

03

## **Объемное инициирование газовой детонации путем лучистого нагрева взвешенных в газе микрочастиц**

© В.П. Ефремов, М.Ф. Иванов, А.Д. Киверин, И.С. Яковенко

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва  
E-mail: ivanov\_mf@mail.ru

Поступило в Редакцию 31 августа 2015 г.

Предлагается концептуальный подход к инициированию волн детонации путем нагрева тепловым излучением от внешнего источника микрочастиц, содержащихся в локальном объеме горючей газовой смеси. Механизмы инициирования волн горения и детонации в областях скопления нагретых излучением микрочастиц исследованы методами численного моделирования. Сформулированы критерии, определяющие геометрические масштабы двухфазной области, необходимые для инициирования в ней детонационной волны.

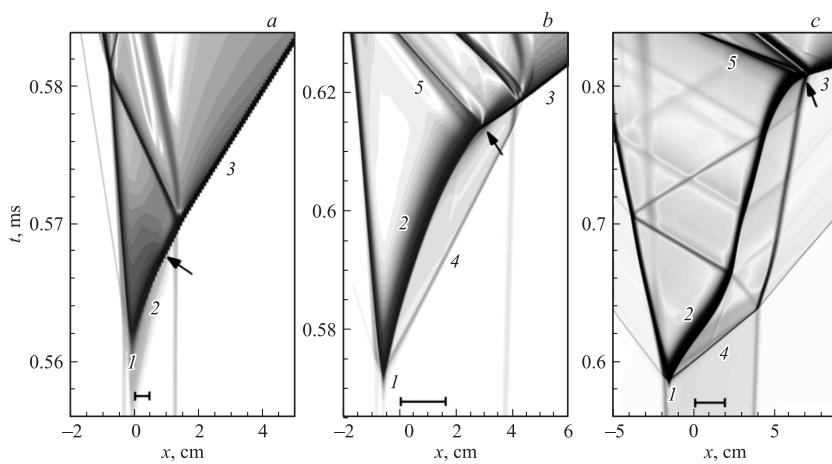
Перспективным методом эффективного преобразования энергии химического превращения является организация рабочих циклов на основе сжигания газообразных горючих смесей в детонационном режиме. При этом одной из основных проблем, стоящих на пути создания детонационных двигателей, является управляемое энергоэффективное инициирование детонации. Существует два основных подхода к реализации детонационных режимов: прямое инициирование детонации и переход от медленного горения к детонации. Последний характеризуется, с одной стороны, меньшими энергозатратами, а с другой — меньшей воспроизводимостью. Более того, в ряде наиболее интересных с практической точки зрения газообразных горючих смесей (водород–воздух, метан–воздух) детонация как следствие собственного ускорения ламинарного пламени недостижима, и предельным режимом является сверхзвуковое пламя, не обеспечивающее энергетически перспективного детонационного термодинамического цикла. В этом плане прямое инициирование детонации является более точно контролируемым. Зная параметры источника энергии (энергоемкость, скорость выделения энергии и пространственные масштабы), можно

спрогнозировать результирующий режим горения (см., например, [1]) и соответствующим образом их скорректировать и подобрать подходящий источник. К недостаткам этого подхода следует отнести связанную с вложением достаточно большой энергии за микросекундные времена высокую интенсивность воздействия на детонационно-способную смесь. Следствием этого является возникновение больших динамических нагрузок на стенки рабочей камеры или экспериментальной установки и существенное изменение состояния горючей среды в области подвода энергии. Перспективным представляется использование в ряде случаев бесконтактных методов, реализующих более мягкое инициирование детонации. Так, в работе [2] предлагается использовать химически активные микрочастицы, выполненные из нанотрубок, легированных железом, лучистый нагрев которых и их последующее испарение обеспечивает локальный энерговклад, достаточный для инициирования детонации в облаке взвешенных в горючей газовой смеси частиц. С другой стороны, можно показать, что необходимый для воспламенения разогрев газообразной горючей смеси может быть достигнут при лучистом нагреве химически нейтральных микрочастиц, взвешенных в этой среде [3]. Рассмотрим здесь возможные сценарии развития очагов воспламенения и инициирования детонации в локальном объеме, заполненном газообразной горючей смесью, содержащей химически нейтральные микрочастицы, разогреваемые от внешнего источника лучистой энергии.

Примем следующую постановку задачи. В начальный момент времени канал заполнен стехиометрической водородно-кислородной смесью при нормальных условиях. При этом в слое смеси шириной  $L_1$  равномерно распределены химически нейтральные микрочастицы, нагреваемые тепловым излучением с поверхности одного из торцов канала. Параметры частиц и их распределения следующие: размер частиц  $d_p = 1 \mu\text{m}$ , плотность материала частиц  $\rho_{p0} = 1 \text{ g/cm}^3$ , удельная теплоемкость частиц  $C_{p,p} = 10^7 \text{ erg/K}$ , объемная доля частиц  $\alpha_p = 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-5}$ . Параметры источника излучения соответствуют используемому в работе [2]: поток излучения с поверхности соответствует излучению с поверхности черного тела при температуре 5800 K, длительность срабатывания источника энергии составляет 1 ns. Соответственно длина пробега излучения в слое газовой смеси с частицами (в предположении, что газовая фаза прозрачна, а излучение поглощается только на частицах)  $L = 1.6 - 6.6 \text{ cm}$ .

Численное моделирование реализовалось с применением хорошо зарекомендовавших себя при расчете многомерных реагирующих потоков математической модели и компьютерного кода, описанных в [1,3] и других работах авторов. Газодинамика среды описывалась в рамках одномерной двухтемпературной двухскоростной модели, построенной на основе системы уравнений Навье–Стокса для сжимаемой вязкой среды с учетом теплопроводности, многокомпонентной диффузии и энерговыделения за счет химических реакций. Дисперсная фаза частиц рассматривалась в континуальном приближении, при этом обмен энергией и импульсом между фазами учитывался в стоковском приближении. В ходе расчета поглощения излучения частицы не меняли своего размера и фазового состояния, что вполне допустимо, так как влияние частиц на энергобаланс и разогрев смеси сказывалось только на стадии, предшествующей воспламенению, в области температур ниже температуры воспламенения ( $\sim 1100$  К), далее энергобаланс определялся только экзотермической реакцией горения. Для расчета кинетики горения водородно-кислородной смеси использовалась редуцированная схема реакций Ю. Варнатца. Перенос излучения рассчитывался в диффузионном приближении.

Разогрев тепловым излучением от внешнего источника горючей газообразной смеси с взвешенными микрочастицами определяется поглощением частицами падающего на их поверхность излучения и дальнейшей передачей избыточной энергии окружающему газу, нагреваемому с той степенью неоднородности, с которой в среде распределяются частицы. В частности, нагреваемый газ расширяется, увлекая микрочастицы из начальной области нагрева, в результате чего локальная концентрация частиц снижается, и дальнейший нагрев происходит на большем пространственном масштабе и имеет немонотонный характер. В случае, если толщина слоя частиц велика и такова, что за время разогрева смеси до температуры возгорания газодинамическая разгрузка затрагивает только приграничную область, в толще слоя устанавливается распределение температуры, следующее за профилем потока излучения, спадающем по экспоненте по мере углубления в толщу слоя частиц ( $T(x) \sim \exp(-x/L)$ ). В случае тонкого слоя нагрев идет практически равномерно во всей толще, что определяется конкуренцией факторов лучистого разогрева и разгрузки. Таким образом, в зависимости от толщины слоя формируются различные условия для воспламенения. В рассматриваемом диапазоне

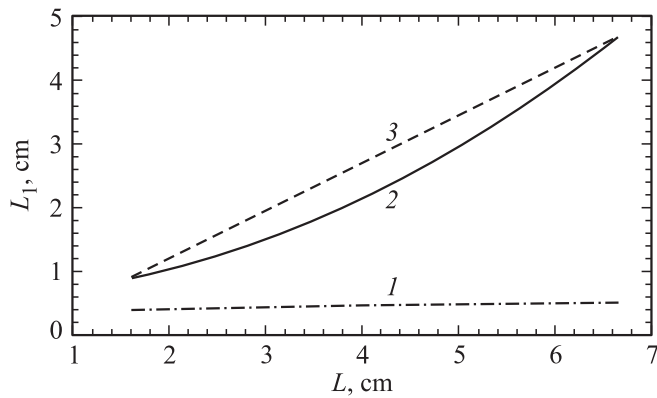


**Рис. 1.** Волновые картины развития процесса инициирования детонации внутри нагретого двухфазного слоя с длиной пробега излучения  $L = 3.33$  см: *a* — прямое инициирование детонации в слое начальной толщины 0.5 см; *b* — инициирование детонации в результате развития переходного процесса в слое начальной толщины 1.7 см; *c* — инициирование детонации в результате взаимодействия волны горения и переотраженных ударных волн в слое начальной толщины 2.0 см. 1 — первичный очаг, 2 — волна реакции, 3 — волна детонации в свежей газовой смеси, 4 — ударная волна, 5 — волна ретонации. Стрелкой показана точка возникновения детонации, горизонтальный отрезок показывает начальную толщину слоя.

начальных объемных концентраций микрочастиц время разогрева до температуры воспламенения велико по сравнению с характерными акустическими временными масштабами, что определяет выравнивание давления в области нагрева на момент воспламенения. В результате на момент воспламенения имеем очаг неравномерно нагретой среды при практически постоянном давлении. Режимы воспламенения в таких условиях соответствуют режимам нестационарного теплового взрыва, выделенным Я.Б. Зельдовичем при решении задачи о воспламенении на градиенте температуры (см., например, обзор [4]).

Рассмотрим подробнее воспламенение и развитие горения в условиях лучистого нагрева в слоях различной начальной толщины горючей

газовой смеси, содержащей микрочастицы, с целью определения принципиальной возможности мягкого возбуждения детонации в заранее заданных локальных объемах. В случае пологого распределения температуры, которое формируется в тонких слоях, спонтанная волна воспламенения, согласно классификации Я.Б. Зельдовича, вырождается в так называемую „недожатую“ детонационную волну (weak detonation). В процессе торможения при распространении вдоль градиента температуры такая волна перестраивается в детонацию, однако в случае тонкого нагретого слоя его толщины может оказаться недостаточно для установления детонации, и выход „недожатой“ детонации в свежую холодную смесь не дает перехода на устойчивый детонационный режим. Таким образом, существует критерий на минимальную толщину слоя микрочастиц  $L_{\min}$ , обеспечивающего объемное инициирование детонации в свежей смеси. С ростом толщины слоя снижение концентрации частиц и вызванное этим сглаживание температурного градиента имеет место только вблизи границы, обращенной к падающему излучению, тогда как формируемое внутри слоя распределение температуры имеет все более крутой градиент температуры, что определяет смену механизмов формирования волны горения, что видно из рис. 1. Отметим, что во всех рассмотренных случаях воспламенение происходит в плоскости, расположенной ближе к источнику излучения по сравнению с начальной границей слоя. Картина, представленная на рис. 1, *a*, соответствует слою малой толщины, в котором стационарная детонация развивается из „недожатой“ по описанному выше механизму. При большей толщине слоя частиц спонтанная волна по мере ее торможения вырождается в волну горения, тогда как генерируемая ею волна сжатия формирует ударную волну, бегущую впереди фронта горения (рис. 1, *b*, *c*). По мере роста крутизны температурного градиента такая система сначала обеспечивает нестационарный режим с ускорением фронта горения и последующим формированием детонации (рис. 1, *b*). В ходе развития нестационарного процесса реализуется режим так называемой „пересжатой“ детонации (overdriven detonation). Волна с завышенными по сравнению со стационарной детонацией параметрами, выходя в свежую холодную смесь, создает условия для развития в ней стационарной самоподдерживаемой детонации. Таким образом, до определенного предела увеличение толщины слоя частиц соответствует тенденции устойчивого инициирования детонации. Менее очевидным является режим, возникающий при дальнейшем увеличении толщины



**Рис. 2.** Расчетные значения критериев: *1* — минимальная толщина слоя частиц  $L_{\min}$ , обеспечивающая возникновение детонации (штрихпунктир); *2* — максимальная толщина слоя частиц  $L_{1 \max}$ , обеспечивающая инициирование детонации в режимах *1a*, *1b* (сплошная линия); *3* — максимальная толщина слоя частиц  $L_{\max}$ , обеспечивающая инициирование детонации в режимах *1c* (штриховая линия) для слоя частиц в неограниченном пространстве в диапазоне длин пробега от 1.6 до 6.66 см. Границы слоев с частицами заданы открытыми в область свежей горючей смеси.

слоя частиц. Здесь переотражение ударных волн от границ нагретой области (границ слоя частиц) создает условия для формирования детонации в результате взаимодействия пламени с ударной волной (рис. 1, *c*). Наконец, ограничением сверху является толщина слоя частиц  $L_{\max}$ , обеспечивающая затухание ударной волны на масштабах между границами и фронтом горения.

Ширина слоя частиц, обеспечивающая генерацию детонации за счет лучистого нагрева, для рассмотренного в данной работе диапазона длин пробега излучения приведена на рис. 2. Наибольший практический интерес имеет минимальная допустимая толщина таких слоев, так как чем тоньше слой, тем точнее локализовано место инициирования детонации, что принципиально для управления процессом. Из рис. 2 видно, что минимальная толщина слоев, а следовательно и пространственно-временная локализация „включения“ детонации, слабо зависит от длины пробега излучения. Естественно, генерация детонации

в этих условиях является более стабильной, и это служит для практики положительным фактором. При длинах пробега излучения меньше 1 см и выбранной интенсивности излучения детонация в тонких слоях не наблюдалась. Режимы с большими пробегами излучения также представляются малоперспективными в силу падения интенсивности нагрева в тонких слоях. Заметим, что детонация в слоях, ширина которых лежит в области между сплошной и штриховой линиями на рис. 2, инициируется только в результате воздействия на фронт горения переотраженных ударных волн (режим, изображенный на рис. 1, с). В силу этого можно ожидать меньшую устойчивость формирования детонации в этих слоях. Роль переотраженных ударных волн также возрастает, если детонация генерируется в слое частиц, прилегающем к торцу, через который падает излучение. Следует также отметить особенности воспламенения в случае, когда слой частиц примыкает к противоположному торцу канала и излучение проходит через слой холодной свежей смеси. В этом случае детонация, сформированная в окрестности закрытого торца, вырождается в ударную волну, распространяющуюся по продуктам горения и далее выходящую с границы слоя частиц в свежую холодную среду. Интенсивности такой ударной волны недостаточно для инициирования детонации в свежей смеси. Таким образом, в рассмотренных условиях сценарий с разогревом слоя частиц, примыкающего к дальнему от источника торцу канала, не дает формирования детонации внутри канала. С другой стороны, интерес представляет задача об инициировании детонации в двухкамерной системе, в которой одна (меньшая) камера содержит горючую смесь, засеянную микрочастицам, а вторая — чистую (свежую) горючую смесь. Камеры разделены тонкой мембраной или быстро раскрывающейся диафрагмой. Лучистый разогрев и взрывное увеличение давления в первой камере ведет к разрыву мембраны (раскрытию диафрагмы) и формированию детонационной волны в свежей газовой смеси в момент перехода детонационной волны из первой камеры во вторую.

В заключение сформулируем следующие основные результаты работы.

Показано, что лучистый нагрев относительно тонкого слоя взвешенных в газообразном горючем микрочастиц может приводить к управляемому (заданное место и время) инициированию детонации.

Выделены области устойчивого инициирования детонации в зависимости от толщины слоя частиц и его положения относительно стенок канала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 14-50-00124.

## Список литературы

- [1] *Kiverin A.D., Kassoy D.R., Ivanov M.F., Liberman M.A.* // Phys. Rev. E. 2013. V. 87(3). P. 033 015(10).
- [2] *Finigan D.J., Dohm B.D., Mockelman J.A., Oehlschlaeger M.A.* // Combust. Flame. 2012. V. 159. P. 1314–1320.
- [3] *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Либерман М.А.* // ЖЭТФ. 2015. Т. 148. В. 1.
- [4] *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Клумов Б.А., Фортвов В.Е.* // УФН. 2014. Т. 184. № 3. С. 247–264.