

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ.

ЧАСТЬ I

А. А. Васильев^{1,2}, В. А. Васильев¹

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, gasdet@hydro.nsc.ru

²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Представлены наиболее полные данные о детонационной опасности водорода в смеси с кислородом и воздухом в области концентраций от нижнего до верхнего предела при варьировании начального давления и температуры (по отдельности или совместно). Наиболее важным параметром является критическая энергия инициирования детонации, которая служит мерой взрывоопасности горючих систем: чем меньше ее значение, тем опаснее смесь. В научной литературе количество достоверных измерений критической энергии инициирования ограничено (тем более для волн различной симметрии), что обусловлено как трудностями измерения этого параметра, так и несовершенством математических моделей передачи энергии от внешнего инициатора к горючей смеси.

Ключевые слова: водородная энергетика, взрывобезопасность, задержка воспламенения, кинетические данные для детонации, топливно-кислородные смеси (ТКС), топливно-воздушные смеси (ТВС).

DOI 10.15372/FGV2023.9314
EDN JVEZEN

1. ВОДОРОД: ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И БАЗОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Водороду как начальному химическому элементу таблицы Менделеева посвящено столь много публикаций, что их невозможно перечислить в короткой журнальной статье. Из многочисленных отечественных публикаций можно отметить, например, монографии [1–4], где собраны и систематизированы многие аспекты горения водорода и его смесей. Тем не менее, даже в этих монографиях чрезвычайно скрупулезно представлены вопросы о детонационных режимах распространения и критических условиях инициирования водородных смесей. Напомним, что критическая энергия воспламенения смеси в режиме дозвукового горения и критическая энергия инициирования детонации (сверхзвуковое распространение волн) являются базовыми величинами, по которым оценивается взрывобезопасность горючих систем: чем меньше их значения, тем более опасна смесь. Отдельные данные об инициировании водородных смесей разбросаны по статьям в различных научно-технических журналах, не всегда доступных. Учитывая возрастающий в настоящее время интерес к водороду, представляется полезным представить анализ

современных данных о его взрывобезопасности. Следует отметить, что незначительная часть данных в кратком изложении частично опубликована в трудах международных коллоквиумов по динамике взрыва и реагирующих систем — ICDERS.

Водород как отдельный химический элемент впервые был исследован в XVI в. швейцарским естествоиспытателем Парашельсом. Позднее его детально исследовал Г. Кавендиш в 1776 г. и А. Лавуазье в 1783–1787 гг. Водород является самым распространенным элементом во Вселенной (70 % массы Солнца и звезд) и самым легким газом — его атомная масса $\mu = 1.0079$ г/моль. В природе он существует как смесь орто- и параводорода (3 : 1, с одинаково- и разнонаправленными спинами ($\uparrow\uparrow$ и $\uparrow\downarrow$), при $T \rightarrow 0$ К доля параводорода стремится к 100 %). Радиус атома водорода — 0.028 нм, межатомное расстояние молекулы водорода — 0.074 нм. При комнатной температуре и давлении $p = 5.7$ ГПа водород превращается в молекулярный кристалл, а при $p > 10$ ГПа — в одноатомный кристалл с металлическими и сверхпроводящими свойствами.

Критическая точка: $T_* = -240$ °С, $p_* = 12.8$ атм, $\rho_* = 31.2$ кг/м³, температура плавления -259.16 °С, температура кипения -252.77 °С. Плотность газообразного водоро-

да — $\rho = 0.08988 \text{ кг/м}^3$ (при нормальных условиях), жидкого — 67.2 кг/м^3 (при 23.1 К), твердого — 76 кг/м^3 (при 13 К). Теплопроводность $0.168 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ в нормальных условиях (максимальная — в 7.3 раза больше, чем у воздуха). Вязкость $0.87 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Теплота плавления 58.2 кДж/кг (0.1172 кДж/моль), теплота испарения 450 кДж/кг (0.9037 кДж/моль). Энергия ионизации атома водорода $13.6 \text{ эВ} = 21.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Энергия диссоциации водорода 432.07 кДж/моль (0 К), теплота сгорания 143.06 МДж/кг ($\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + 285.75 \text{ МДж/моль}$). Температура самовоспламенения $510 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Пределы воспламеняемости: воздух — $4 \div 75 \text{ \%}$, O_2 — $4 \div 96 \text{ \%}$, пределы детонации: воздух — $18 \div 59 \text{ \%}$, O_2 — $4 \div 96 \text{ \%}$. Минимальная энергия воспламенения H_2 в воздухе $E_{ign} \approx 0.017 \text{ мДж}$. Критическая энергия инициирования детонации в воздухе $E_* \approx 4.2 \text{ кДж}$. Данные по пределам воспламеняемости, а также по критической энергии инициирования горения и детонации заметно различаются в известных статьях, что объясняется разными размерами экспериментального оборудования и его попечерного сечения, типом симметрии, начальными давлениями и температурами, величиной и типом воспламенителя или инициатора.

В задачах взрывобезопасности крайне важно уметь моделировать весь сценарий развития взрыва — от воспламенения смеси до детонации, включая переход горения в детонацию. На сегодняшний день критическую энергию инициирования волн горения и детонации любой симметрии можно оценить вполне адекватно (анализ проблемы см., например, в [5, 6]).

2. ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВООПАСНОСТИ

К основным параметрам течений газов с химическими реакциями относятся концентрационные пределы распространения самоподдерживающихся волн горения и детонации в смесях топлива с окислителем (кислородом или воздухом), газодинамические параметры продуктов химической реакции (покомпонентный состав, давление, температура, плотность, химическое энерговыделение, характерные волновая и массовая скорости). Безусловно важными являются вопросы об условиях зажигания смеси и последующего дозвукового режима распространения волны ее горения, а также вопрос об условиях инициирования детонации со

сверхзвуковым режимом распространения. Отдельный обширный класс сложных и трудоемких задач связан с развитием неустойчивости течений химически реагирующих газов, в него входит в том числе режим перехода горения в детонацию. Особую важность имеет информация о значениях и поведении вышеотмеченных параметров при условиях, отличных от стандартных ($\rho_0 = 10^5 \text{ Па}$, $T_0 = 298 \text{ К}$). Такие условия возникают, например, в задачах «водородной» безопасности АЭС, «паровой» конверсии углеводородов, при оптимизации энергетических установок, на заводах по производству сжиженного природного газа, газопроводах, в опасных по газу и пыли шахтах глубокого залегания.

Отдельные из вышеупомянутых параметров могут быть определены в рамках классической термодинамики, но большинство остальных, например характерные размеры зон химической реакции, для своего определения требуют привлечения химической кинетики. Кинетика в качестве основных параметров использует скорость химической реакции, энергию активации и порядок реакции, задержку воспламенения (как для отдельных реакций индивидуальных элементов в рамках схем детальной кинетики, так и для обобщенной (совокупной, глобальной) реакции).

В последние годы заметно возрос интерес к многотопливным системам, позволяющим с помощью дополнительных компонентов улучшить характеристики процессов горения и детонации, а также существенно снизить отрицательное воздействие на экологию окружающей среды (оксиды азота, токсичные продукты).

Большинство базовых кинетических данных получено на установках адиабатического сжатия (низкие температуры) и на ударных трубах (высокие температуры за падающими и отраженными ударными волнами) в условиях однородных газодинамических параметров.

Измеренные с помощью техники ударных волн (УВ) задержки воспламенения смеси τ традиционно представляются обобщенной формулой типа Аррениуса $\tau = A \exp(E_{act}/RT)/\{c_A^{n_A} c_B^{n_B} \cdots c_G^{n_G} \cdots\}$ или ее логарифмическим аналогом $\lg\{c_A^{n_A} c_B^{n_B} \cdots c_G^{n_G} \cdots\} = B + E_{act}/RT$. Все численные коэффициенты — A , B , E_{act} , n_i , ... получают при аппроксимации экспериментальных ударно-волновых данных подобными зависимостями. Эти же кинетиче-

ские коэффициенты формально переносятся на детонационные условия и с помощью этих коэффициентов определяются характерные временные и пространственные масштабы детонационных волн (ДВ), критическая энергия инициирования и т. д.

Формальный перенос кинетических данных, полученных при исследовании воспламенения и низкоскоростного горения, на сверхзвуковые детонационные процессы чаще всего приводит к заметному расхождению расчетных величин критической энергии инициирования, размера детонационных ячеек и других размерных параметров детонации по сравнению с экспериментальными значениями. Это заметно снижает достоверность расчетных предсказаний поведения горючей системы.

Обусловленные неустойчивостью неодномерность, неоднородность и пульсирующий характер многофронтовой ДВ делают практически невозможным достоверное измерение кинетических параметров горючих смесей в детонационных условиях. Анализ проблемы инициирования детонации [5–7] показал, что, несмотря на достаточное количество (около 30) приближенных инженерно-технических формул, оценить критическую энергию инициирования вполне адекватно можно с помощью лишь нескольких моделей, в том числе разработанных в лаборатории газовой детонации Института гидродинамики.

В части I статьи представлены наиболее полные данные о детонационной опасности водорода в смеси с кислородом и воздухом в области концентраций от нижнего до верхнего предела при варьировании начального давления и температуры, в части II — данные в случае разбавления водородных смесей инертными газами, а также при наличии водяного пара. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными, полученными в лабораториях различных стран и опубликованными в научной печати: по инициированию детонации, по концентрационным и геометрическим пределам распространения, по значениям и поведению характерных параметров и т. д.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. СМЕСЬ H_2 — O_2 , H_2 —ВОЗДУХ

3.1. Варьирование концентрации

В расчетах в качестве стандартного состояния выбраны давление $p_0 = 10^5$ Па и темпе-

ратура $T_0 = 298$ К. В табл. 1, 2 представлены некоторые полученные параметры детонации топливно-кислородных (ТКС) и топливно-воздушных (ТВС) смесей: $c(\text{H}_2)$ — молярная доля (концентрация) водорода в смеси, μ_0 — молекулярная масса исходной смеси, c_0 — скорость звука в исходной смеси, D_0 — скорость ДВ, Q_g — удельное энерговыделение смеси, a — поперечный размер детонационной ячейки, E_3 — критическая энергия инициирования сферической детонации. Для продуктов детонации приведены следующие данные: p/p_0 — обезразмеренное на начальное значение давление, u — массовая скорость, c_e — равновесная скорость звука, μ — молекулярная масса, ρu^2 — динамический напор ($1 \text{ атм} = 10^5$ Па), T — температура.

Кроме данных из табл. 1, 2, ниже представлены дополнительные сведения. Например, максимальное энерговыделение Q_g характерно не для стехиометрических смесей, а для обогащенных: для ТКС 85 % H_2 + 15 % O_2 — 2 370 кал/г, для ТВС — ≈ 770 кал/г; для сравнения: для тротилового эквивалента $Q_{\text{ТНТ}} = 1\,000$ кал/г. Минимальный размер детонационной ячейки $a \approx 1.0$ мм для ТКС и $a \approx 11.0$ мм для ТВС; минимальный диаметр быстролетящего тела, способного возбудить детонацию в горючей смеси при полетной скорости $w = D_0$, равен 2.5 мм для ТКС и 30 мм для ТВС. Минимальные энергии инициирования ТКС равны $E_1 = 0.7$ Дж/см², $E_2 = 0.3$ Дж/см и $E_3 = 1.9$ Дж соответственно для плоского, цилиндрического и сферического случаев симметрии; аналогично для ТВС — $E_1 = 8.4$ Дж/см², $E_2 = 37.3$ Дж/см и $E_3 = 3\,354$ Дж.

Приведенные ниже рисунки демонстрируют поведение наиболее важных параметров. На рис. 1–5 линиями st обозначены концентрации, соответствующие стехиометрическому составу ($c_* = 0.667$ для смеси водорода с кислородом и $c_* = 0.295$ — с воздухом). Штриховыми вертикальными линиями отмечены концентрационные пределы: наружные линии — нижний и верхний пределы воспламенения, внутренние линии — соответствующие пределы детонации (пределы горения шире пределов для детонации).

Скорость детонации D_0 монотонно растет по мере увеличения молярной концентрации водорода $c(\text{H}_2)$ и лишь вблизи верхнего предела начинает уменьшаться (рис. 1). Для ТКС максимальное значение $D_0 \approx 3\,800$ м/с

Таблица 1

Параметры детонации в смесях водород — кислород
при взрывовании концентрации водорода (стандартное исходное состояние p_0 — T_0)

$c(\text{H}_2)$	μ_0 , г/моль	c_0 , м/с	D_0 , м/с	p/p_0	u , м/с	c_e , м/с	μ , г/моль	ρu^2 , атм	T , К	Q_g , кал/г	a , мм	E_3 , Дж
0.05	30.5	338	914	4.9	345	570	31.3	2.4	929	94	832	$9.1 \cdot 10^9$
0.1	29.0	347	1 195	7.8	483	712	30.5	4.6	1 450	197	34	$2.5 \cdot 10^5$
0.15	27.5	356	1 415	10.3	592	823	29.7	6.8	1 930	309	6.8	1 271
0.2	26.0	366	1 593	12.5	687	906	28.8	8.8	2 343	423	2.7	61
0.25	24.5	377	1 735	14.1	765	970	27.7	10.5	2 661	528	1.6	107
0.3	23.0	389	1 856	15.3	830	1 026	26.4	11.7	2 898	626	1.17	404
0.35	21.5	402	1 969	16.2	887	1 081	25.1	12.6	3 082	722	1.02	244
0.4	20.0	417	2 080	16.8	942	1 138	23.6	13.3	3 232	822	0.98	196
0.45	18.5	433	2 196	17.4	998	1 198	22.0	13.8	3 359	930	0.99	190
0.5	17.0	452	2 320	17.8	1 056	1 264	20.4	14.2	3 467	1 049	1.05	208
0.55	15.5	473	2 455	18.2	1 119	1 336	18.7	14.6	3 559	1 185	1.15	253
0.6	14.0	497	2 606	18.5	1 189	1 418	17.0	14.9	3 631	1 340	1.3	338
0.667	12.0	537	2 837	18.8	1 294	1 543	14.5	15.1	3 682	1 580	1.6	595
0.7	11.0	561	2 966	18.8	1 353	1 613	13.3	15.1	3 676	1 714	1.8	88
0.75	9.5	603	3 176	18.6	1 445	1 732	11.3	14.9	3 606	1 920	2.3	197
0.8	8.0	657	3 403	17.9	1 538	1 865	9.4	14.1	3 433	2 115	3.35	706
0.85	6.5	729	3 631	16.4	1 617	2 014	7.5	12.6	3 114	2 255	6.6	646
0.9	5.0	830	3 800	13.6	1 633	2 167	5.6	9.6	2 551	2 203	25.3	$4.6 \cdot 10^4$
0.95	3.5	991	3 642	8.5	1 461	2 181	3.7	5.1	1 606	1 624	640	$1.5 \cdot 10^9$

наблюдается в смеси с $c(\text{H}_2) = 0.9$, для ТВС максимум $D_0 \approx 2 345$ м/с расположен при $c(\text{H}_2) = 0.8$. Для стехиометрических составов ТКС и ТВС $D_0 = 2 837$ и 1 966 м/с соответственно. Максимальная температура продуктов детонации ТКС $T \approx 3 682$ К достигается при стехиометрическом соотношении. Максимум $T \approx 2 956$ К для ТВС достигается при $c(\text{H}_2) = 0.35$ и несколько сдвинут от стехиометрии, где $T = 2 947$ К. Максимумы D_0 и T нетрадиционно сильно сдвинуты относительно друг друга, а по мере приближения к пределам характерные температуры (как и D_0) уменьшаются.

На рис. 2 представлены зависимости относительного давления $P = p/p_0$, относительной температуры $\Theta = T/T_0$ и безразмерного теплового эффекта $q = Q/c_0^2$ от концентрации H_2

в продуктах детонации ТКС (приведенные значения соответствуют стехиометрическим составам ТКС). При этом максимальные значения составляют: $P_{max} = 18.78$, $\Theta_{max} = 12.35$, $q_{max} = 22.93$. Аналогично для ТВС: $P_{max} = 15.6$, $\Theta_{max} = 9.88$ и $q_{max} = 16.8$. Отметим, что $\mu > \mu_0$ при любых $c(\text{H}_2)$. Максимум давления $P_{max} = 18.82$ для ТКС наблюдается для смеси с концентрацией $c(\text{H}_2) = 0.7$; для ТВС $P_{max} = 15.6$ при $c(\text{H}_2) = 0.295 \div 0.35$ и здесь же расположен максимум энерговыделения q_{max} . С приближением к пределам значения P , Θ , q уменьшаются.

Возрастание давления в детонационной волне ТКС $P_d = p_d/p_0$ и при ее мгновенном взрыве P_v (максимум $P_v = 9.6$) приходится на концентрацию водорода в смеси $c(\text{H}_2) = 0.7$, для ТВС $P_v = 8.0$ при $c(\text{H}_2) = 0.295 \div 0.35$. Для оценок можно считать, что $P_d \sim 2P_v$. Теп-

Таблица 2

Параметры детонации в смесях водород — воздух
при взрывовании концентрации водорода (стандартное исходное состояние p_0-T_0)

$c(\text{H}_2)$	μ_0 , г/моль	c_0 , м/с	D_0 , м/с	p/p_0	u , м/с	c_e , м/с	μ , г/моль	ρu^2 , атм	T , К	Q_g , кал/г	a , мм	E_3 , Дж
0.04	27.9	355	912	4.4	334	579	28.5	2.0	854	82	15 380	$7.3 \cdot 10^{13}$
0.06	27.4	358	1 050	5.7	403	647	28.2	2.9	1 073	123	2 396	$1.6 \cdot 10^{11}$
0.08	26.9	361	1 163	6.8	459	704	28.0	3.8	1 274	164	702	$2.9 \cdot 10^9$
0.11	26.0	368	1 345	8.7	549	796	27.5	5.4	1 632	244	152	$1.9 \cdot 10^7$
0.14	25.1	374	1 489	10.4	622	867	27.0	6.8	1 940	322	61	947 900
0.17	24.3	380	1 607	11.8	683	925	26.6	8.0	2 205	395	34	131 000
0.20	23.6	386	1 706	12.9	735	971	26.1	9.1	2 429	464	22	33 300
0.25	22.2	397	1 861	14.7	819	1 042	25.1	10.9	2 767	584	13	6 314
0.295	21.0	408	1 966	15.6	876	1 090	24.0	11.9	2 947	668	11	3 253
0.35	19.5	424	2 049	15.6	908	1 141	22.2	11.8	2 957	723	12	4 583
0.40	18.2	438	2 096	15.1	919	1 177	20.6	11.2	2 864	740	16	9 992
0.46	16.7	457	2 140	14.4	928	1 212	18.7	10.4	2 722	749	23	29 820
0.50	15.5	475	2 175	13.7	935	1 240	17.2	9.7	2 587	752	32	87 050
0.55	14.2	495	2 210	12.9	941	1 269	15.6	8.9	2 433	750	47	317 100
0.60	12.8	522	2 246	11.9	945	1 302	13.9	8.0	2 246	742	81	$1.8 \cdot 10^6$
0.64	11.6	546	2 274	11.1	947	1 327	12.6	7.3	2 087	732	134	$8.9 \cdot 10^6$
0.70	10.1	587	2 307	9.9	946	1 362	10.7	6.2	1 851	710	317	$1.4 \cdot 10^8$
0.75	8.8	629	2 330	8.7	940	1 391	9.2	5.3	1 640	684	794	$2.7 \cdot 10^9$
0.80	7.4	684	2 345	7.5	925	1 420	7.7	4.3	1 409	647	2 767	$1.5 \cdot 10^{11}$
0.85	6.1	756	2 341	6.1	896	1 445	6.3	3.2	1 165	594	15 370	$3.6 \cdot 10^{13}$
0.90	4.7	857	2 298	4.7	837	1 462	4.8	2.1	902	511	209 500	$1.58 \cdot 10^{17}$

ловые эффекты реакции Q_g при детонации и при мгновенном взрыве в замкнутом объеме характеризуются следующими величинами: для ТКС максимальное значение $Q_g \approx 2 370$ кал/г характерно для смеси с $c(\text{H}_2) = 0.85$ при постоянном объеме (в случае детонации максимум составляет $\approx 2 255$ кал/г при том же значении $c(\text{H}_2)$), для ТВС максимум $Q_g \approx 770$ кал/г достигается при $c(\text{H}_2) = 0.45$.

Для определения динамических нагрузок представляют интерес динамические напоры продуктов детонации ($(\rho u^2)_d$) и газа ($(\rho u^2)_{sh}$) в зоне индукции (ρ — плотность, u — массовая скорость в лабораторной системе координат) (рис. 3,а). При стехиометрических концентрациях компонентов смеси напор равен 15

и 148 атм для ТКС (статические давления — 18.8 и 33.0 атм); 12 и 118 атм для ТВС (статические давления — 15.6 и 27.7 атм). Динамический напор в УВ значительно выше, чем в ДВ (при одинаковой скорости волны).

При оценке температурных нагрузок важная роль принадлежит теплоемкости продуктов детонации (рис. 3,б). Максимальные значения соответствуют стехиометрическим смесям: для ТКС теплоемкости c_p и c_v продуктов детонации в равновесном состоянии (индекс e) равны 56.4 и 46.2 кал/(моль · К) соответственно, в замороженном состоянии (индекс f) $c_p = 11.4$ кал/(моль · К) и $c_v = c_p - R$, а для исходной стехиометрической смеси замороженная $c_p = 7$ кал/(моль · К). Для ТВС теплоемкости

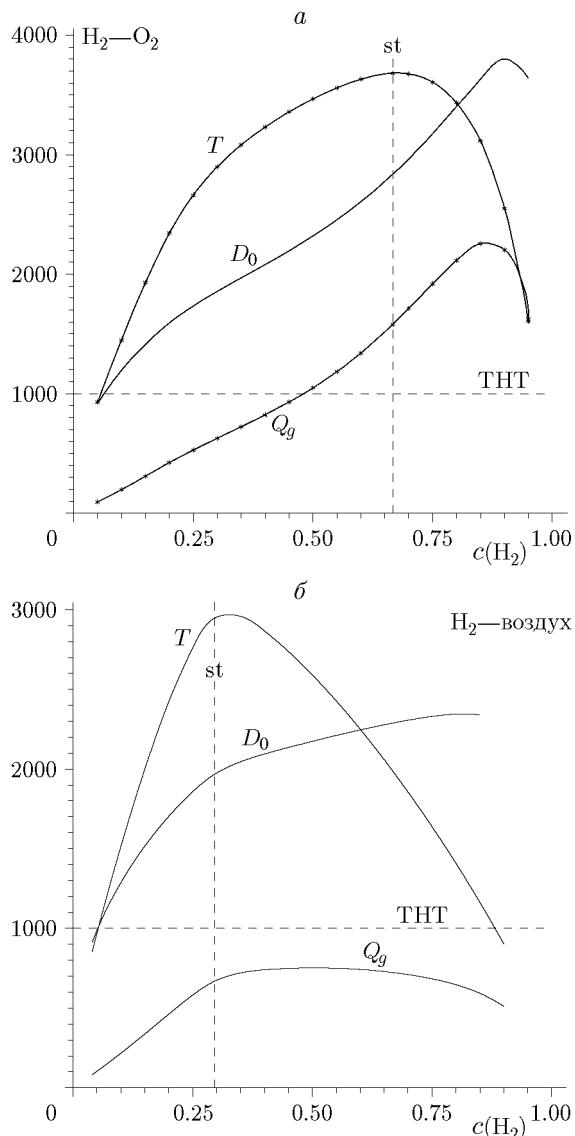


Рис. 1. Зависимости скорости ДВ D_0 [м/с], температуры продуктов детонации T [К] и удельного энерговыделения смеси Q_g [кал/г] от концентрации водорода в ТКС (а) и ТВС (б):

горизонтальные штриховые линии — тротиловый эквивалент

c_p и c_v продуктов детонации в равновесном состоянии равны 19.2 и 16.4 кал/(моль · К) соответственно, в замороженном состоянии $c_p = 10.2$ кал/(моль · К) ($c_v = c_p - R$), для исходной стехиометрической смеси замороженная $c_p = 6.8$ кал/(моль · К).

На рис. 4 представлены данные о молярном составе исходных веществ H_2 и O_2 (а также N_2 в случае ТВС) и основных продуктов детонации ТКС и ТВС (H_2O , OH , O , H , N_2 ,

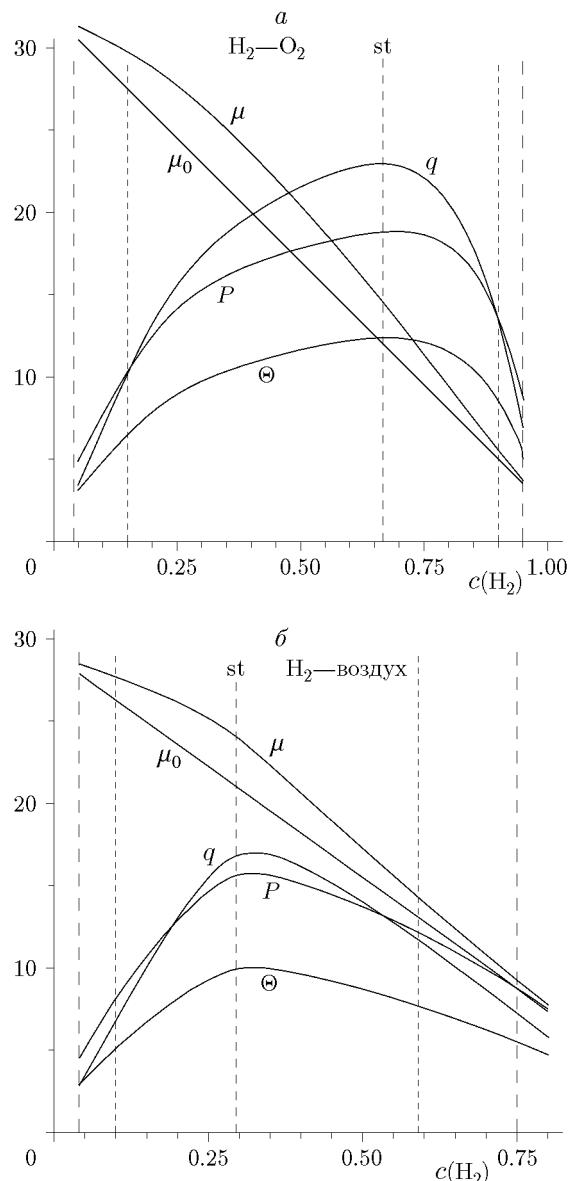


Рис. 2. Образмеренные давление, температура, энерговыделение, а также молекулярная масса исходной смеси и продуктов детонации ТКС (а) и ТВС (б)

NO). Максимальное количество водяного пара H_2O в продуктах приходится на стехиометрические смеси, однако при этом его количество заметно отличается от предсказанного идеализированной реакцией $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ (почти вдвое меньше). Законы химического равновесия предсказывают для каждого радикала H , O , OH , NO U-образные профили с максимумами, причем максимумы индивидуальных радикалов сдвинуты друг относительно друга. Температуры продуктов реакции водород-

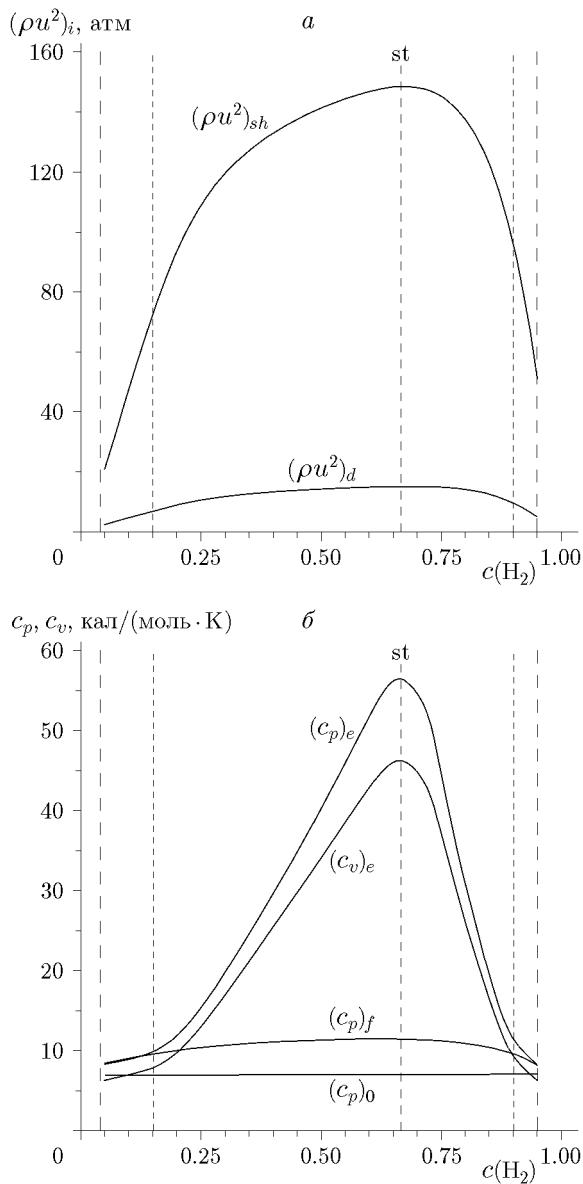


Рис. 3. Динамический напор продуктов детонации и газа в химпике ДВ (а) и удельные теплоемкости продуктов детонации (б) смеси $\text{H}_2\text{—O}_2$

ных смесей вблизи стехиометрии столь высоки, что даже инертный азот вступает в реакцию, образуя радикал NO. Следует особо отметить, что радикалы практически полностью исчезают вблизи концентрационных пределов, при этом в продуктах реакции остается лишь водяной пар H_2O и избыточный исходный компонент (O_2 или H_2 , а также N_2 в случае ТВС).

Характерную U-образную форму имеют зависимости поперечного размера ячейки многофронтовой детонации от молярной доли H_2

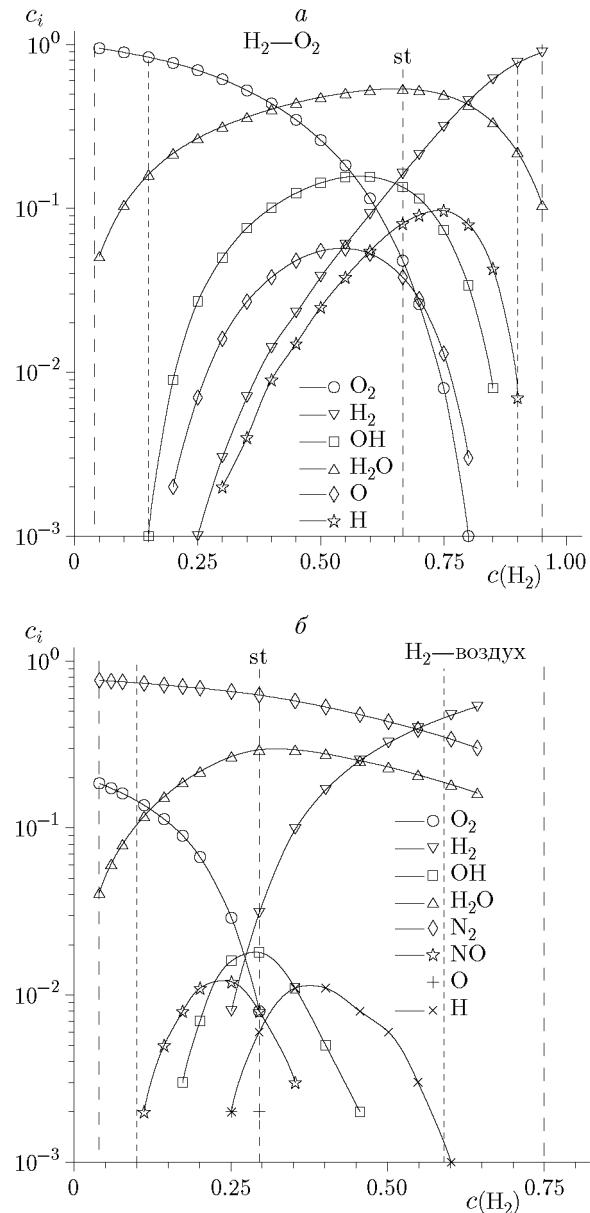


Рис. 4. Молярные доли основных химических компонентов в исходной смеси и продуктах детонации в ТКС (а) и ТВС (б)

(рис. 5, а, качественный ход зависимости схож для ТВС и ТКС). Минимальные значения размера ячейки составляют $a \approx 1.0$ мм для ТКС и $a \approx 11$ мм для ТВС и близки к значениям a в смесях стехиометрического состава. Экспериментальные данные на рис. 5, б взяты из работ [5, 8–13]. Аналогичную размеру a детонационной ячейки U-образную форму имеют зависимости критической энергии инициирования детонации водородных смесей от $c(\text{H}_2)$ в случае плоской (E_1), цилиндрической (E_2) и сфе-

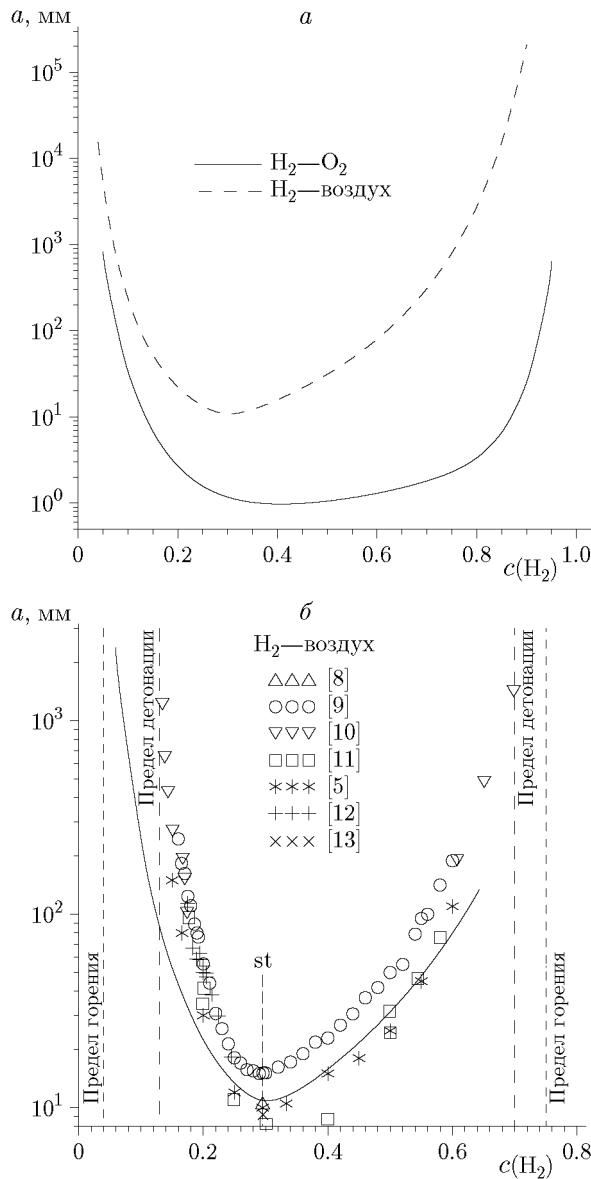


Рис. 5. Зависимость основного масштаба структуры фронта детонации — размера детонационной ячейки для ТКС и ТВС от молярной концентрации водорода (*a*). Сравнение известных экспериментальных данных (*б*)

рической (E_3) симметрии. На рис. 6, *a* приведены расчетные и экспериментальные данные о критической массе m_3 тротилового заряда для инициирования сферической детонации в ТВС. Для стехиометрической ТВС экспериментальное значение минимальной массы заряда взрывчатого вещества составило $m_3 \approx 1.1$ г, расчетное значение ≈ 0.8 г. Отметим чрезвычайно быстрое нарастание всех этих величин вблизи пределов.

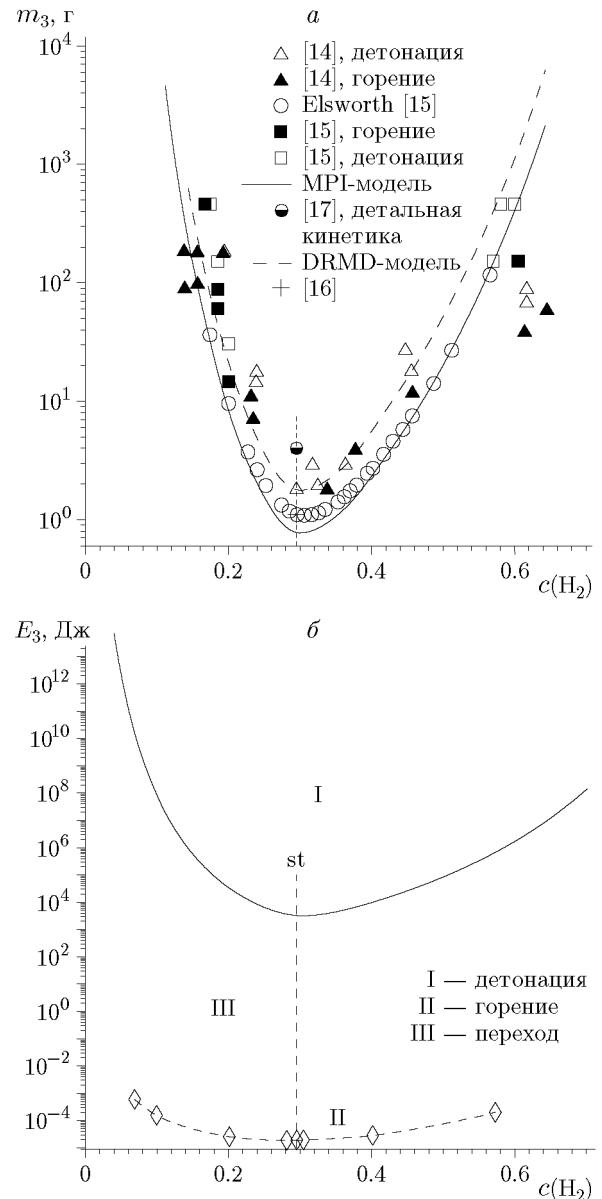


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные данные о критической массе тротилового заряда для инициирования сферической детонации в ТВС [14–17] (*а*). Критическая энергия инициирования сферической детонации (выше линии I) и воспламенения смеси (линия II) (*б*)

Степень адекватности расчетных и экспериментальных результатов для различных ТКС и ТВС подробно проанализирована в [4], здесь же на рис. 6, *б* в качестве примера дополнительно приведены данные по критической энергии зажигания и низкоскоростного горения ТВС (линия II) с минимальным значением $1.9 \cdot 10^{-5}$ Дж и возбуждения детонации (область I) с минимальной энергией 3350 Дж.

Следует подчеркнуть, что критическая энергия зажигания (воспламенения) смеси на много порядков меньше критической энергии инициирования детонации! Например, энергия зажигания смеси $7\text{H}_2 + 3\text{O}_2$ равна $0.7 \cdot 10^{-5}$ Дж, а возбуждения детонации — 8.8 Дж. Область III между линиями I и II соответствует нестационарным режимам распространения, среди которых особое место занимает режим перехода горения в детонацию (за счет искусственного воздействия на волну).

3.2. Варьирование начального давления

На рис. 7, *a* представлены экспериментальные данные различных авторов [5, 18–22] по зависимости размера ячейки a от начального давления p_0 для смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, линиями min, opt, max показаны расчетные зависимости $a(p_0)$, полученные при использовании этих данных. Например, скорость детонации D_0 при изменении начального давления на пять порядков меняется примерно на 20 %, при этом основные газодинамические параметры меняются несколько в большей степени (табл. 3). Заметно (на порядки) меняются размер детонационной ячейки $a/a_0 = 1/(p/p_0)^n$ и энергия $E/E_0 = 1/(p/p_0)^{2n}$.

Отношение величины a к размеру зоны индукции $l_{10} = (D_0 - u_2)\tau_{10}$ ДВ Чепмена — Жуге в виде $a/l_{10} = \text{const} = 29$ демонстрирует непостоянство этого соотношения для водородных смесей (τ_{10} — соответствующая задержка воспламенения смеси). Непостоянным для различных смесей оказывается и отношение размера ячейки a к ширине канала l_{**} (или диаметру d_{**}), при котором наблюдается реинициирование цилиндрической (или сферической) многофронтовой детонации при переходе волны из узкого канала в широкий (или из трубы в объем). Соотношения $l_{**}/a = \text{const} \approx 10$ для цилиндрического и $d_{**}/a = \text{const} \approx 13$ для сферического случая инициирования долгое время использовались в качестве критерии для оценок l_{**} и d_{**} . Анализ этих соотношений с библиографией первоисточников содержится в [5–7].

3.3. Варьирование начальной температуры

При оценках влияния температуры на параметры детонации следует иметь в виду, что эти параметры сильно зависят от того, какой

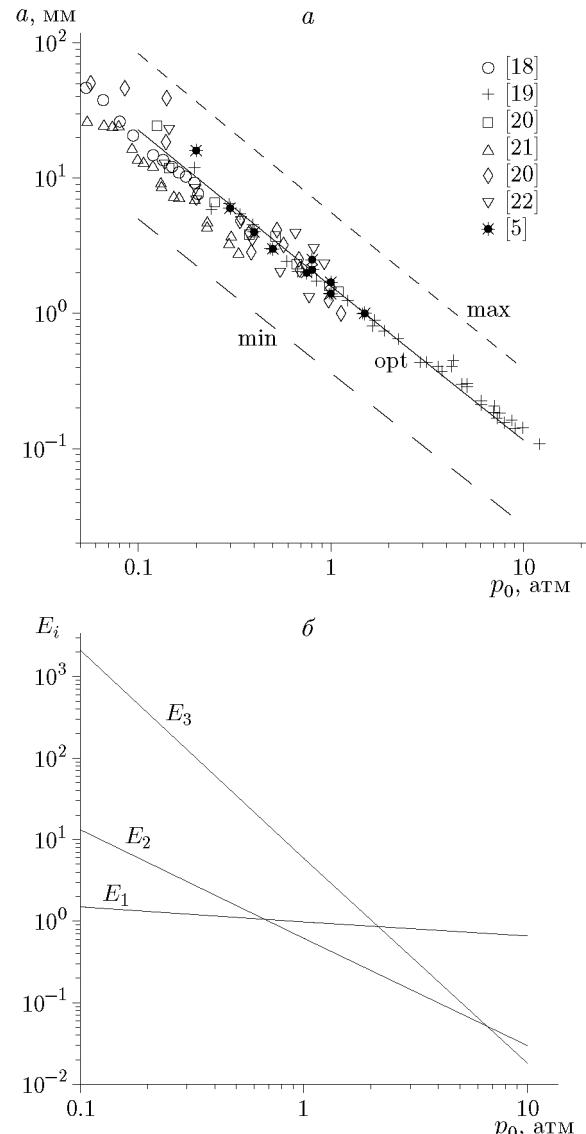


Рис. 7. Зависимость размера ячейки (*a*) и критической энергии инициирования детонационных волн различной симметрии (*б*) от начального давления (размерность E_1 — Дж/см², E_2 — Дж/см, E_3 — Дж)

параметр (давление или плотность) при этом поддерживается постоянным. В рамках модели идеального газа $pV = M/\mu RT$ молярная концентрация $c = M/(\mu V) = \rho/\mu = p/(RT)$, потому задержка воспламенения в форме уравнения Аррениуса записывается в виде

$$\tau = \frac{A \exp(E/RT)}{c^n} = \frac{A(RT)^n \exp(E/RT)}{p^n} = \frac{A\mu^n \exp(E/RT)}{\rho^n}.$$

Таблица 3

Параметры детонации в стехиометрической смеси водород — кислород при стандартной начальной температуре и переменном начальном давлении

p_0 , Па	D_0 , м/с	p/p_0	u , м/с	M_0	T , К	q	Q_g , кал/г	a , мм	E_1 , Дж/см ²	E_2 , Дж/см	E_3 , Дж
10^2	2 481	14.7	1 140	4.62	2 647	14.2	981	4 865	3.7	6 826	$3.13 \cdot 10^8$
10^3	2 593	15.9	1 190	4.83	2 935	16.5	1 140	330	2.3	299	$8.09 \cdot 10^5$
10^4	2 713	17.3	1 242	5.05	3 278	19.4	1 337	22.7	1.5	13.3	$2.14 \cdot 10^3$
10^5	2 837	18.8	1 294	5.28	3 682	22.9	1 580	1.6	0.98	0.62	6.0
10^6	2 958	20.3	1 345	5.51	4 143	27.2	1 873	0.12	0.66	0.03	0.018
10^7	3 064	21.7	1 391	5.71	4 631	31.9	2 202	0.009	0.47	0.002	$6.67 \cdot 10^{-5}$

Из этой формулы видно, что при $\rho = \text{const}$ задержка воспламенения $\tau \approx \exp(E/RT)$ монотонно уменьшается при увеличении температуры, поскольку

$$\frac{d\tau}{dT} \approx -\frac{E}{RT^2} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) < 0.$$

А при $p = \text{const}$ зависимость $\tau \approx T^n \times \exp(E/RT)$ представляет собой кривую с экстремумом, ибо первая производная

$$\frac{d\tau}{dT} \approx nT^{n-1} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) - T^n \frac{E}{RT^2} \exp\left(\frac{E}{RT}\right)$$

является знакопеременным соотношением, обращающимся в нуль при $T_* = E/(nR)$. Поскольку энергия инициирования и размер ячейки пропорциональны задержке воспламенения, то качественный ход этих параметров похож на поведение τ : монотонное уменьшение при $\rho = \text{const}$ и кривая с экстремумом при $p = \text{const}$.

На рис. 8 представлены результаты расчета критической энергии инициирования сферической детонации в зависимости от начальной температуры T_0 , подтверждающие вышеуказанные закономерности.

Следует отметить, что увеличение T_0 при $p_0 = \text{const}$ требует уменьшения плотности в силу соотношения $p = \rho RT/\mu$ (данные приведены в табл. 4, 5, γ_0 — показатель адиабаты исходной смеси, M_0 — число Маха ДВ, d_b — диаметр тела, инициирующего смесь при полетной скорости $w = D_0$). А увеличение температуры при $\rho = \text{const}$ одновременно требует и увеличения начального давления (данные приведены в табл. 6).

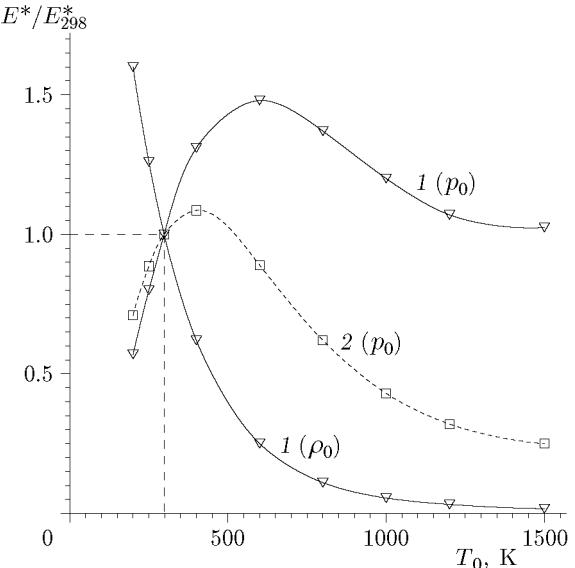


Рис. 8. Зависимость критической энергии инициирования сферической детонации от начальной температуры:

1 — смесь $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, 2 — смесь $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3.76\text{N}_2$;
(p_0), (ρ_0) — параметры, сохраняемые при изменении T_0

3.4. Детонация по состоянию за ударной волной

Наряду с вышеупомянутыми случаями $p_0 = \text{const}$ и $\rho_0 = \text{const}$, представляют интерес случаи, когда оба этих параметра изменяются, например при адиабатическом процессе $p = A\rho^\gamma$ или при воздействии УВ на смесь. Последний случай практически всегда наблюдается при переходе горения в детонацию. Расчет проводился по следующей схеме: по исходной покоящейся смеси с давлением p_0 запускалась плоская УВ с фиксированным числом Маха M , а параметры за этой УВ (p_1 , T_1 , ρ_1)

Таблица 4

Параметры детонации в стехиометрической смеси водород — кислород
при $p_0 = 1.0$ атм и переменной температуре T_0

T_0 , К	γ_0	c_0 , м/с	D_0 , м/с	p/p_0	u , м/с	M_0	μ , г/моль	ρu^2 , атм	T , К	Q_g , кал/г	a , мм	E_3 , Дж
200	1.4	441	2 871	28.4	1 322	6.52	14.7	23.7	3 745	1 662	1.2	3.43
250	1.4	492	2 853	22.6	1 308	5.8	14.6	18.5	3 709	1 618	1.42	4.78
298	1.4	537	2 837	18.8	1 294	5.28	14.5	15.1	3 682	1 580	1.59	5.95
400	1.39	621	2 807	13.8	1 267	4.52	14.4	10.7	3 638	1 510	1.85	7.62
600	1.38	757	2 755	9.1	1 216	3.64	14.2	6.46	3 584	1 389	2.04	8.1
800	1.37	870	2 707	6.7	1 166	3.11	14	4.37	3 551	1 279	2.06	7.56
1 000	1.35	968	2 661	5.3	1 115	2.75	13.8	3.13	3 528	1 173	1.96	6.39
1 200	1.34	1 056	2 616	4.4	1 064	2.48	13.6	2.33	3 513	1 074	1.84	5.54
1 500	1.33	1 174	2 546	3.4	983	2.17	13.4	1.54	3 497	915	1.68	4.97
1 800	1.31	1 280	2 473	2.8	898	1.93	13.1	1.03	3 487	759	1.58	—

Таблица 5

Параметры детонации в стехиометрической смеси водород — воздух
при $p_0 = 1.0$ атм и переменной температуре T_0

T_0 , К	D_0 , м/с	p/p_0	u , м/с	M_0	c_e , м/с	T , К	Q_g , кал/г	a , мм	d_b , мм	E_1 , Дж/см ²	E_2 , Дж/см	E_3 , Дж
200	1 980	23.3	891	5.9	1 089	2 938	689	8.7	23.4	9.4	33.5	2 320
250	1 973	18.6	884	5.27	1 089	2 942	678	10.0	27.2	8.9	35.8	2 881
298	1 966	15.6	876	4.82	1 090	2 947	668	10.9	30.2	8.4	36.5	3 253
400	1 954	11.6	861	4.15	1 092	2 960	648	12.0	34.6	7.3	34.8	3 529
600	1 930	7.8	830	3.37	1 100	2 991	608	12.2	37.9	5.6	26.6	2 904
800	1 906	5.8	798	2.9	1 107	3 023	567	11.2	37.7	4.5	18.8	2 020
1 000	1 881	4.6	765	0.58	1 116	3 056	524	10.0	36.6	3.7	13.6	1 401
1 200	1 855	3.9	730	2.33	1 125	3 086	479	8.9	35.9	3.2	10.3	1 043
1 500	1 813	3.1	673	2.05	1 140	3 130	408	7.7	36.2	2.9	7.7	813
1 800	1 766	2.5	612	1.83	1 154	3 169	335	7.1	39.1	2.9	7.1	—

выбирались в качестве начальных для последующего расчета ДВ. Вариант, когда массовая скорость u_1 не учитывалась, соответствует расчету поперечной волны, распространяющейся перпендикулярно фронту УВ и потоку за УВ. Зная эту скорость ДВ, можно установить и скорость фронта ДВ вместе с потоком (вдогонку за исходной УВ) как сумму скорости детонации и скорости потока (переносная скорость относительно неподвижной системы

координат). Такая переносная скорость заведомо превышает скорость исходной УВ, потому ДВ догонит УВ и приведет к нестационарному разрыву с последующим его распадом. Распространение ДВ против потока (так называемая ретонационная волна) будет определяться разностью между скоростью детонации и скоростью встречного потока. По этой же схеме проводились расчеты для случая, когда начальные параметры смеси выбирались соответству-

Таблица 6

Параметры детонации в стехиометрической смеси водород — кислород при $\rho_0 = \text{const}$

p_0 , МПа	T_0 , К	D_0 , м/с	p/p_0	u , м/с	M_0	c_e , м/с	T , К	q	Q_g , кал/г	a , мм	d_b , мм	E_1 , Дж/см ²	E_2 , Дж/см	E_3 , Дж
0.67	200	2 850	28.0	1 313	6.47	1 536	3 670	34.8	1 615	1.90	4.2	1.13	0.85	9.50
0.84	250	2 843	22.4	1 304	5.78	1 540	3 676	27.6	1 598	1.74	3.9	1.05	0.72	7.48
1.00	298	2 837	18.8	1 294	5.28	1 542	3 682	22.9	1 580	1.59	3.6	0.98	0.62	5.95
1.34	400	2 823	14.0	1 274	4.55	1 549	3 694	16.8	1 544	1.33	3.1	0.85	0.45	3.68
2.01	600	2 795	9.3	1 234	3.69	1 561	3 717	10.7	1 470	0.95	2.3	0.66	0.24	1.50
2.68	800	2 767	7.0	1 193	3.18	1 574	3 741	7.7	1 394	0.69	1.8	0.53	0.14	0.67
3.35	1 000	2 738	5.6	1 150	2.83	1 587	3 764	5.9	1 316	0.52	1.4	0.44	0.09	0.33
4.02	1 200	2 708	4.6	1 108	2.56	1 600	3 787	4.6	1 235	0.40	1.2	0.39	0.06	0.19
5.03	1 500	2 661	3.7	1 041	2.27	1 621	3 822	3.4	1 108	0.29	1.0	0.35	0.04	0.10
6.04	1 800	2 612	3.0	971	2.04	1 642	3 856	2.5	977	0.23	0.9	0.34	0.03	0.06
6.71	2 000	2 578	2.7	922	1.92	1 656	3 879	2.1	886	0.20	0.8	0.35	0.02	0.05

Таблица 7

Параметры детонации в стехиометрической смеси водород — кислород при параметрах, реализуемых за падающей ударной волной

M_{sw}	P_{10}	T_1 , К	D_{sw} , м/с	u , м/с	D_0 , м/с	p_d/p_0	c_e , м/с	T , К	Q_g , кал/г	p_d/p_1	a , мм	E_1 , Дж/см ²	E_2 , Дж/см	E_3 , Дж
1	1.0	298	537	0	2 837	18.8	1 543	3 682	1 580	18.8	1.58	0.92	0.58	5.28
1.2	1.5	336	644	165	2 848	25.5	1 554	3 743	1 602	16.8	1.06	0.83	0.35	2.12
1.4	2.1	373	752	308	2 855	32.4	1 564	3 792	1 617	15.3	0.77	0.76	0.23	1.00
1.6	2.8	413	859	438	2 860	39.3	1 572	3 834	1 626	13.9	0.58	0.70	0.16	0.53
1.8	3.6	455	967	559	2 863	45.9	1 580	3 870	1 630	12.7	0.46	0.65	0.12	0.30
2	4.5	500	1 074	675	2 864	52.2	1 587	3 902	1 630	11.6	0.37	0.60	0.088	0.18
2.2	5.5	549	1 181	785	2 864	58.1	1 593	3 930	1 626	10.6	0.31	0.56	0.068	0.12
2.4	6.6	602	1 289	893	2 862	63.6	1 599	3 956	1 619	9.7	0.26	0.52	0.052	0.076
2.6	7.8	659	1 396	998	2 859	68.7	1 606	3 980	1 608	8.9	0.22	0.49	0.041	0.051
2.8	9.0	719	1 504	1 102	2 855	73.4	1 612	4 002	1 595	8.1	0.18	0.45	0.033	0.035
3	10.4	784	1 611	1 204	2 851	77.7	1 618	4 024	1 579	7.5	0.16	0.42	0.026	0.024
3.2	11.9	852	1 718	1 304	2 845	81.7	1 624	4 045	1 561	6.9	0.14	0.40	0.021	0.017
3.4	13.4	924	1 826	1 404	2 839	85.4	1 631	4 065	1 540	6.4	0.12	0.37	0.017	0.012
3.6	15.1	999	1 933	1 504	2 831	88.8	1 638	4 085	1 517	5.9	0.10	0.35	0.014	0.009
3.8	16.8	1 078	2 041	1 603	2 824	92.0	1 645	4 105	1 492	5.5	0.09	0.33	0.011	0.006
4	18.7	1 160	2 148	1 701	2 815	95.0	1 652	4 125	1 465	5.1	0.08	0.32	0.010	0.005

Таблица 8

Параметры детонации в стехиометрической смеси водород — кислород при параметрах, реализуемых за отраженной ударной волной

M_{sw}	P_{30}	T_3 , К	w , м/с	D_0 , м/с	p_d/p_0	c_e , м/с	T , К	Q_g , кал/г	p_d/p_3	a , мм	E_1 , Дж/см ²	E_2 , Дж/см	E_3 , Дж
1	1.0	298	537	2837	18.8	1543	3682	1580	18.8	1.58	0.92	0.579	5.28
1.2	2.2	376	512	2858	34.0	1565	3802	1622	15.2	0.72	0.75	0.216	0.88
1.4	4.2	456	503	2871	53.0	1584	3899	1648	12.7	0.39	0.64	0.098	0.21
1.6	6.9	540	505	2879	74.9	1600	3980	1661	10.8	0.24	0.55	0.051	0.066
1.8	10.5	632	513	2882	98.3	1615	4049	1665	9.4	0.15	0.48	0.029	0.024
2	15.1	731	525	2883	122.6	1629	4111	1659	8.1	0.11	0.42	0.017	0.010
2.2	20.6	837	541	2880	147.0	1642	4168	1646	7.2	0.075	0.37	0.011	0.0046
2.4	27.0	951	558	2875	171.1	1655	4220	1627	6.3	0.055	0.33	0.007	0.0022
2.6	34.5	1071	576	2869	194.6	1668	4269	1601	5.7	0.042	0.30	0.0048	0.0012
2.8	42.9	1199	595	2861	217.3	1681	4317	1570	5.1	0.033	0.276	0.0034	0.00066
3	52.3	1333	614	2851	239.2	1695	4364	1534	4.6	0.026	0.257	0.0025	0.00039
3.2	62.7	1474	634	2841	260.3	1709	4410	1492	4.2	0.021	0.242	0.0019	0.00025
3.4	74.1	1620	654	2829	280.7	1723	4456	1447	3.8	0.017	0.231	0.0015	0.00016
3.6	86.5	1773	674	2816	300.4	1738	4501	1396	3.5	0.014	0.224	0.0012	0.00011
3.8	99.9	1932	694	2802	319.3	1754	4547	1342	3.2	0.012	0.221	0.0010	$8.37 \cdot 10^{-5}$
4	114.3	2096	713	2787	337.7	1770	4594	1283	3.0	0.012	0.221	0.0010	$8.37 \cdot 10^{-5}$

ющими параметрами отражения исходной УВ от твердой стенки. В табл. 7, 8 приведены расчетные данные для этих случаев: M_{sw} — число Маха падающей УВ, $P_{10} = p_1/p_0$ и T_1 — давление и температура за падающей УВ как исходные для последующего расчета ДВ, D_{sw} — скорость УВ, p_d/p_0 , p_d/p_1 — давление в продуктах детонации, идущей по исходной смеси и по смеси за УВ, w — скорость отраженной УВ, $P_{30} = p_3/p_0$, p_d/p_3 — давление в продуктах детонации смеси за отраженной волной, p_3 , T_3 — давление и температура за отраженной волной. Первая строка таблиц с $M = 1$ (акустическая волна) соответствует параметрам ДВ в исходной покоящейся смеси.

Из табл. 7, 8 видно, как меняются основные параметры при увеличении числа Маха УВ. Следует обратить внимание на то, что зависимости удельного энерговыделения смеси Q_g (и скорости ДВ D) при увеличении числа Маха УВ возрастают, достигают максимальных величин и затем уменьшаются (рис. 9, а).

Более того, максимальное значение Q_g достигается за УВ при числе $M \approx 1.8$. При этом значении M поток за УВ из дозвукового превращается в трансзвуковой, а при $M > 1.8$ — в сверхзвуковой (относительно неподвижной системы координат). Такое же значение числа Маха УВ характерно и для перехода горения в детонацию!

Критическая энергия инициирования детонации (а также размер детонационной ячейки) заметно уменьшаются с ростом числа Маха (рис. 9, б), что свидетельствует о возрастании взрывоопасности горючих смесей, подвергнутых ударно-волновому воздействию. Температура продуктов детонации возрастает при увеличении числа Маха, и ее поведение не похоже на поведение скорости ДВ и удельного энерговыделения смеси. Данные этого параграфа оказываются полезными при анализе инициирования дозвуковых и сверхзвуковых потоков горючей смеси.

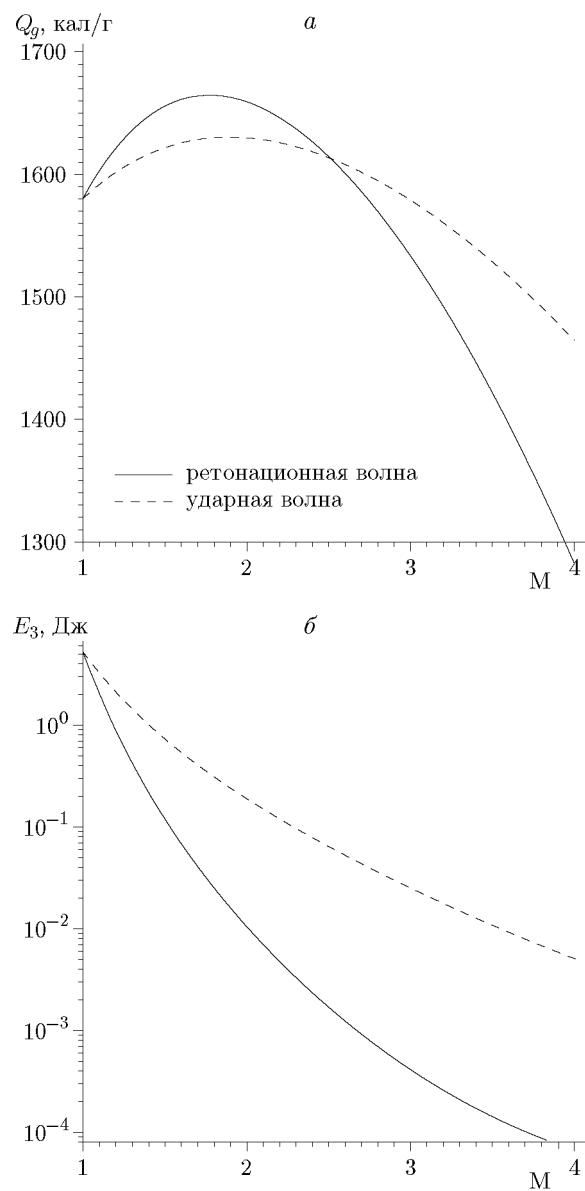


Рис. 9. Энерговыделение и критическая энергия инициирования сферической детонации в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, возбуждаемой в потоке за ударной волной

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты расчетов параметров горения, взрыва и детонации смесей водорода с кислородом и воздухом при варьировании соотношения между ними, а также начальных давлений и температур. Новизна числового и графического массивов определяется неизвестными ранее данными о критической энергии инициирования детонации, характерном размере детонационных ячеек, скорости детонации, энерговыделении в детонационных

волнах и других газодинамических параметрах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Институту гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (номер госрегистрации 121121600293-2).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Химическая энциклопедия. В 5 т. / под ред. И. Л. Кнусянца. — М.: Советская энциклопедия, 1988.
- Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: справочник / под ред. Д. Ю. Гамбурга, Н. Ф. Дубовкина. — М.: Химия, 1989.
- Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник. В 2 т. / под ред. А. Н. Баратова, А. Я. Корольченко. — М.: Химия, 1990.
- Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б. Водород: параметры горения и взрыва. — М.: Физматлит, 2008.
- Vasil'ev A. Dynamic parameters of detonation // Shock Waves Science and Technology Reference Library / F. Zhang (Ed.). V. 6: Detonation Dynamics. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. — P. 213–279.
- Васильев А. А. Ячеистые структуры многофронтовой детонационной волны и инициирование (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 9–30. — EDN: TJHZGN.
- Vasil'ev A. A. Safety Aspects of Combustible Gases and Vapours // Defence Industries: Science and Technology Related Security: Impact of Conventional Munition on Environment and Population / NATO Science Series / P. C. Branco, H. Schubert, J. Campos (Eds). — Dordrecht: Springer, 2004. — V. 44. — P. 37–63. — DOI: 10.1007/978-1-4020-2795-6_4.
- Bull D. C., Elsworth J. E., Shuff P. J., Metcalfe E. Detonation cell structures in fuel-air mixtures // Combust. Flame. — 1982. — V. 45. — P. 7–22. — DOI: 10.1016/0010-2180(82)90028-1.
- Guirao C. M., Knystautas R., Lee J. H., Benedick W., Berman M. Hydrogen-air detonations // Symp. (Int.) Combust. — 1982. — V. 19, N 1. — P. 583–590. — DOI: 10.1016/S0082-0784(82)80232-4.

10. Tieszen S. R., Sherman M. P., Benedick W. B., Shepherd J. E., Knystautas R., Lee J. H. S. Detonation cell size measurements in hydrogen-air-steam mixtures // Dynamics of Explosion / J. Bowen, J. Leyer (Eds). — 1986. — P. 205–219. — DOI: 10.2514/5.9781600865800.0205.0219.
11. Ciccarelli G., Ginsberg T., Boccio J., Economos C., Sato K., Kinoshita M. Detonation cell size measurements and predictions in hydrogen-air-steam mixtures at elevated temperatures // Combust. Flame. — 1994. — V. 99, N 2. — P. 212–220. — DOI: 10.1016/0010-2180(94)90124-4.
12. Benedick W. B., Knystautas R., Lee J. H. S. Large-scale experiments on the transmission of fuel-air detonations from two-dimensional channels // Dynamics of Shock Waves, Explosions, and Detonations. — 1985. — V. 94. — P. 546–555. — DOI: 10.2514/5.9781600865695.0546.0555.
13. Stamps D. W., Tieszen S. R. The influence of initial pressure and temperature on hydrogen-air-diluent detonations // Combust. Flame. — 1991. — V. 83, N 3–4. — P. 353–364. — DOI: 10.1016/0010-2180(91)90082-M.
14. Макеев В. И., Гостинцев Ю. А., Стругонов В. В., Бахон Ю. А., Чернушкин Ю. Н., Куликов В. Н. Горение и детонация водородно-воздушных смесей в свободных объемах // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 5. — С. 16–18.
15. 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. Bowen, J. Leyer (Eds). — 1986. — V. 106. — P. 181–202. — DOI: 10.2514/5.9781600865800.0181.0202.
16. Atkinson R., Bull D. C., Shuff P. J. Initiation of spherical detonation in hydrogen-air // Combust. Flame. — 1980. — V. 39, N 3. — P. 287–300. — DOI: 10.1016/0010-2180(80)90025-5.
17. Levin V. A., Osinkin S. F., Markov V. V. Direct initiation of detonation in a hydrogen-air mixture // Proc. of the Zeldovich Memorial. Russian Section of the Combustion Institute: Combustion, Detonation, Shock Waves. — 12–17 Sept., 1994, Moscow. — V. 2. — P. 363–365.
18. Lee J. H., Knystautas R., Guirao C. The link between cell size, critical tube diameter, initiation energy and detonability limits // Fuel-Air Explosions. — Univ. of Waterloo Press, 1982. — P. 157–187.
19. Манжалей В. И., Митрофанов В. В., Субботин В. А. Измерение неоднородностей детонационного фронта в газовых смесях при повышенных давлениях // Физика горения и взрыва. — 1974. — Т. 10, № 1. — С. 102–110.
20. Денисов Ю. Н., Трошин Я. К. Пульсирующая и спиновая детонация газовых смесей в трубах // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 125, № 1. — С. 110–113.
21. Strehlow R. A., Engel C. D. Transverse waves in detonation. II. Structure and spacings in H_2-O_2 , $C_2H_2-O_2$, $C_2H_4-O_2$, and CH_4-O_2 systems // AIAA J. — 1969. — V. 7, N 3. — P. 492–496. — DOI: 10.2514/3.5134.
22. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.

Поступила в редакцию 21.02.2023.
Принята к публикации 05.04.2023.