

УДК 546

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РАБОЧЕЙ ЯЧЕЙКЕ АТОМНОГО РЕАКТОРА С ПОМОЩЬЮ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СВС-СИСТЕМ

В. А. Горшков, В. Н. Санин, В. И. Юхвид

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 142432 Черногловка
gorsh@ism.ac.ru

Показано, что при горении высокоэнергетических термитных СВС-систем можно создать критические условия (температура и давление) в рабочей ячейке (фрагмент металлической трубы) модельного стенда атомного реактора. Температуру разогрева циркониевой или стальной трубы можно регулировать путем изменения состава термитной смеси, зазора между термитной шашкой и стенкой трубы, а также конструкции термитной шашки. Из проведенных исследований следует, что термитная смесь на основе WO_3-2Al позволяет моделировать аварийную ситуацию (без использования радиоактивного топлива) в рабочей ячейке реактора.

Ключевые слова: рабочая ячейка реактора, горение, плавление, фазоразделение, термитные смеси.

ВВЕДЕНИЕ

Аварийная ситуация в рабочих ячейках реактора возникает при превышении скорости выделения тепла в ядерной реакции над скоростью теплоотвода из ячеек. Теплоотвод осуществляется за счет протока пароводяной смеси через рабочие ячейки (циркониевые трубы, в которых размещены таблетки ядерного топлива). В стандартном рабочем режиме температура в трубе составляет $300\text{ }^\circ\text{C}$, давление — 8 МПа . В аварийной ситуации при давлении $p \geq 8\text{ МПа}$ температура стенки циркониевой трубы растет до $600 \div 700\text{ }^\circ\text{C}$, в результате чего ее прочность уменьшается ниже критического значения и происходит разрыв стенки трубы. Разрыв сопровождается разрушением окружающих конструкций, разлетом ядерного топлива и графитовой кладки, формированием ударной волны.

В настоящем исследовании в простейшем варианте моделируется аварийный разогрев до критической температуры $600 \div 700\text{ }^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении в единичной реакционной ячейке (циркониевая труба в графитовой футеровке) с помощью горения высокоэкзотермической смеси термитного типа. Основное внимание уделено разработке термитного нагревателя (в виде шашки), способного разогреть стенку металлической трубы (Zr, Fe) до заданной

критической температуры. При этом геометрические размеры шашки должны оставаться без изменения.

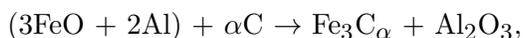
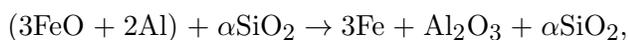
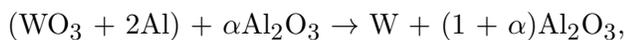
В предыдущих исследованиях было показано, что среди различных классов смесей, способных к горению, наиболее высокая температура горения реализуется в системах термитного типа и может превышать температуру плавления конечных продуктов [1, 2]. Горение многих плавящихся высококалорийных смесей оксидов металлов с алюминием и углеродом сопровождается сильным разбросом расплава и протекает во взрывоподобном режиме. Создание избыточного давления газа (аргона, азота, воздуха), понижение калорийности смеси за счет разбавления «холодными» (инертными) добавками или введения в смесь избытка одного из реагентов подавляют разброс расплава и переводят горение в управляемый стационарный режим. В условиях, когда разброс подавлен, скорость горения шихты можно изменять в несколько раз, варьируя давление, начальную температуру, состав смеси и размер частиц ее реагентов. В общем случае при горении термитной смеси образуются три фазы: слиток (включающий металлические и оксидные продукты химического превращения), «диспергат» (частицы, диспергированные при горении) и газообразные продукты. Каждая из фаз содержит весь набор исходных элементов, но их массовые доли различны [3–7].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Компоненты термитной смеси.

Расчет адиабатической температуры горения

Компоненты термитных составов выбирали исходя из их термической стабильности, возможности реализовать высокие температуру и скорость горения. Схема химического превращения выбранных составов имеет вид:



где α — массовая доля разбавителя в исходной шихте.

Термодинамический расчет проведен по программе «Thermo» [8]. Из рис. 1 видно, что в отсутствие разбавителя в исходной шихте ($\alpha = 0$) температура горения смесей $\text{WO}_3 + 2\text{Al}$ и $3\text{FeO} + 2\text{Al}$ достигает максимального значения, 3800 и 3000 К соответственно. При введении избыточного (относительно стехиометрии) Al и разбавлении смесей инертными добавками температура снижается и становится меньше температуры плавления оксида алюминия. По-видимому, эту температуру можно считать пограничной, разделяющей область «текучего» и «нетекучего» состояния продуктов горения. В дальнейшем в экспериментах было показано, что в области «нетекучего» состояния форма и размер исходной заготовки сохраняются.

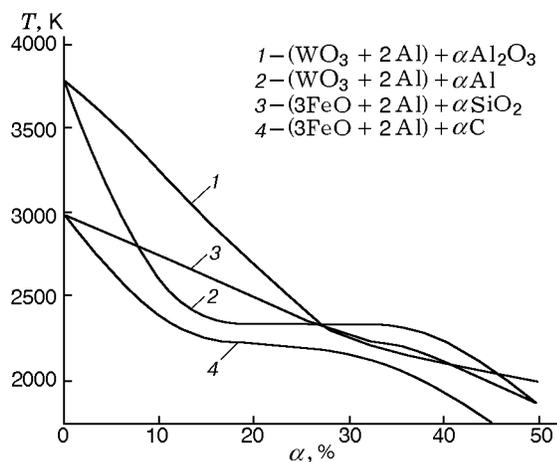


Рис. 1. Влияние состава исходной смеси на расчетную температуру горения

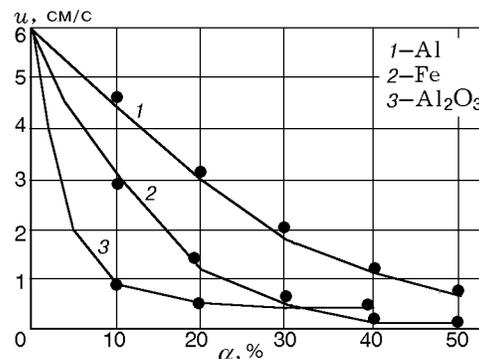


Рис. 2. Влияние «холодных» добавок на скорость горения (исходная смесь $(\text{WO}_3 + 2\text{Al}) + \alpha$)

Горение термитных смесей.

Определение оптимальных составов

Экспериментальные исследования показали, что при увеличении доли «холодных» добавок скорость горения исследуемых составов снижается, достигая предела горения (рис. 2). При этом уменьшаются потери массы вещества (η_m) (рис. 3, а) и линейная деформация образца при горении (ε_l) (рис. 3, б). Эти характеристики рассчитывали по формулам

$$\eta_m = \frac{M_0 - M_f}{M_0} \cdot 100 \%, \quad \varepsilon_l = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100 \%,$$

где M_0 и M_f — начальная и конечная масса термитной шашки, L_0 и L_f — начальная и конечная высота термитной шашки. Агрегатное состояние продуктов горения также зависит от содержания «холодных» добавок. При малых значениях α продукты горения плавятся и растекаются. При больших α исходная геометрия образца меняется, и в области оптимальных значений α конечный образец имеет те же геометрические характеристики, что и исходная термитная таблетка. При этом для каждой смеси найдены интервалы оптимальных значений α , при которых сохраняются геометрические размеры шашки.

Динамика теплообмена продуктов горения термитной смеси (нагревателя) с металлической оболочкой в модельной ячейке

Модельная ячейка является фрагментом рабочей ячейки реактора и представляет собой цилиндрическую металлическую оболочку (трубу из циркония) внутреннего диаметра 80 мм, высотой 300 мм с толщиной стенки

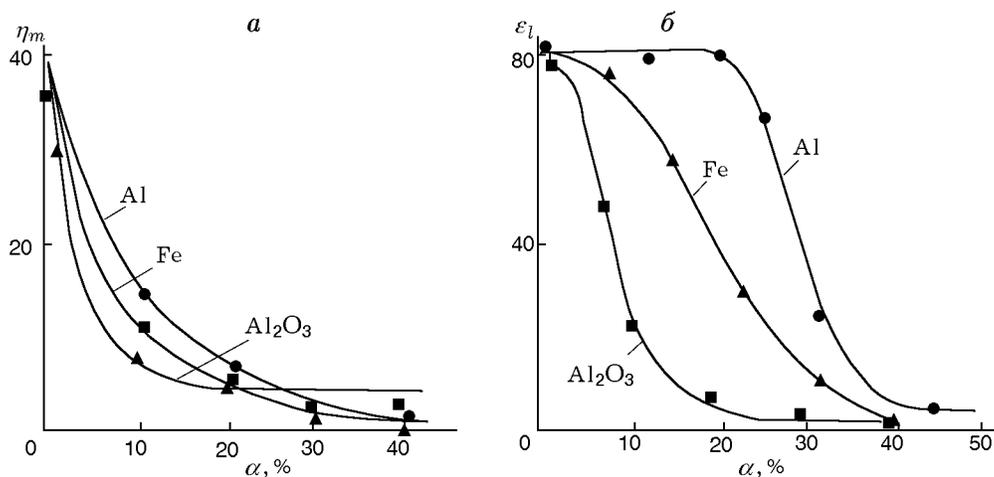


Рис. 3. Влияние «холодных» добавок на потери вещества и линейную усадку продуктов горения (исходная смесь $(\text{WO}_3 + 2\text{Al}) + \alpha\text{Al}(\text{Fe}, \text{Al}_2\text{O}_3)$)

4 мм, заполненную термитной смесью. В условиях моделирования рабочей ячейки (минимальные потери тепла) возможен максимальный разогрев стенки по сравнению с реальным стендом (сильный теплоотвод). Поэтому измеренные температуры в стенке трубы служат верхней оценкой для ожидаемых температур в опытно-промышленном стенде.

Температуру измеряли двумя термопарами, установленными в центре термитной шашки и в средней части трубы (рис. 4). Образец поджигали сверху молибденовой спиралью, подавая на нее электрическое напряже-

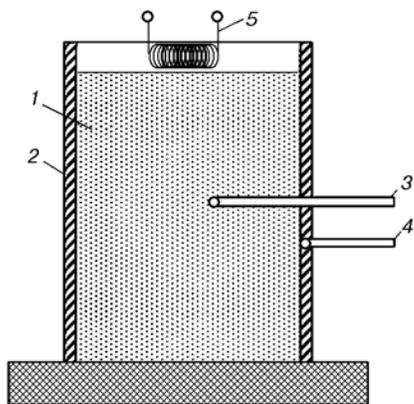


Рис. 4. Экспериментальная схема идеальной ячейки:

1 — экзотермическая смесь, 2 — фрагмент трубы, 3 — термопара для измерения температуры в шихте, 4 — термопара для измерения температуры в стенке трубы, 5 — спираль

ние $\approx 28 \div 30$ В. В экспериментах исследовали перераспределение тепла в системе продукты горения — стенка трубы, в процессе которого термитная шашка после сгорания остывала, а труба нагревалась. При этом основное внимание уделяли влиянию состава термитной шихты и зазора между термитной шашкой и стенкой трубы на максимальный разогрев стенки. Фиксировали интервал времени между началом нагрева и выходом температуры на максимальное значение.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

После воспламенения смеси включалась система измерения температуры. Динамика температуры регистрировалась на компьютере согласно заданной программе. Затем с помощью специальной программы строился график в координатах температура — время.

На рис. 5 представлено изменение температуры в трубе в условиях моделирования рабочей ячейки (минимальные потери тепла) для состава $\text{WO}_3 + 2\text{Al}$, зазор между шашкой и стальной трубой составлял 10 мм. Видно, что некоторое время термопара регистрирует комнатную температуру. Затем наблюдаются резкий подъем до максимального значения ≈ 650 °С и медленное падение.

В экспериментах, в которых зазор между шашкой и трубой отсутствовал, максимальная температура в стенке трубы повышалась до 700 °С. Время выхода на максимальное значение практически не менялось. Темп паде-

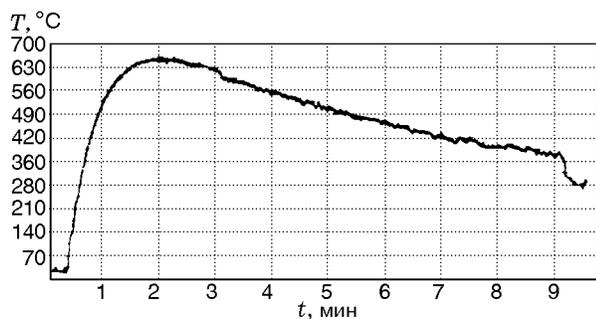


Рис. 5. Изменение температуры в стенке стальной трубы в условиях моделирования рабочей ячейки (исходная смесь $WO_3 + 2Al$)

ния температуры после ее выхода на максимум близок к полученному при наличии зазора между шашкой и трубой.

В экспериментах с шихтой $3FeO + 2Al$ зазор между термитной шашкой и стенкой трубы составлял 10 мм. При этом зависимости оказались аналогичными зарегистрированным в экспериментах с шихтой WO_3/Al . Максимальная температура в шихте достигала $1840\text{ }^\circ\text{C}$, в стенке трубы — $585\text{ }^\circ\text{C}$. Время выхода температуры стенки трубы на максимальное значение примерно равнялось 120 с.

Разработка экспериментального стенда

Для определения динамики разогрева стенок трубы термитной шашкой в условиях, близких к реальным, учета влияния холодных концов трубы и массивной графитовой футеровки на разогрев в рабочей зоне в ИСМАН был спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд. Основными его элементами являются рабочая ячейка, компьютерный комплекс для регистрации температуры в рабочей ячейке, система инициирования горения, система вытяжки отходящих газов и эстакада для загрузки термитной шашки в ячейку. Рабочая ячейка включает в себя циркониевую трубу (или трубу из нержавеющей стали) длиной 1500 мм, внутреннего диаметра 80 мм с толщиной стенки 4 мм; графитовую кладку, выполненную из блоков $250 \times 250 \times 500$ мм, внутреннего диаметра 100 мм; графитовые кольца с прорезью двух размеров: внутреннего диаметра 80 мм и толщиной 5 мм, внутреннего диаметра 90 мм и толщиной 5 мм, кольца чередуются; затвор, на котором крепятся экспериментальная оснастка и термитный нагреватель.



Рис. 6. Схема размещения термопар (1–5) по длине трубы и определения динамики температуры

Экспериментальная ячейка оборудована системами воспламенения, измерения температуры и отвода газов, выделяющихся при горении. Термитную шашку поджигали вольфрамовой спиралью (кратковременной подачей электрического импульса на вольфрамовую спираль), ее воспламенение фиксировали визуально и амперметром по размыканию цепи после перегорания спирали.

Сформированный после воспламенения плоский фронт горения распространялся по термитной шашке с постоянной скоростью. Продукты горения имели высокую температуру, поэтому после сгорания между ними и «холодными» частями рабочей ячейки (циркониевой трубой и графитовой футеровкой) протекал интенсивный теплообмен.

Температуру измеряли гребенкой из пяти термопар, расположенных по высоте трубы на расстоянии 250 мм (рис. 6). Сигнал термопары через крейт-модуль с усилителем сигналов на АЦП передавался на компьютер с последующей цифровой записью. С помощью специальной программы задавалась частота опроса термопар в интервале $0.01 \div 0.1$ мкс и велась непрерывная запись сигналов каждой термопары. Особое внимание в комплексе измерений уделено электрическим наводкам, которые устранялись с помощью заземления и экранирования термопар термостойкими и диэлектрическими покрытиями.

Изготовление термитной шашки

В качестве исходных компонентов для изготовления термитных нагревателей использовали порошки FeO , WO_3 , Al , SiO_2 и C . Ис-

ходные смеси после дозировки перемешивали в смесителях барабанного типа в течение 1 ч. Из приготовленной шихты изготавливали термитные пашки по двум методикам.

По первой методике шихту засыпали на вибрационном столе в бумажные футляры диаметром 60 мм, высотой 500 мм. Масса исходной смеси 3 кг.

По второй методике исходную шихту перемешивали с растворителем и клеевым компонентом. В качестве растворителя использовали бензин или спирт, в качестве клеевого компонента — резиновый клей или поливинилбутираль клеевой. Смесь доводили до вязкопластического состояния, после чего прессовали фрагменты пашки с помощью изготовленной для этих целей пресс-оснастки. Приготовленные таблетки сушили в электрической печи при температуре $70 \div 80$ °С до полного испарения растворителя ($2 \div 3$ ч). В заключение таблетки собирали из фрагментов на штыре затвора. Общая высота собранной пашки составляла 500 мм, а масса — 3 кг.

Изменение температуры в циркониевой трубе в условиях экспериментального стенда

В экспериментах на стенде высота пашки (500 мм) намного меньше высоты рабочих элементов (1500 мм), поэтому запас тепла в продуктах горения термитной пашки расходуется не только на разогрев зоны разрыва в трубе, но и на сток тепла в холодные концы трубы и в графитовую футеровку. В экспериментах использовали смесь на основе $3\text{WO}_3 + 2\text{Al}$. Зазор между термитной пашкой и стенкой трубы составлял 10 мм. Изменение температуры в стенке трубы в условиях экспериментального стенда представлено на рис. 7. Из рис. 6 и 7 (показания термопар 2, 3 и 4) следует, что зона интенсивного разогрева трубы соизмерима с высотой термитной пашки, т. е. наиболее сильно разогревается стенка трубы, находящаяся напротив (вблизи) термитной пашки. Температура той части трубы, которая удалена от термитной пашки, практически не меняется (показания термопар 1 и 5). Видно, что распределение температуры несимметрично по высоте трубы. Наиболее разогретой является средняя часть трубы. Максимальная температура в ней несколько ниже, чем в идеальной ячейке и составляет 650 °С.

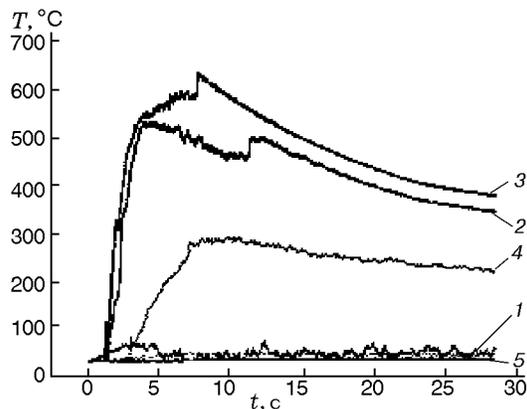


Рис. 7. Изменение температуры в стенке циркониевой трубы в условиях экспериментального стенда (исходная смесь $\text{WO}_3 + 2\text{Al}$, 1–5 — показания соответствующих термопар)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из проведенных экспериментов видно, что полное время выхода температуры на максимум складывается из двух временных интервалов: $t = t_1 + t_2$, где t_1 — время горения слоя термитной шихты над термопарой, t_2 — время выхода температуры в стенке трубы на максимальное значение. В эксперименте $t_1 = 20 \div 25$ с, а $t_2 = 90 \div 95$ с.

Очевидно, что время t_2 определяется наиболее медленным из двух процессов: либо охлаждением термитной пашки, либо разогревом стенки трубы. В первом случае $t_2 = \Delta^2/a'$, где Δ — толщина стенки, a' — коэффициент теплопроводности трубы. Во втором случае $t_2 = r^2/a''$, где r — радиус термитной пашки, a'' — коэффициент ее теплопроводности.

В первом случае (охлаждение пашки) для циркониевой трубы с толщиной стенки $\Delta = 0.5$ см при коэффициенте теплопроводности продуктов горения $a = 0.1$ см²/с имеем $t_2 = 2.5$ с. Во втором случае (разогрев стенки) при диаметре термитной пашки 60 мм и $a = 0.1 \div 0.01$ см²/с оценка дает $t_2 = 90 \div 900$ с. Из сопоставления с экспериментом следует, что скорость разогрева стенки трубы определяется скоростью остывания (тепловой инерционностью) термитной пашки.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали возможность использования термитных смесей

в качестве нагревателя для разогрева металлической трубы в рабочей ячейке стенда до критической температуры, необходимой для ее разрушения под давлением газа.

2. Температуру разогрева трубы можно регулировать, меняя состав термитной смеси, величину зазора между термитной пашкой и стенкой трубы, а также конструкцию термитной пашки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г., Юхвид В. И., Боровинская И. П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез литых тугоплавких неорганических соединений // Докл. АН СССР. — 1980. — Т. 255, № 1. — С. 120–123.
2. Тараканов А. Ю., Ширяев А. А., Юхвид В. И. Фазовые превращения в высококалорийных гетерогенных системах окисел — восстановитель — неметалл // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 3. — С. 68–74.
3. Мержанов А. Г., Боровинская И. П., Юхвид В. И., Ратников В. И. Новые методы получения высокотемпературных материалов, основанные на горении // Научные основы материаловедения. — М.: Наука, 1981. — С. 193–206.
4. Юхвид В. И., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. Влияние давления на закономерности горения плавящихся гетерогенных систем // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 3. — С. 30–32.
5. Yukhvid V. I., Vishnyakova G. A., Silyakov S. L., Sanin V. N., Kachin A. R. Structural macrokinetics of aluminothermic SHS processes // Intern. J. of SHS. — 1996. — V. 1, N 1. — P. 93–105.
6. Горшков В. А. Литые композиционные материалы, полученные методом автоволнового синтеза // Сб. тр. Девятой Междунар. научно-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — Т. 3. — С. 251–254.
7. Левашов Е. А., Рогачев А. С., Курбаткина В. В., Максимов Ю. М., Юхвид В. И. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. — М.: Изд. дом МИСиС, 2011. — С. 378.
8. Shiryayev A. Thermodynamics of SHS processes: An advanced approach // Intern. J. of SHS. — 1995. — V. 4, N 4. — P. 351–362.

Поступила в редакцию 1/VII 2013 г.