

- ных веществ при воздействии импульса светового потока // Там же.— 1979.— 15, № 3.— С. 77—82.
15. Марусин В. П., Кузнецов В. Т., Скорик А. И. Особенности устойчивого зажигания системы ПХА + уротропина тепловым импульсом // Там же.— 1990.— 26, № 2.— С. 37—40.

г. Томск

УДК 546.36

*В. А. Бабук, В. А. Васильев, О. Я. Романов,
В. И. Марьяш, Г. А. Толмачев*

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ КАПЕЛЬ $Al-Al_2O_3$ В АКТИВНОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

По результатам комплексного экспериментального исследования установлен ряд явлений, составляющих процесс эволюции конденсированной фазы продуктов сгорания твердых топлив, разработаны их физико-математические модели. Использование оптимизационной процедуры при определении коэффициентов согласования моделей позволило получить хорошее соответствие экспериментальным данным, что подтверждает сравнительно высокое качество моделирования и обеспечивает возможность прогнозирования характеристик двухфазного потока.

При горении твердых топлив (ТТ), содержащих Al , у поверхности горящего топлива формируется двухфазный поток, содержащий конденсированные продукты и несущую газовую фазу. Конденсированные продукты состоят из агломератов [1] и частиц высокодисперсного оксида. При движении потока происходит взаимодействие фаз и частиц продуктов между собой. В результате этого трансформируются свойства потока, что приводит к изменению эффективности использования ТТ в разнообразных энергетических установках. Для решения задачи моделирования характеристик двухфазного потока исследованы физико-химические превращения в этом потоке.

Эксперименты проводились при сжигании образцов ТТ в установках постоянного объема и давления в среде инертного газа [2, 3]. Методика исследования предусматривала на различных стадиях эволюции определение характеристик конденсированных продуктов посредством отбора, визуализацию частиц и измерение температуры фаз. Продукты отбирались при совместном использовании инертной жидкости, газа и аэрозольных фильтров. При этом имелась возможность отобрать частицы с размерами от десятых долей до тысяч микрон. Конденсированные продукты подвергались дисперсионному и массовому анализам, а также определялись параметры их структуры и химического состава. Температуру измеряли методами оптической пирометрии [2, 4]. Визуализация частиц проводилась скоростной киносъемкой с использованием оптически прозрачных окон. Моделирование различных стадий эволюции реализовано размещением образцов ТТ в трубке из сублимирующих материалов (фторопласта или плексигласа). Длина трубки влияла на время пребывания продуктов в условиях одномерного потока. Экспериментально установлено следующее:

1) свойства топлива определяют соотношение между количествами агломератов и высокодисперсных оксидов, поставляемых с поверхности горящего ТТ, а следовательно, и начальные значения температуры, окислительного потенциала и концентрации конденсированных продуктов двухфазного потока;

2) агломераты — это капли металла и оксида, находящиеся в равновесном положении (в этих образованиях возможно наличие газовых включений);

© В. А. Бабук, В. А. Васильев, О. Я. Романов, В. И. Марьяш, Г. А. Толмачев, 1993.

9 Физика горения и взрыва № 3, 1993 г.

129

3) металл агломератов горит в газофазном режиме, при этом агломераты окружены характерным «шлейфом» продуктов сгорания; в процессе эволюции непрерывно уменьшается масса металла в потоке;

4) между металлом и оксидом агломерата возможно химическое взаимодействие с образованием газообразных продуктов, поэтому на определенных этапах эволюции происходит раздувание агломератов, выброс газообразных продуктов и уменьшение количества оксида в агломератах;

5) частицы оксидов могут осаждаться на агломератах. Данное явление, как правило, наиболее значимо на начальных стадиях эволюции вблизи поверхности горящего ТТ.

Можно констатировать, что свойства конденсированных продуктов и, как следствие, характеристики газовой фазы (температура, химический состав, поле скоростей) изменяются из-за горения металла агломератов, химического взаимодействия конденсированных Al и Al_2O_3 в агломератах, изменения структуры агломератов вследствие их раздувания и изменения масс металла и оксида, а также осаждения частиц оксида несущей газовой фазы на агломератах.

Для спектра исследованных ТТ экспериментально получена зависимость параметров продуктов от расстояния до поверхности горения ТТ: Z_m — доля несгоревшего Al по отношению к его исходной массе в ТТ и характеристика степени сгорания горючего; Z_m^{OK} — количество исходного металла, участвующего в образовании окиси агломератов; η — относительное массовое содержание оксида в агломератах; δ_{43} — среднемассовый диаметр.

Математическая модель эволюции конденсированных продуктов создавалась как совокупность моделей отдельных явлений, которые затем согласовывались между собой и проверялись на адекватность экспериментально наблюдаемым явлениям.

Газофазное горение металла агломерата. В настоящее время для описания горения капель легкокипящих металлов в активных средах наибольшее распространение получили два подхода. Первый базируется на модели парофазного диффузионного горения капель углеводородного топлива, предложенной в [5]. Работы [6, 7 и др.], в которых использовался данный подход, направлены на учет особенностей горения металла и образования конденсированных продуктов сгорания. По второй модели [8] газообразный окислитель диффундирует к поверхности металла, где протекает гетерогенная реакция. Затем часть продуктов взаимодействия испаряется, и в области, окружающей каплю, происходит конденсация. Сопоставление положений указанных подходов с экспериментальными данными позволило отдать предпочтение первому из них. Для описания горения металла наряду с традиционными допущениями принято, что зона горения имеет конечные размеры, в каждой ее точке протекают равновесные химические реакции; обдув частицы газовым потоком учитывается в приближении приведенной пленки; поверхность капли металла, занятая каплей окиси («нашлепкой» окиси [2]), исключается из процесса горения.

Созданная модель включает уравнения теплопроводности и диффузии для характерных зон (поверхность капли — зона горения; зона горения; зона горения — окружающая среда). Интегрирование этих уравнений позволяет получить систему трансцендентных алгебраических уравнений для отыскания распределения температуры в области горения, геометрических размеров характерных зон и скорости горения.

Анализ модели свидетельствует о ее соответствии (качественном и количественном) экспериментально фиксируемому явлению. В частности, расчетные значения температур поверхности капли металла и зоны горения близки экспериментальным.

Для задач практического характера по определению скорости горения может быть использована макромодель, полученная при некоторых дополнительных допущениях. Введение в нее коэффициента согласо-

ния позволяет обеспечить хорошее соответствие экспериментальным данным.

Взаимодействие конденсированных Al и Al_2O_3 агломерата. Термодинамическим анализом и экспериментально [8, 9] показана возможность протекания химической реакции между Al^k и $Al_2O_3^k$ с преимущественным образованием газообразных Al_2O и Al. В зависимости от характера протекания данного взаимодействия могут иметь место различные следствия для процесса эволюции (изменение количества Al^k , $Al_2O_3^k$ в агломерате, его объема и внутренней структуры). Рассматриваемый процесс осуществляется в следующей последовательности.

На поверхности контакта $Al^k - Al_2O_3^k$ образуется адсорбционный слой. При достижении определенной температуры происходит химическое взаимодействие и формирование первичных газовых пузырей, после чего последние сливаются. Поскольку время слияния пузырей определяется их размерами, то можно предположить, что первоначально на поверхности контакта $Al^k - Al_2O_3^k$ существует некоторое количество центров роста пузырей, каждый из которых подпитывается определенной зоной. После того, как вследствие своего роста пузырь покидает границы адсорбционного слоя, существенным для изменения его размеров становится процесс конденсации газообразных продуктов. Таким образом, интенсивность роста пузыря определяется конкуренцией процессов газообразования и конденсации. Если поверхность пузыря достигнет внешней поверхности агломерата («нашлепки» окиси), то произойдет выброс газообразных продуктов в окружающую среду. В противном случае агломераты только раздуваются.

При моделировании указанных явлений принято, что пузыри сливаются быстро и процесс не оказывает влияния на скорость взаимодействия, зона подпитки имеет постоянные размеры, а распределение температуры по сечению агломерата отсутствует.

Модель представляет собой совокупность уравнений, описывающих скорости газообразования и конденсации и изменение (в зависимости от количества газообразных продуктов и свойств агломерата) размеров пузырей, и включает совокупность согласующих коэффициентов. В соответствии с данной моделью, характеристики рассматриваемого процесса зависят от давления, температуры, геометрических размеров агломерата и содержания в нем металла и оксида.

Осаждение частиц оксида несущей газовой фазы на агломератах. При обтекании агломератов газовым потоком, в котором взвешены частицы оксида, возможно их осаждение, приводящее к росту количества оксида агломерата. Моделированию данного процесса посвящен ряд работ. Однако их авторы, как правило, рассматривали осаждение на инертных частицах. Решение указанной задачи осуществлено следующим образом.

Рассмотрено обтекание вязкой несжимаемой жидкостью агломерата, с поверхности которого вдуваются химически реагирующие газообразные продукты, и определено поле скоростей области газовой фазы, возмущенной агломератом. Затем рассчитывались траектории движения частиц оксида в этой области. Частицы, траектории которых пересекают поверхность агломерата, считаются «захваченными» им. Интенсивность процесса осаждения существенно зависит от дисперсности оксида и агломератов, скоростной неравновесности фаз и плотности газа. При использовании результатов параметрического анализа модели с помощью метода самоорганизации [10] создана формальная макро модель.

Строение агломерата определялось из предположения, что в каждый момент времени система, состоящая из капель Al и Al_2O_3 и газовых включений (при их наличии), находится в равновесии. Минимизация поверхностной энергии этой системы при использовании ограничений по количеству веществ обеспечивает определение всех геометрических размеров агломерата. Модель представляет собой совокупность алгебраических уравнений и отличается высоким «быстродействием».

Движение конденсированных продуктов. Частицы оксида несущей газовой фазы находятся в ней в температурном и скоростном равновесии. Для определения параметров движения агломератов использовался следующий подход.

Определяется поле скоростей газовой фазы без учета влияния на ее движение конденсированных продуктов. Затем интегрируются уравнения движения агломератов с учетом изменения во времени их объема и плотности. Рассматривается возможность изменения положения агломерата относительно центра масс. Последнее находится из условия обеспечения устойчивого равновесия.

Согласование частных моделей. Проверка адекватности моделирования. Очевидно, что рассматриваемые явления оказывают взаимное влияние. Разработан алгоритм, обеспечивающий согласование различных частных моделей, использование которого при наличии соответствующего информационного обеспечения позволяет определять характеристики двухфазного потока. Для практического использования модели необходимо найти согласующие коэффициенты и подтвердить ее адекватность экспериментально наблюдаемым явлениям. Эта задача решалась посредством применения оптимизационной процедуры. В качестве целевой функции использовался параметр Δ^2 , определяющий относительное рассогласование экспериментальных и расчетных данных, характеризующих процесс эволюции Z_m , Z_{11}^{OK} , η , δ_{43} и полученных на различных стадиях эволюции для всех исследованных топлив. Найденное значение $\Delta^2 \leq 10\%$, что свидетельствует о сравнительно высоком качестве моделирования.

Анализ модели позволил установить характер влияния начальных параметров потока и внешних условий на процесс эволюции. Так, рост давления приводит к некоторому увеличению скорости газофазного горения Al вследствие интенсификации массопереноса при обтекании агломерата газовым потоком и к падению интенсивности взаимодействия $Al^k + Al_2O^k$ в связи с уменьшением скорости газообразования. Вследствие роста температуры агломерата повышение температуры и окислительного потенциала газовой фазы способствует интенсификации взаимодействия $Al^k + Al_2O^k$. Увеличение количества окиси в агломератах приводит к обратному эффекту, что обусловлено характером влияния «нашлепки» окиси на транспортировку продуктов взаимодействия. Аналогично и влияние роста размера агломератов, которое также снижает относительное количество частиц оксида, осаждающихся на них.

Таким образом, в ходе выполнения работы получены новые научные результаты и разработана методика, обеспечивающая прогнозирование характеристик двухфазного потока, образующегося при горении ТТ с Al, позволяющая решать задачи практического характера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах.— М.: Наука, 1972.
2. Бабук В. А., Белов В. П., Шелухин Г. Г. Особенности горения частиц алюминия в составе смесевых конденсированных систем при низких и высоких давлениях // ФГВ.— 1981.— 17, № 3.— С. 26.
3. Бабук В. А., Белов В. П., Ходосов В. В. и др. Исследование агломерации частиц алюминия при горении в составе смесевых конденсированных систем // Там же.— 1985.— 21, № 3.— С. 20.
4. Бабук В. А., Белов В. П., Шелухин Г. Г. Физика горения и методы ее исследования.— Чебоксары, 1983.— С. 61.
5. Варшавский Г. А. Горение капель углеводородного топлива (диффузионная теория).— М.: Бюро новой техники НКАП, 1945.
6. Бржустовский Т., Гласмен И. Гетерогенное горение/Под ред. В. А. Ильинского и И. Н. Садовского.— М.: Мир, 1967.
7. Кюл Д. К. Воспламенение и горение алюминия и бериллия // РТК.— 1968.— № 12.— С. 83.
8. Гремячкин А. М., Истратов А. Г., Лейпунский О. И. Об образовании конденсированных частиц окиси при горении мелких капель металла // ПМТФ.— 1974.— № 4.— С. 70.

9. Brewer L., Seary A. W. The gaseous species of the Al—Al₂O₃ system // J. Am. Chem. Soc.—1957.—73.—P. 5308.
 10. Справочник по типовым программам моделирования/Под ред. А. Г. Ивахненко.— Киев: Техника, 1980.

г. Санкт-Петербург

УДК 544.124

В. А. Соболев, Е. А. Щепаккина

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ ЗАПЫЛЕННЫХ СРЕД

Рассматривается задача о тепловом взрыве газовой смеси, содержащей инертные пылевые частицы. Для определения критических условий теплового взрыва используется метод интегральных многообразий. Получена асимптотическая формула для вычисления критических условий теплового взрыва для автокаталитической реакции горения.

При исследовании структуры предела самовоспламенения газовой смеси, содержащей равномерно распределенные инертные частицы, учитывая только межфазный теплообмен, будем рассматривать случай однородного распределения температуры. Сохраняя предположения работы [1], запишем двухтемпературную модель в безразмерном виде

$$\begin{aligned} \gamma \frac{d\Theta}{dt} &= \eta(1 - \eta) \exp\left(\frac{\Theta}{1 + \beta\Theta}\right) - \alpha(\Theta - \Theta_c), \\ \gamma_c \frac{d\Theta_c}{dt} &= \alpha(\Theta - \Theta_c), \\ \frac{d\eta}{dt} &= \eta(1 - \eta) \exp\left(\frac{\Theta}{1 + \beta\Theta}\right), \\ \Theta(0) &= \Theta_c(0) = \eta(0) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь Θ — безразмерная температура реакционной фазы; Θ_c — безразмерная температура инертных пылевых частиц; η — глубина преобразования.

В отличие от [1] рассматривается случай, когда в реакционной фазе идет простейшая автокаталитическая реакция. Как и в [1], считаем параметры γ и β малыми и понизим порядок системы (1), используя закон сохранения энергии:

$$\eta = \gamma\Theta + \gamma_c\Theta_c.$$

Для переменных Θ и η получим систему уравнений второго порядка

$$\begin{aligned} \gamma \frac{d\Theta}{dt} &= \eta(1 - \eta) \exp\left(\frac{\Theta}{1 + \beta\Theta}\right) - \alpha\left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_c}\right)\Theta + \frac{\alpha}{\gamma_c}\eta, \\ \frac{d\eta}{dt} &= \eta(1 - \eta) \exp\left(\frac{\Theta}{1 + \beta\Theta}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

Цель работы — определение критического значения коэффициента теплоотдачи α .

Рассмотрим нулевое приближение. Система дифференциальных уравнений (2) сингулярно возмущенная, поскольку содержит малый параметр γ при одной из производных [2, 3].

Полагая $\gamma = 0$, получим порождающую задачу

$$\begin{aligned} \eta(1 - \eta) \exp\left(\frac{\Theta}{1 + \beta\Theta}\right) - \alpha\Theta + \frac{\alpha}{\gamma_c}\eta &= 0, \\ \frac{d\eta}{dt} &= \eta(1 - \eta) \exp\left(\frac{\Theta}{1 + \beta\Theta}\right). \end{aligned} \quad (3)$$