$, $\text{С}_7\text{Н}_8$, $\text{С}_2\text{Н}_6$.

В химпике ДВ $T_2 = 898$ К, $P_2 = 69,2$, $u_2 = 1641$ м/с, $c_2 = 360$ м/с, $s_2 = 23,0$, $\rho u^2 = 1520$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 1344$ К, $P_3 = 1668$, $c_3 = 440$ м/с, $s_3 = 370$ ($W = 109$ м/с, $M_w = 4,85$).

При мгновенном сгорании унитарного газообразного 1,2-диметилгидразина $T = 1442$ К, $P = 17,2$, $Q = 677$ кал/г, $q = 62,3$; горение при постоянном давлении дает $T = 1220$ К, $Q = 664$ кал/г, $q = 61,1$; при дефлаграционном горении $D_f = 27,7$ м/с, $u_f = -777$ м/с, $T = 1153$ К, $Q = 685$ кал/г, $q = 63,0$.

Стехиометрическая смесь газообразного 1,2-диметилгидразина с O_2 ($C_* = 0,2$, $\mu_0 = 37,62$ г/моль, $\gamma_0 = 1,255$, $c_0 = 288$ м/с) характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 2435$ м/с и $M_0 = 8,46$, $P = 42,6$, $T = 3870$ К, $u = 1125$ м/с, $Q = 1121$ кал/г, $q = 56,7$, $\gamma_e = 1,215$ и $\gamma_f = 1,228$, $\rho u^2 = 36,2$ атм, $a = 0,36$ мм, $E_1 = 0,7$ Дж/см², $E_2 = 0,16$ Дж/см и $E_3 = 0,7$ Дж. Продукты реакции ($\mu = 21,33$) — H_2O (29,5%), CO (15,7%), OH (11,5%), N_2 (10,2%), H_2 (7,5%), CO_2 (7,0%), O_2 (6,7%), H (5,3%), O (4,5%), NO (2,2%).

В химпике ДВ $T_2 = 1970$ К, $P_2 = 83,9$, $u_2 = 2243$ м/с, $c_2 = 699$ м/с, $s_2 = 12,7$, $\rho u^2 = 982$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 3504$ К, $P_3 = 1191$, $c_3 = 928$ м/с, $s_3 = 101,4$ ($W = 321$ м/с, $M_w = 3,67$).

При мгновенном сгорании в объеме $T = 3668$ К, $P = 21,4$, $Q = 1200$ кал/г, $q = 60,7$; горение при постоянном давлении дает $T = 3095$ К, $Q = 1240$ кал/г, $q = 62,7$; при дефлаграционном горении $D_f = 31,6$ м/с, $u_f = -1082$ м/с, $T = 2957$ К, $Q = 1319$ кал/г, $q = 66,7$.

Стехиометрическая смесь газообразного 1,2-диметилгидразина с воздухом ($C_* = 0,0499$, $\mu_0 = 30,41$ г/моль, $\gamma_0 = 1,361$, $c_0 = 333$ м/с) характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1862$ м/с и $M_0 = 5,59$, $P = 20,1$, $T = 2923$ К, $u = 837$ м/с, $Q = 592$ кал/г, $q = 22,3$, $\gamma_e = 1,175$ и $\gamma_f = 1,250$, $\mu = 26,91$, $\rho u^2 = 16,2$ атм, $a = 41,7$ мм, $E_1 = 76,2$ Дж/см², $E_2 = 1520$ Дж/см и $E_3 = 1,1 \cdot 10^6$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1591$ К, $P_2 = 37,5$, $u_2 = 1597$ м/с, $c_2 = 731$ м/с, $s_2 = 7,0$, $\rho u^2 = 223$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 2878$ К, $P_3 = 317$, $c_3 = 976$ м/с, $s_3 = 32,9$ ($W = 434$ м/с, $M_w = 2,78$).

При мгновенном сгорании в объеме $T = 2726$ К, $P = 10,3$, $Q = 628$ кал/г, $q = 23,7$; горение при постоянном давлении дает $T = 2347$ К, $Q = 670$ кал/г, $q = 25,3$; при дефлаграционном горении $D_f = 51,9$ м/с, $u_f = -830$ м/с, $T = 2161$ К, $Q = 695$ кал/г, $q = 26,2$.

Триметилгидразин

Триметилгидразин (замещение трех атомов Н на три метилгруппы CH_3) — $\mu_0 = 74,13$ г/моль, $\gamma_0 = 1,079$, $c_0 = 190$ м/с — характеризуется следующими параметрами газовой детонации унитарного топлива: $D_0 = 1562$ м/с, $M_0 = 8,22$, $P = 35,0$, $T = 1427$ К, $u = 727$ м/с, $Q = 612$ кал/г, $q = 70,9$, $\gamma_e = 1,163$ и $\gamma_f = 1,139$, $\rho u^2 = 30,0$ атм, $a = 3,9 \cdot 10^4$ мм, $E_1 = 2,8 \cdot 10^5$ Дж/см², $E_2 = 7,3 \cdot 10^9$ Дж/см и $E_3 = 8,0 \cdot 10^{15}$ Дж. Продукты реакции ($\mu = 18,99$) — CH_4 (41,4%), H_2 (25,6%), N_2 (24,9%), C_6H_6 (4,4%), HCN (1,3%), C_2H_4 (1,1%), имеются C_7H_8 , C_2H_2 , C_2H_6 .

В химпике ДВ $T_2 = 806$ К, $P_2 = 71,1$, $u_2 = 1502$ м/с, $c_2 = 306$ м/с, $s_2 = 26,3$, $\rho u^2 = 1800$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 1179$ К, $P_3 = 1948$, $c_3 = 369$ м/с, $s_3 = 493$ ($W = 85$ м/с, $M_w = 5,18$).

При мгновенном сгорании унитарного газообразного триметилгидразина $T = 1353$ К, $P = 17,7$, $Q = 623$ кал/г, $q = 72,2$; горение при постоянном давлении дает $T = 1155$ К, $Q = 602$ кал/г, $q = 69,8$; при дефлаграционном горении $D_f = 24,4$ м/с, $u_f = -712$ м/с, $T = 1094$ К, $Q = 617$ кал/г, $q = 71,5$.

Стехиометрическая смесь газообразного триметилгидразина с кислородом ($C_* = 0,1538$, $\mu_0 = 38,48$ г/моль, $\gamma_0 = 1,248$, $c_0 = 284$ м/с) характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 2411$ м/с и $M_0 = 8,50$, $P = 42,7$, $T = 3879$ К, $u = 1114$ м/с, $Q = 1103$ кал/г, $q = 57,4$, $\gamma_e = 1,216$ и $\gamma_f = 1,227$, $\rho u^2 = 36,3$ атм, $a = 0,5$ мм, $E_1 = 1$ Дж/см², $E_2 = 0,32$ Дж/см и $E_3 = 1,9$ Дж. Продукты реакции ($\mu = 21,80$) — H_2O (28,2%), CO (17,9%), OH (11,6%), CO_2 (8,2%), N_2 (7,7%), O_2 (7,3%), H_2 (6,9%), H (5,1%), O (3,9%), NO (2,0%).

В химпике ДВ $T_2 = 1957$ К, $P_2 = 84,2$, $u_2 = 2223$ м/с, $c_2 = 688$ м/с, $s_2 = 12,8$, $\rho u^2 = 997$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 3459$ К, $P_3 = 1207$, $c_3 = 910$ м/с, $s_3 = 104$ ($W = 313$ м/с, $M_w = 3,68$).

При мгновенном сгорании в объеме $T =$

3677 К, $P = 21,5$, $Q = 1181$ кал/г, $q = 61,5$; горение при постоянном давлении дает $T = 3103$ К, $Q = 1220$ кал/г, $q = 63,5$; при дефлаграционном горении $D_f = 31,2$ м/с, $u_f = -1071$ м/с, $T = 2965$ К, $Q = 1298$ кал/г, $q = 67,5$.

Стехиометрическая смесь газообразного триметилгидразина с воздухом ($C_* = 0,0368$, $\mu_0 = 30,52$ г/моль, $\gamma_0 = 1,360$, $c_0 = 332$ м/с) характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1846$ м/с и $M_0 = 5,56$, $P = 19,8$, $T = 2906$ К, $u = 829$ м/с, $Q = 583$ кал/г, $q = 22,1$, $\gamma_e = 1,174$ и $\gamma_f = 1,250$, $\mu = 27,20$, $\rho u^2 = 15,6$ атм, $a = 64$ мм, $E_1 = 120$ Дж/см², $E_2 = 3625$ Дж/см и $E_3 = 4,1 \cdot 10^6$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1579$ К, $P_2 = 37,0$, $u_2 = 1582$ м/с, $c_2 = 727$ м/с, $s_2 = 7,0$, $\rho u^2 = 218$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 2851$ К, $P_3 = 311$, $c_3 = 970$ м/с, $s_3 = 32,5$ ($W = 433$ м/с, $M_w = 2,77$).

При мгновенном сгорании в объеме $T = 2711$ К, $P = 10,1$, $Q = 618$ кал/г, $q = 23,4$; горение при постоянном давлении дает $T = 2335$ К, $Q = 660$ кал/г, $q = 27,6$; при дефлаграционном горении $D_f = 52,1$ м/с, $u_f = -822$ м/с, $T = 2150$ К, $Q = 684$ кал/г, $q = 25,9$.

Аэрозин

Аэрозин — смесь 50% 1,1-диметилгидразина и 50% гидразина — $\mu_0 = 46,07$ г/моль, $\gamma_0 = 1,126$, $c_0 = 246$ м/с — характеризуется следующими параметрами газовой детонации: $D_0 = 1929$ м/с, $M_0 = 7,84$, $P = 32,6$, $T = 1626$ К, $u = 886$ м/с, $Q = 685$ кал/г, $q = 47,3$, $\gamma_e = 1,199$ и $\gamma_f = 1,202$, $\rho u^2 = 27,3$ атм, $a = 377$ мм, $E_1 = 1,8 \cdot 10^3$ Дж/см², $E_2 = 4,6 \cdot 10^5$ Дж/см и $E_3 = 4,8 \cdot 10^9$ Дж. Продукты реакции ($\mu = 14,18$) — H_2 (44,2%), N_2 (29,2%), CH_4 (21,0%), HCN (3,2%), имеются C_2H_4 , C_2H_2 , C_6H_6 .

В химпике ДВ $T_2 = 1026$ К, $P_2 = 66,6$, $u_2 = 1830$ м/с, $c_2 = 443$ м/с, $s_2 = 19,4$, $\rho u^2 = 1221$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 1588$ К, $P_3 = 1370$, $c_3 = 549$ м/с, $s_3 = 257$ ($W = 149$ м/с, $M_w = 4,47$).

При мгновенном сгорании в объеме $T = 1531$ К, $P = 16,6$, $Q = 718$ кал/г, $q = 49,6$; горение при постоянном давлении дает $T = 1286$ К, $Q = 728$ кал/г, $q = 50,2$; при дефлаграционном горении $D_f = 32,7$ м/с, $u_f = -862$ м/с, $T = 1208$ К, $Q = 759$ кал/г, $q = 52,4$.

Стехиометрическая смесь газообразного азрозина с кислородом ($C_* = 0,2857$, $\mu_0 = 36,02$ г/моль, $\gamma_0 = 1,249$, $c_0 = 293$ м/с) характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 2474$ м/с и $M_0 = 8,44$, $P = 42,1$, $T = 3842$ К, $u = 1142$ м/с, $Q = 1153$ кал/г, $q = 56,1$, $\gamma_e = 1,211$ и $\gamma_f = 1,227$, $\rho u^2 = 35,7$ атм, $a = 0,28$ мм, $E_1 = 0,57$ Дж/см², $E_2 = 0,1$ Дж/см и $E_3 = 0,32$ Дж. Продукты реакции ($\mu = 20,51$) — H₂O (32,1%), N₂ (15,1%), CO (11,4%), OH (11,0%), H₂ (8,5%), H (5,4%), O₂ (5,4%), CO₂ (4,8%), O (3,9%), NO (2,4%).

В химпике ДВ $T_2 = 1960$ К, $P_2 = 82,8$, $u_2 = 2277$ м/с, $c_2 = 712$ м/с, $s_2 = 12,6$, $\rho u^2 = 962$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 3467$ К, $P_3 = 1169$, $c_3 = 943$ м/с, $s_3 = 100,5$ ($W = 326$ м/с, $M_w = 3,66$).

При мгновенном сгорании в объеме $T = 3640$ К, $P = 21,2$, $Q = 1233$ кал/г, $q = 60,0$; горение при постоянном давлении дает $T = 3075$ К, $Q = 1276$ кал/г, $q = 62,1$; при дефлаграционном горении $D_f = 32,5$ м/с, $u_f = -1100$ м/с, $T = 2936$ К, $Q = 1356$ кал/г, $q = 66,0$.

Стехиометрическая смесь газообразного азрозина с воздухом ($C_* = 0,0775$, $\mu_0 = 30,19$, $\gamma_0 = 1,353$, $c_0 = 333$ м/с) характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1892$ м/с и $M_0 = 5,68$, $P = 20,6$, $T = 2947$ К, $u = 850$ м/с, $Q = 611$ кал/г, $q = 23,0$, $\gamma_e = 1,176$ и $\gamma_f = 1,250$, $\mu = 26,32$, $\rho u^2 = 16,2$ атм, $a = 23,6$ мм, $E_1 = 43,8$ Дж/см², $E_2 = 496$ Дж/см и $E_3 = 2,0 \cdot 10^5$ Дж.

В химпике ДВ $T_2 = 1603$ К, $P_2 = 38,5$, $u_2 = 1628$ м/с, $c_2 = 735$ м/с, $s_2 = 7,2$, $\rho u^2 = 234$ атм; при нормальном отражении от стенки в химпике ДВ $T_3 = 2891$ К, $P_3 = 331$, $c_3 = 980$ м/с, $s_3 = 34,1$ ($W = 432$ м/с, $M_w = 2,80$).

При мгновенном сгорании в объеме $T = 2748$ К, $P = 10,5$, $Q = 648$ кал/г, $q = 24,4$; горение при постоянном давлении дает $T = 2362$ К, $Q = 689$ кал/г, $q = 26,0$; при дефлаграционном горении $D_f = 51,5$ м/с, $u_f = -843$ м/с, $T = 2173$ К, $Q = 715$ кал/г, $q = 26,9$.

ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1–12 представлены данные о скорости детонации D_0 , температуре T и давлении P продуктов детонации, химическом энерговыделении Q , размере ячейки a , критической энергии инициирования сферической детонации E_3 для гидразина и его метилпроизводных в сме-

сях с кислородом и воздухом. Нечетные рисунки относятся к топливно-кислородным смесям (ТКС), а четные — к топливно-воздушным смесям (ТВС).

Из представленных результатов видно, что гидразин и его метилпроизводные способны детонировать как монотоплива ($C = 1,0$). При этом, например, скорость детонации и температура продуктов для монотоплив уменьшаются по мере увеличения количества метильных групп (см. рис. 1–4), давление продуктов практически одинаково (см. рис. 5, 6), а размер ячейки и критическая энергия существенно возрастают (см. рис. 9–12), что свидетельствует об уменьшении детонационной опасности унитарных топлив с увеличением количества метильных групп.

При добавлении к монотопливам кислорода наблюдается увеличение значений D_0 , T , P , Q (см. рис. 1, 3, 5, 7), причем эти параметры достигают своих максимальных величин при некоторых концентрациях горючего ($C_{\max})_i$, а при дальнейшем уменьшении C и приближении к нижнему концентрационному пределу достаточно быстро уменьшаются. Следует отметить, что максимальные параметры не соответствуют стехиометрическим (окисление до CO₂) концентрациям топлива в смеси ни для одного из рассмотренных топлив. Нет совпадения ($C_{\max})_i$ и с концентрациями, «стехиометрическими» по CO. В свою очередь, такие параметры, как размер ячейки и критические энергии инициирования, демонстрируют обратное поведение, т. е. наличие минимумов в своих значениях (рис. 9, 11). На рис. 7 горизонтальной штриховой линией отмечен энергетический эквивалент тротила: четко видно, что в достаточно широкой области концентраций эффективность гидразина и его метилпроизводных в смеси с кислородом выше тротила.

Добавление воздуха к индивидуальным монотопливам демонстрирует (см. рис. 2, 4, 6, 8) нетрадиционное поведение основных газодинамических параметров. Например, скорость детонации для гидразиновых ТВС (см. рис. 2) монотонно уменьшается при снижении концентрации топлива. В это же время для ТВС метилпроизводных гидразина скорость детонации D_0 со стороны верхнего концентрационного предела практически постоянна в довольно широком диапазоне концентраций топлива, затем «плато» переходит в возрастающую кривую с появлением максимумов и с последующим падением параметров

при стремлении к нижнему концентрационному пределу. Нетрадиционные индивидуальные профили температуры и давления продуктов, химического энерговыделения для ТВС представлены на рис. 4, 6, 8, 10, 12.

Расчеты показывают незначительное различие основных детонационных параметров 1,1- и 1,2-диметилгидразина (см., например, рис. 1–6). Аэрозин по своим параметрам близок к метилгидразину (см. рис. 1).

С точки зрения взрывобезопасности наиболее важны рис. 11, 12: наряду с данными для гидразина здесь же представлены данные для ацетиленов [26], считающегося наиболее легко иницилируемым топливом. Четко видно, что газообразный гидразин и его метилпроизводные в определенных областях концентраций сравнимы по опасности с ацетиленовыми смесями.

Расчеты для жидких компонентов показали, что энергетические затраты на фазовый переход из жидкого состояния в газообразное для унитарных топлив заметно снижают параметры детонации и значительно увеличивают размер ячейки (см., например, рис. 13 для гидразина и 1,1-диметилгидразина, символы при $C = 1,0$ соответствуют распыленным монотопливам). Аналогичное влияние наблюдается и на критические энергии инициирования. Это свидетельствует о большей опасности газовой фазы унитарных топлив по сравнению с распыленными жидкими гидразином и его метилпроизводными. Расчеты для ТКС и ТВС с жидкими топливными компонентами демонстрируют постепенное сближение основных параметров по мере уменьшения концентрации топлива в смеси с теми, что получены ранее для газообразных топлив. Для стехиометрических составов различие становится незначительным — см. положение символов (жидкая фаза) на рис. 13 по отношению к расчетным линиям для газовой фазы (сплошные линии для ТКС и штриховые для ТВС).

Газодинамические параметры горения и детонации унитарного газообразного гидразина практически не меняются при варьировании начального давления. Например, при $p_0 = 0,1$ атм N_2H_4 характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 2480$ м/с, $M_0 = 8,14$, $P = 34,9$, $T = 1989$ К, $u = 1058$ м/с, $Q = 812$ кал/г, $q = 36,6$, $\gamma_e = 1,306$ и $\gamma_f = 1,314$, $\rho u^2 = 2,6$ атм; а при $p_0 = 10$ атм — $D_0 = 2482$ м/с, $M_0 = 8,14$, $P = 34,9$, $T = 1996$ К, $u = 1056$ м/с, $Q = 816$ кал/г, $q = 36,8$, $\gamma_e =$

$1,314$ и $\gamma_f = 1,313$, $\rho u^2 = 254$ атм. Сильно изменяются геометрические параметры и выражаемые через них параметры инициирования: $a = 24$ мм, $E_1 = 7,8$ Дж/см², $E_2 = 133$ Дж/см и $E_3 = 8,0 \cdot 10^4$ Дж при $p_0 = 0,1$ атм и соответственно $a = 0,24$ мм, $E_1 = 7,6$ Дж/см², $E_2 = 1,3$ Дж/см и $E_3 = 7,8$ Дж при $p_0 = 10$ атм.

Снижение газодинамических параметров ДВ при уменьшении p_0 (подобно большинству газовых смесей) наблюдается для гидразина и его метилпроизводных в смеси с кислородом или воздухом, при этом также типично уменьшение размера ячейки и критической энергии инициирования при увеличении начального давления. Например, стехиометрическая смесь 1,1-диметилгидразина с кислородом при $p_0 = 0,01$ атм характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 2228$ м/с, $M_0 = 7,79$, $P = 36,1$, $T = 3079$ К, $u = 1039$ м/с, $Q = 824$ кал/г, $q = 42,1$, $\gamma_e = 1,216$ и $\gamma_f = 1,252$, $\rho u^2 = 0,3$ атм, $a = 147$ мм, $E_1 = 3,5$ Дж/см², $E_2 = 307$ Дж/см и $E_3 = 7,1 \cdot 10^5$ Дж, а при $p_0 = 0,1$ атм — $D_0 = 2328$ м/с, $M_0 = 8,14$, $P = 39,2$, $T = 3442$ К, $u = 1081$ м/с, $Q = 957$ кал/г, $q = 48,9$, $\gamma_e = 1,215$ и $\gamma_f = 1,241$, $\rho u^2 = 3,4$ атм, $a = 7,6$ мм, $E_1 = 1,7$ Дж/см², $E_2 = 7,8$ Дж/см и $E_3 = 810$ Дж (данные при $p_0 = 1,0$ атм см. выше).

Влияние начальной температуры иллюстрировано в данной статье только для размера ячейки a . В случае унитарных топлив наблюдается монотонное уменьшение a при увеличении T_0 (при сохранении давления смеси) (см., например, рис. 14 — сплошная линия для гидразина). В то же время ТКС и ТВС характеризуются иным поведением: увеличением a на начальном этапе, наличием максимума и последующим непрерывным уменьшением — штриховая линия на рис. 14 для эквивалентной смеси гидразина с кислородом (штриховая вертикальная линия на рис. 14 соответствует $T_0 = 298$ К). Качественное поведение критических энергий от T_0 аналогично зависимостям $a(T_0)$.

При разбавлении смесей аргоном получено, например, что стехиометрическая смесь 1,1-диметилгидразина с кислородом при $p_0 = 0,1$ атм, разбавленная на 50 % аргоном, характеризуется следующими параметрами детонации: $D_0 = 1946$ м/с, $M_0 = 6,61$, $P = 28,2$, $T = 3261$ К, $u = 893$ м/с, $Q = 513$ кал/г, $q = 24,8$, $\gamma_e = 1,192$ и $\gamma_f = 1,309$, $\rho u^2 = 2,3$ атм,

$a = 6,8$ мм, $E_1 = 1,5$ Дж/см², $E_2 = 5,2$ Дж/см и $E_3 = 605$ Дж, а при разбавлении на 75 % — $D_0 = 1710$ м/с, $M_0 = 5,63$, $P = 21,9$, $T = 3042$ К, $u = 771$ м/с, $Q = 306$ кал/г, $q = 13,9$, $\gamma_e = 1,190$ и $\gamma_f = 1,392$, $\rho u^2 = 1,8$ атм, $a = 8,3$ мм, $E_1 = 2,0$ Дж/см², $E_2 = 7,3$ Дж/см и $E_3 = 1330$ Дж. На рис. 15 представлены зависимости скорости детонации D_0 и температуры смеси в зоне индукции T_{ind} от мольной концентрации аргона в смеси (для двух смесей 1,1-диметилгидразин — кислород). Наиболее интересен следующий эффект: при общем монотонном снижении параметров детонации (например, D_0) наблюдается увеличение температуры газа в зоне индукции по мере увеличения концентрации аргона в смеси, достижение некоторого максимального значения и последующее уменьшение T_2 . Именно этой причиной обусловлено наличие минимумов в профилях размера ячейки (см. рис. 16) и критической энергии инициирования при разбавлении смесей аргоном. Нарастание a особенно заметно при разбавлении свыше 75 %.

Следует заметить, что экспериментально обнаружить эффект снижения a при разбавлении аргоном довольно сложно по двум причинам. Первая — при обычных постановках эксперимента часть топлива находится в жидкой фазе, что требует определенных энергетических затрат на его переход в газообразное состояние. Результат этого — увеличение значения a , перекрывающее ее снижение за счет аргона. Вторая — во всех известных экспериментах [1–3] скорость детонационной волны была заметно (до 17 %) ниже расчетной, следствием чего является заметное увеличение размера ячейки.

На рис. 17 представлено соотношение расчетных (линии) и экспериментальных (символы) данных о размере ячейки в зависимости от начального давления для смесей несимметричного диметилгидразина с кислородом с разбавлением 50 % и 75 % аргона.

Зависимость $a(p_0)$ для чистого гидразина при различных значениях T_0 представлена на рис. 18 (часть экспериментальных данных взята из [1]). Отметим, что расчетные данные рис. 14 (уменьшение a для чистого гидразина с ростом T_0) подтверждаются данными на рис. 18 — см. экспериментальные точки. Из последних рисунков видно, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются друг с другом.

Из анализа данных для различных процессов горения и детонации отметим лишь, что максимальная величина Q характерна для дефлаграционного горения. Зависимости скорости дефлаграционного горения для гидразина и его метилпроизводных показаны на рис. 19 (смеси с кислородом) и рис. 20 (с воздухом).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены основные газодинамические параметры процессов детонации, мгновенного сгорания (взрыва) в постоянном объеме, горения при постоянном давлении и дефлаграционного горения для гидразина, метилгидразина, 1,1- и 1,2-диметилгидразина, триметилгидразина, аэрозина в смесях с кислородом и воздухом при разбавлении их аргоном и варьировании начальных значений давления и температуры. Результаты свидетельствуют о высокой опасности газообразных смесей этих топлив.

Расчетные результаты согласуются с достоверными экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pedley M. D., Bishop C. V., Benz F. J., et al.** Hydrazine vapor detonations // Dynamics of explosions / A. L. Kuhl, J. R. Bowen, J.-C. Leyer, A. Borisov (Eds). Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 114. Washington: AIAA, 1988. P. 45–63.
2. **Abid S., Dupre G., Paillard C.** Oxidation of gaseous unsymmetrical dimethylhydrazine at high temperatures and detonation of UDMH/O₂ mixtures // Dynamic aspects of detonations / A. L. Kuhl, J.-C. Leyer, A. Borisov, W. A. Sirignano (Eds). Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 153. Washington: AIAA, 1992. P. 162–181.
3. **Catoire L., Bassin X., Dupre G., Paillard C.** Shock tube study of ignition delays and detonation of gaseous monomethylhydrazine/oxygen mixtures // Combust. Flame. 1994. V. 99. P. 573–580.
4. **Васильев А. А.** Околокритические режимы газовой детонации: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 1995.
5. **Vasil'ev A. A.** Detonation hazard of gaseous mixtures // Proc. 28th Intern. Conf. of Fraunhofer Institute of Chemical Technologies. Germany, 1997. P. 50/1-50/14.
6. **Westbrook C. K., Urtiew P. A.** Chemical kinetic prediction of critical parameters in gaseous detonations // 19th Symp. (Intern.) on Combustion. The Inst. of Combustion, 1982. P. 615–623.

7. **Benedick W. B., Guirao C. M., Knystautas R., Lee J. H.** Critical charge for direct initiation of detonation in gaseous fuel-air mixtures // *Dynamics of Explosion* / J. R. Bowen, J.-C. Leyer and R. I. Soloukhin (Eds). Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 106. N. Y., 1986. P. 181–202.
8. **Vasiljev A. A., Nikolaev Ju. A.** Closed theoretical model of a detonation cell // *Acta Astronaut.* 1978. V. 5. P. 983–996.
9. **Васильев А. А., Валишев А. И., Васильев В. А. и др.** Параметры детонационных волн при повышенных давлениях и температурах // *Хим. физика.* 1997. Т. 16, № 11. С. 114–118; см. также: *Chem. Phys. Reports.* 1997. V. 16, N 9. P. 1659–1666.
10. **Термодинамические свойства индивидуальных веществ:** Справочник / Л. В. Гурвич, Г. А. Хачкурузов, В. Ф. Медведев и др. / Под ред. В. П. Глушко. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
11. **Термодинамические свойства индивидуальных веществ:** Справочное издание. В 4 т. / Под ред. В. П. Глушко. М.: Наука. 1979. Т. I, II.
12. **Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания:** Справочник. Т. I: Методы расчета / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. П. Тишин, В. А. Худяков / Под ред. В. П. Глушко. М.: ВИНТИ, 1971.
13. **Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания:** Справочник. В 5 т. М.: ВИНТИ, 1971.
14. **Вукалович М. П., Кириллин В. А., Ремизов С. А.** Термодинамические свойства газов. М.: ГНТИ машиностроительной и судостроительной литературы, 1953.
15. **Сталл Д., Вестрам Э., Зинке Г.** Химическая термодинамика органических соединений. М.: Мир, 1971.
16. **Киреев В. А.** Краткий курс физической химии. М.: Химия, 1978.
17. **Заманский В. М., Борисов А. А.** Механизм и промотирование самовоспламенения перспективных топлив // *Итоги науки и техники. Кинетика и катализ.* Т. 19. М.: ВИНТИ, 1989.
18. **Бабушок В. И., Дакданча А. Н.** Глобальные кинетические параметры для высокотемпературных газофазных реакций // *Физика горения и взрыва.* 1993. Т. 29, № 4. С. 48–80.
19. **Даутов Н. Г., Старик А. М.** Численное исследование детонации в метано- и водородовоздушных смесях за ударными волнами // *Физика горения и взрыва.* 1996. Т. 32, № 1. С. 94–110.
20. **Горение и течение в агрегатах энергоустановок:** моделирование, энергетика, экология / В. Г. Крюков, В. И. Наумов, А. В. Демин, А. Л. Абидуллин, Т. В. Тринос / Под ред. В. Е. Алемасова. М.: Янус-К, 1997.
21. **Николаев Ю. А., Топчиян М. Е.** Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // *Физика горения и взрыва.* 1980. Т. 16, № 3. С. 127–134.
22. **Введенский А. А., Масалитинова Т. Н.** Термодинамические функции гидразина и его метилпроизводных // *Журн. физ. химии.* 1966. Т. 40, № 5–6. С. 1372–1377.
23. **Коровин Н. В.** Гидразин. М.: Химия, 1980.
24. **Греков А. П., Веселов В. Я.** Физическая химия гидразина. Киев: Наук. думка, 1979.
25. **Одрит Л., Огг Б.** Химия гидразина. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.
26. **Vasil'ev A. A., Valishev A. I., Vasil'ev V. A.** The detonation safety of gaseous fuels. Acetylene and cyanogen // *Conference Proceedings of 16-ICDERS.* University of Mining and Metallurgy AGH. Cracow, Poland, 1997. P. 594.

Поступила в редакцию 28/V 1999 г.