

цами углеродного материала. Карбид титана образуется в зоне реакции в виде частиц размером менее 1 мкм, которые быстро увеличиваются в зоне догорания. Закономерности горения и микроструктура образцов с погашенным фронтом горения позволяют предположить существование тепловых неоднородностей на микроскопическом уровне в зонах прогрева, реакции и, возможно, в зоне догорания. Присутствие никеля оказывает существенное влияние на закономерности горения и на фазовый состав продуктов.

Авторы благодарят И. П. Боровинскую за внимание к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдырев В. В., Александров В. В. и др. Докл. АН СССР, 1981, 259, 5, 1127.
2. Александров В. В., Корчагин М. А., Толочко Б. П. и др. ФГВ, 1983, 19, 4, 65.
3. Корчагин М. А., Александров В. В. ФГВ, 1980, 16, 6, 72.
4. Корчагин М. А., Александров В. В., Гусенко С. И.— В кн.: Проблемы технологического горения. Т. 1.— Черноголовка, 1981.
5. Шкиро В. М., Боровинская И. П.— В кн.: Процессы горения в химической технологии и металлургии.— Черноголовка, 1975.
6. Шкиро В. М., Доронин В. И., Боровинская И. П. ФГВ, 1980, 16, 4, 13.
7. Андреев К. К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ.— М.: Наука, 1966.
8. Боровский И. Б., Рыдник В. И.— В кн.: Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Вып. 5.— Ленинград, 1969.
9. Боровинская И. П., Мержанов А. Г., Новиков И. П. и др. ФГВ, 1974, 10, 1, 4.
10. Адушин А. П., Хайкин Б. И., Шкадинский К. Г. ФГВ, 1976, 12, 6, 819.
11. Хайкин Б. И.— В кн.: Процессы горения в химической технологии и металлургии.— Черноголовка, 1975.
12. Adesberg J. M., Cadoff L. I. Trans. ASME, 1967, 239, 6, 2158.

Поступила в редакцию 6/III 1987,
после доработки — 18/VI 1987

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ БЕЗГАЗОВЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ, ПЕРИОДИЧЕСКИ РАЗБАВЛЕННЫХ ИНЕРТНЫМИ ДОБАВКАМИ

А. Н. Фирсов, К. Г. Шкадинский

(Черноголовка)

Обычно характеристики процесса горения исследуются в предположении однородности исходной горючей сплошной среды [1—3] либо некоторой ее упорядоченности. Последнее применяется при изучении смесевых составов. Для них характерна неоднородность на некотором достаточно малом по сравнению с фронтом масштабе. Большая разница между этими микро- и макромасштабами приводит к тому, что многие частицы вещества находятся в похожих условиях и часть из них можно выбрать представителями остальных. Анализ закономерностей горения таких составов отражен в исследовании моделей распространения фронта по периодически упорядоченной среде. Сюда относятся модели типа «сэндвич» [4, 5], ячеистые модели (гетерогенные по составу и гомогенные по температуре) [5, 6], модели среды с однородной пористостью в процессах фильтрационного горения [7] и т. п. Во всех указанных выше примерах стационарный фронт горения представляет собой бегущую волну экзотермического превращения, описываемую автомодельным решением некоторой нелинейной системы уравнений в частных производных.

Неоднородности, препятствующие стационарному перемещению фронта горения, условно можно разделить на два типа. К первому отнесем локализованные неоднородности. Исследования нестационарности,

обусловленной такого рода факторами, позволяют рассматривать релаксационные характеристики фронта [8], явления недогорания [9] или переходные характеристики на границе контакта двух однородных горючих [10] и т. п. К другому типу относятся неоднородности сплошной среды, в которой микро- и макромасштабы одного порядка, для определения макрохарактеристик применяются не характеристики горения усредненной сплошной среды, а усредненные характеристики нестационарного фронта неоднородной среды. Необходимость в таких моделях возникает, например, при анализе степени однородности смешения, дисперсности, особенностей технологии изготовления или сознательно внесенных неоднородностей в исходную химически активную среду.

Ниже рассматривается процесс горения безгазового состава, периодически разбавленного продуктами горения (инертном). Степень разбавления в среднем составляет 10 %. Рассмотрены два случая. В первом предполагается, что закон изменения исходного состава синусоидальный, амплитуда колебаний составляет 5 %, длина волны колебаний варьируется. Во втором случае продукты горения периодически сосредоточены, образуя своеобразные инертные перегородки между неразбавленным веществом, в среднем их доля также составляет 10 %. Теплофизические параметры исходного вещества и продуктов для простоты предполагаются одинаковыми.

Постановка задачи. Рассмотрим математическую модель безгазового горения в безразмерном виде [3]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial t} &= \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + (1 - \eta) e^{\frac{\Theta}{1 + \beta \Theta}}, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &= \gamma (1 - \eta) e^{\frac{\Theta}{1 + \beta \Theta}}, \end{aligned} \quad (1)$$

решения которой удовлетворяют следующим начальным и краевым условиям:

$$\begin{aligned} x \geq 0, \quad t = 0: \quad \Theta &= \Theta_n, \quad \eta = \eta(x); \\ x = 0, \quad t \geq 0: \quad \Theta &= \Theta_r = \Theta_n + (1 - \eta_0)/\gamma. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\beta = RT_*/E$; $\gamma = cRT_*^2/QE$; $\Theta_n = (T_n - T_*)/RT_*^2$, η_0 — степень разбавления; R — газовая постоянная; E — энергия активации; Q — тепловой эффект реакции; T_* , T_n — эталонная и начальная температуры; $\eta(x)$ — глубина превращения (периодическая функция, среднее значение которой равно η_0 , период L).

В первом случае

$$\eta(x) = \eta_0 + A \sin(2\pi x/L),$$

а во втором глубина превращения на периоде представляет собой ступенчатую функцию:

$$\eta(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \{x/L\} \leq \eta_0, \\ 0, & \eta_0 < \{x/L\} < L. \end{cases}$$

Скобки обозначают дробную часть.

Специально проведенные расчеты показали, что установившийся режим горения «забывает» стадию инициирования и не зависит от сдвига по фазе осцилляций исходного состава, поэтому это не следует учитывать при задании начальных данных. Согласно [11], имеется область изменения определяющих параметров, где стационарное горение однородных безгазовых составов неустойчиво. Формируется новый устойчивый пульсирующий режим горения с собственной частотой и амплитудой колебаний. Тем самым в рассматриваемых условиях реализуется взаимодействие собственных колебаний фронта горения с вынуждающими колебаниями глубины превращения исходного состава. Анализ процесса проводился для устойчивых, неустойчивых и соответствующих границе

устойчивости режимов горения. Параметры задачи при $\eta = 0,1$ и $A = 0,05$ находились в области невырожденности горения.

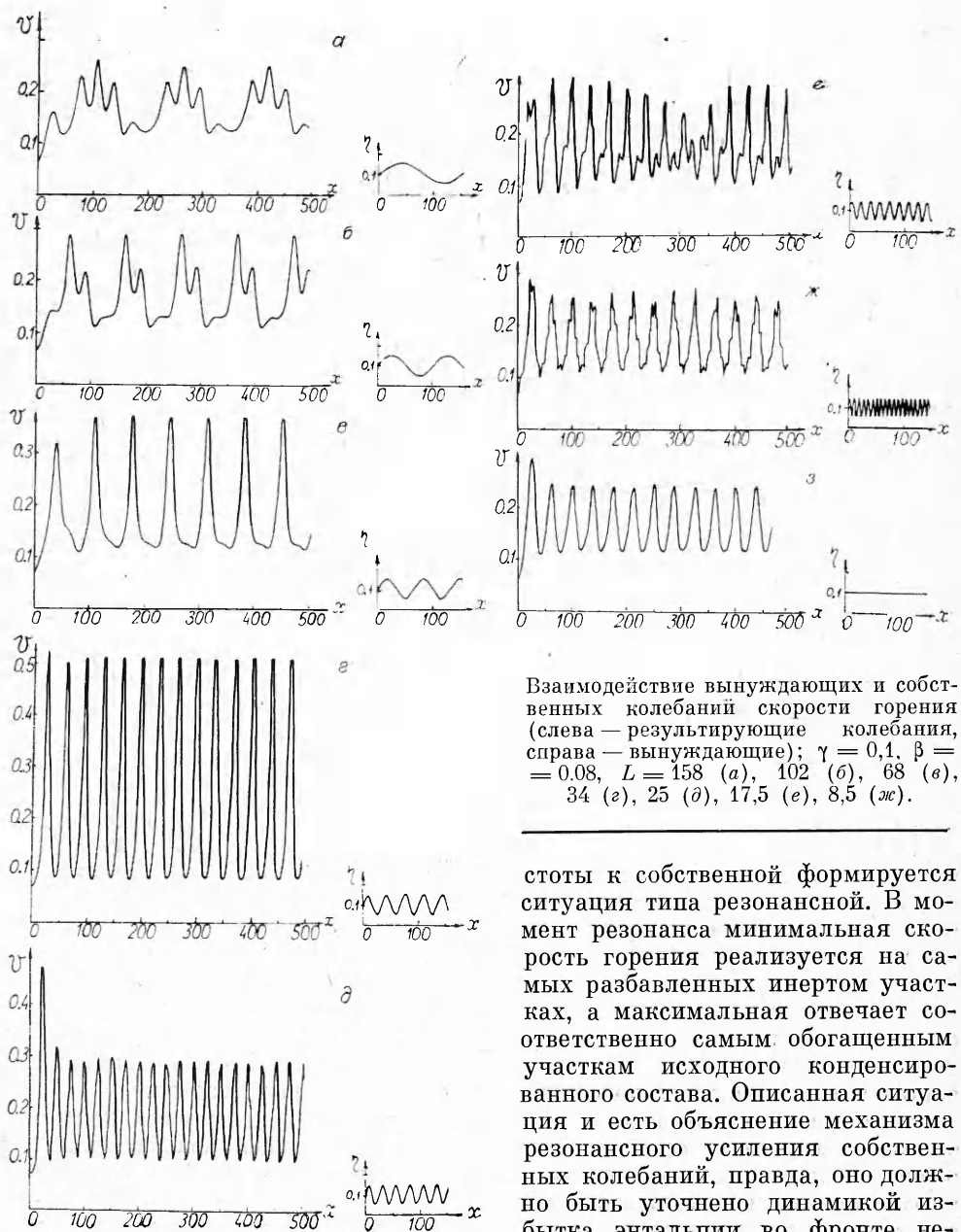
Методика вычислительного эксперимента. Система дифференциальных уравнений (1) заменялась системой разностных уравнений с помощью неявной трехточечной разностной схемы [12]. Учитывая специфику процесса, применяли адаптирующуюся к решению по пространству и времени разностную сетку. Необходимость в этом возникла как из соображений качественного описания локализованного по пространству и перемещающегося со временем фронта горения, так и с целью достоверной передачи информации об осциллирующих начальных данных по составу. Моделировался нестационарный процесс инициирования горения состава нагретой стенкой до момента установления периодического режима распространения фронта. Определялись пространственно-временное распределение поля температуры, глубины превращения и скорости тепловыделения, фиксировалась также мгновенная скорость перемещения фронта в зависимости от пространственной переменной (каждой точке ставилось в соответствие значение мгновенной скорости горения данного участка). На основании анализа серии расчетов, отличающихся значениями параметров, отвечающих за устойчивость гомогенно разбавленного состава, и параметров, характеризующих закономерности периодического распределения глубины превращения исходного состава, формировались выводы о закономерностях процесса.

Закономерности динамики процесса. Прежде всего отметим, что периодическое изменение глубины превращения исходного состава порождает периодический установившийся режим его горения. Особенности этого режима качественно зависят от характеристик устойчивости. Высокие частоты колебаний исходного состава, когда L меньше характерной ширины зоны реакции, практически соответствуют его гомогенному разбавлению. При низких частотах, когда длина волны колебаний глубины превращения исходного состава существенно превышает характерные размеры фронта, устанавливается квазистационарный режим распространения фронта горения. В этом случае пространственно-временные распределения температуры и глубины превращения во фронте горения близки к аналогичным для гомогенных составов, если их параметры соответствуют мгновенным условиям перед квазистационарным фронтом.

Следует также отметить тенденцию синхронизации моментов достижения минимальной мгновенной скорости горения и сгорания участка состава, максимально разбавленного инертном. На достаточно высоких частотах вынуждающих колебаний эта тенденция разрушается.

Для устойчивого режима (параметры выбраны достаточно далеко от границы устойчивости) наблюдается установившийся колебательный режим распространения фронта, квазистационарно подстраивающийся к колебаниям исходного состава. Ввиду нелинейной зависимости скорости горения от температуры в зоне реакции искажается синусоидальная функциональная зависимость скорости горения от пространственной переменной. По мере увеличения частоты колебаний исходного состава амплитуда колебаний скорости убывает, а их характер приближается к синусоидальному. В пределе режим горения соответствует горению гомогенно разбавленных составов.

Если гомогенно разбавленный состав горит неустойчиво (реализуется колебательный режим) и, следовательно, имеет собственную частоту колебаний (соответственно длину волны), то наблюдается интересное нелинейное взаимодействие вынуждающих колебаний глубины превращения исходного состава и собственных колебаний фронта (см. рисунок). Для низких частот вынуждающих колебаний устанавливается периодический режим распространения фронта горения, длина волны которого совпадает с длиной волны вынуждающих их колебаний. На каждом периоде имеются дополнительные колебания, частота которых близка к собственной частоте. По мере стремления вынуждающей ча-



Взаимодействие вынуждающих и собственных колебаний скорости горения (слева — результирующие колебания, справа — вынуждающие); $\gamma = 0,1$, $\beta = 0,08$, $L = 158$ (а), 102 (б), 68 (в), 34 (г), 25 (д), 17,5 (е), 8,5 (ж).

стоты к собственной формируется ситуация типа резонансной. В момент резонанса минимальная скорость горения реализуется на самых разбавленных инертном участках, а максимальная отвечает соответственно самым обогащенным участкам исходного конденсированного состава. Описанная ситуация и есть объяснение механизма резонансного усиления собственных колебаний, правда, оно должно быть уточнено динамикой избытка энтальпии во фронте нестационарного горения.

Для высоких вынуждающих частот устанавливается сложный колебательный режим горения, низкие частоты которого примерно равны собственным. На них накладываются возмущающие колебания с частотой вынуждающих колебаний, с ростом частоты диссипация усредняет эти возмущения, и в пределе получаем колебания скорости горения гомогенно разбавленного состава.

Для параметров, лежащих вблизи границы устойчивости, характерна «промежуточная» динамика. Здесь наблюдается слабовыраженный резонансный эффект, поскольку вблизи границы даже в устойчивой области возмущения затухают колебательным образом, и следовательно, такие системы обладают собственной частотой.

В заключение анализа воздействия синусоидальных колебаний глубины превращения исходного состава отметим следующее. Мы имеем жесткие значения частот и амплитуд вынуждающих колебаний исход-

ного состава. Для анализа используем характеристики собственных колебаний гомогенно разбавленных составов. Реально горит вещество переменного состава, поэтому не следует воспринимать динамику как взаимодействие двух жестко заданных колебательных систем, скорее, одна из них адаптируется к другой, сохраняя в определенной мере свои характеристики. При низкочастотных вынуждающих колебаниях на каждом периоде можно выделить краткое число колебаний с длиной волны, близкой к собственной. При переходе от одной кратности к другой отмечалось нарушение периодичности, подобное изображенному на рисунке. Учитывая ограниченные возможности вычислительного эксперимента, нельзя утверждать, что периодичность не установится после более длительной эволюции.

Специфические закономерности наблюдаются при периодически сосредоточенном введении инертной добавки в исходный конденсированный состав. Здесь устанавливается релаксационный колебательный режим распространения фронта. Описание динамики цикла начнем с момента подхода фронта горения к инертной перегородке. Здесь энерговыделение практически прекращается и наступает этап чистого перераспределения тепла. Ближайшая, еще не прореагировавшая порция активного конденсированного состава прогревается. Поскольку после некоторого индукционного периода (депрессии) химическое тепловыделение становится ведущим в тепловом балансе, начинается самоускоряющийся процесс экзотермического превращения с резким повышением температуры в зоне реакции (вспышка). Дальнейший этап можно трактовать как нестационарное сгорание предварительно прогретого состава до встречи с очередной порцией инертного разбавителя. Затем весь цикл повторяется. Увеличение частоты (при сохранении средней степени разбавления) приводит к уменьшению размеров инертной перегородки, сокращает индукционный период прогрева очередной порции состава, но и размер самой порции соответственно сокращается. Поэтому общая динамика цикла практически сохраняется. Особенности динамики горения «устойчивых» и «неустойчивых» составов нивелируются по следующей причине. Прогрев очередной порции во время индукционного периода переводит параметры горения в область устойчивости (повышение температуры перед фронтом). Поэтому этап нестационарного сгорания предварительно прогретого состава протекает в режиме квазистационарного горения неравномерно нагретого конденсированного вещества. Естественно, при этом теряется информация о собственной частоте и не видно колебаний с собственными частотами на фоне релаксационного цикла. Нестационарное горение идет в «сверхадиабатическом» режиме, температура в зоне реакции выше адиабатической за счет использования тепла предварительно сгоревших порций. Разумеется, в дальнейшем протекает процесс тепловой релаксации, и температура усредняется к адиабатической.

Рассматриваемый процесс зависит от степени разбавления исходного состава инертном и от закономерности его распределения по образцу. В данной публикации преследовалась цель показать лишь возникающие здесь качественные закономерности. Изучалось также влияние частоты вынуждающих колебаний на среднюю скорость. В силу малых амплитуд колебаний она слабо отличалась от средней скорости горения гомогенно разбавленных составов, но имела минимум в области резонансных частот.

Авторы выражают благодарность А. Г. Мержанову и А. А. Бутакову за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Франк-Каменецкий Д. А. ЖФХ, 1938, 12, 1, 100.
2. Зельдович Я. Б. ЖЭТФ, 1942, 12, 11/12, 498.
3. Новожиллов Б. В. Докл. АН СССР, 1961, 141, 151.
4. Бахман Н. Н., Беляев А. Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем.— М.: Наука, 1967.

5. Алдушин А. П., Хайкин Б. И.— В кн.: Теория и технология металлургических процессов.— Новосибирск: Наука, 1974.
6. Алдушин А. П., Хайкин Б. И., Шкадинский К. Г. ФГВ, 1976, 12, 6, 819.
7. Алдушин А. П., Ивлева Т. П., Мержанов А. Г. и др.— В кн.: Процессы горения в химической технологии и металлургии.— Черноголовка, 1975.
8. Зельдович Я. Б. Докл. АН СССР, 1976, 230, 3, 567.
9. Новиков С. С., Похил П. Ф., Рязанцев Ю. С. и др. Докл. АН СССР, 1968, 180, 6, 1391.
10. Струнина А. Г., Мартемьянова Т. М., Барзыкин В. В. и др. ФГВ, 1974, 10, 4, 518.
11. Шкадинский К. Г., Хайкин Б. И., Мержанов А. Г. ФГВ, 1971, 7, 1, 19.
12. Самарский А. А. Теория разностных схем.— М.: Наука, 1977.

Поступила в редакцию 22/XII 1986

ВЛИЯНИЕ СТАТИСТИКИ ПОГЛОЩАЮЩИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Е. И. Александров, А. Г. Вознюк

(Томск)

Одна из интересных особенностей модели лазерного возбуждения ВВ с локализацией очага инициирования на разогреваемых в поле излучения поглощающих неоднородностях [1] — неизбежное присутствие элемента случайности, проявляющееся в вероятностном характере нахождения в освещенном объеме ВВ «опасной» неоднородности и, как следствие, в неоднозначности результата взаимодействия лазерного излучения с ВВ в области критических световых потоков. Поэтому получаемые в экспериментах кривые частоты взрывов [1] должны отражать определенные детали указанного взаимодействия.

Эта исходная предпосылка в свое время позволила обнаружить влияние статистики лазерного излучения на вид кривых частоты и оценить характерный размер поглощающих неоднородностей [2]. Но если на результат опыта влияет статистика излучения, следует ожидать и влияния статистики неоднородностей.

Пусть в освещенном объеме ВВ V_0 с распределением освещенности по некоторому закону $\varepsilon(V)$ имеется включение радиуса R . При этом вероятность развития процесса взрывчатого разложения из центра, определяемого данным включением, есть $W_i = \frac{1}{V_0} \int_{\varepsilon_{0i}}^{\infty} V(\varepsilon) d\varepsilon$, где ε_{0i} — критическая освещенность, необходимая для возникновения тепловой неустойчивости в результате разогрева. При наличии n включений вероятность инициирования находится из выражения

$$W_n = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - W_i) = 1 - \exp \sum_{i=1}^n \ln(1 - W_i).$$

В наиболее общем случае при наличии широкого спектра включений с распределением по размерам $C(R)$

$$W = 1 - \exp \left\{ V_0 \int_0^{\infty} C(R) \ln \left[1 - \frac{1}{V_0} \int_{\varepsilon_{0i}}^{\infty} V(\varepsilon) d\varepsilon \right] dR \right\}. \quad (1)$$

Отсюда следует, что, если в эксперименте фиксировать распределение $V(\varepsilon)$ (условия освещения), значения W будут определяться только функцией $C(R)$, т. е. статистикой возможных центров инициирования.

При выборе в качестве объекта исследований азида свинца учитывалось [3], что поглощающие центры в азидной матрице представляют собой металлический продукт разложения исходного ВВ (свинец), не-