

ГЕТЕРОГЕННОЕ ГОРЕНИЕ В СИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ III ГРУППЫ. ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Ю. Г. Морозов, М. В. Кузнецов, О. В. Белоусова

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 142432 Черноголовка, morozov@ism.ac.ru

Потенциометрическим методом изучено поведение фронтально горящих гетерогенных систем, содержащих бор, алюминий, галлий, индий, иттрий, лантан и иттербий. Эти системы применяются для самораспространяющегося высокотемпературного синтеза ряда оксидных материалов. Обнаружено, что максимальные значения электродвижущей силы горения, возникающей между фронтом волны горения и продуктами синтеза в системах с участием трехзарядных ионов этих химических элементов, прямо пропорциональны ионному потенциалу химического элемента и составляют $150 \div 400$ мВ. Использование двух разнополярно реагирующих систем в качестве элементов электродвижущей силы горения в одной батарейной сборке позволяет повысить регистрируемую разность потенциалов до 2.3 В.

Ключевые слова: гетерогенное горение, СВС, ЭДС горения, химические элементы III группы, батарейная сборка.

ВВЕДЕНИЕ

Экзотермические процессы гетерогенного горения конденсированных сред широко используются для самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) различных неорганических материалов [1]. В 1996 г. было установлено, что эти процессы сопровождаются генерацией электрических потенциалов, возникающих между фронтом волны и конденсированными продуктами такого горения в результате химической ионизации исходных и промежуточных реагентов (явление электродвижущей силы (ЭДС) горения [2]). Существование подобного явления, помимо чисто диагностических целей, открывает определенные возможности для поиска путей утилизации сопутствующей электроэнергии, которая может вырабатываться в технологических процессах синтеза в режиме горения. Анализ возможных механизмов генерации электрических потенциалов в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза систем, содержащих разные химические элементы и соединения, позволит глубже понять физико-химическую природу этого явления [3, 4] и других интересных явлений, характерных для процессов горения с образованием конденсированных продуктов реакции, включая эмиссион-

ные [5, 6].

Ранее было выполнено несколько циклов исследования источников генерации ЭДС в ряде горящих гетерогенных систем, содержащих химические элементы основных подгрупп I, II и VI групп Периодической таблицы Менделеева [7–9]. В данной работе изучены источники генерации в условиях СВС некоторых сложных оксидов с участием химических элементов основной и побочной подгрупп III группы Периодической таблицы. Кроме того, предложена и реализована батарейная схема включения одиночных источников ЭДС горения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Для экспериментов в основном использовалась стандартная потенциометрическая измерительная ячейка, состоящая из двух вольфрамовых зондов (опорного и регистрирующего) диаметром 0.7 мм, закрепленных на расстоянии 20 ± 0.5 мм, которые стационарно погружались в исследуемую систему, помещенную в кварцевую кювету размерами $50 \times 25 \times 15$ мм [10]. Локальное инициирование смесей порошков реагентов (исключительно насыпной плотности [11]) осуществлялось с помощью изобутан-пропан-бутановой мини-горелки вблизи опорного зонда. Это позволяло избежать внешнего электрического влияния на наблюдаемые сигналы. Фронт волны горения обычно распространялся в сторону регистрирующего

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-08-01127-а).

Таблица 1

Максимальные температуры и скорости горения, а также состав продуктов горения исследованных систем (в порядке убывания доли)

Система	T_c , К	u , мм/с	Продукты
$BaO_2 + 2B + 1.5BaO$	990 ± 10	3.7 ± 0.2	BaB_6 , BaB_2O_4 , $Ba_2B_2O_5$, $Ba_3(BO_3)_2$, BaO
$BaO_2 + 0.5Al + 0.75Al_2O_3$	1580 ± 15	6.0 ± 0.3	$BaAl_2O_4$
$Na_2O_2 + Fe + 0.75Ga_2O_3$	1140 ± 12	7.0 ± 0.3	$NaGaO_2$, $NaFeO_2$
$Na_2O_2 + Fe + 0.5In_2O_3$	1360 ± 13	10 ± 0.5	In_2O_3 , $NaInO_2$, Fe , NaO_2 , Fe_2O_3
$Na_2O_2 + Fe + Y_2O_3$	1100 ± 11	4.0 ± 0.2	Y_2O_3 , $NaFeYO_{7+x}$, $NaFeO_2$, Fe
$Na_2O_2 + Fe + 0.25La_2O_3$	1230 ± 12	5.5 ± 0.3	$LaFeO_3$, Fe , NaO_2
$Na_2O_2 + Fe + 0.25Yb_2O_3$	1160 ± 12	25 ± 1.2	$NaYbO_2$, Yb_2O_3 , Fe_2O_3

зонда, подключенного к положительной клемме двухкоординатного потенциометра SE780 с входным сопротивлением 100 МОм, напрямую регистрирующего зависимость ЭДС горения (E_c) от времени. Для определения максимальной температуры и скорости горения изучаемых составов применялась стандартная термометрическая методика. Рентгенофазовый анализ продуктов горения был выполнен с помощью дифрактометра ДРОН-3М.

В отличие от предыдущих исследований, проводившихся с химическими элементами I и II групп Периодической таблицы, где исследуемый химический элемент входил только в состав пероксидных соединений, здесь для изучения процесса горения были использованы другие подходы. Исследуемый химический элемент входил в состав горючего: порошок бора аморфного черного (чистота 98 %) или порошок алюминия АСД-4. Использовались также смеси, содержащие в качестве горючего некоторое количество порошка железа Р-10, необходимого для протекания самораспространяющейся реакции горения. В качестве разбавителя, который мог входить в состав конечного продукта, были применены порошки трехвалентных оксидов: алюминия ч, галлия ч, индия хч, иттрия 99.99, лантана осч и иттербия Ит002, а также оксида бария ч. В качестве твердого окислителя использовались порошки пероксида бария чда или пероксида натрия ч.

Смеси для горения в количестве 5 ÷ 15 г готовили в течение 15 мин с помощью планетарной мельницы Laborette-5 фирмы FRITZSCH (ФРГ) с применением размольной гарнитуры из корунда (масса шаров примерно равнялась массе шихты).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучались процессы горения в стационарном режиме самораспространения на воздухе в следующих системах: $BaO_2 + xB + yBaO$, $BaO_2 + xAl + yAl_2O_3$, $Na_2O_2 + xFe + yGa_2O_3$, $Na_2O_2 + xFe + yIn_2O_3$, $Na_2O_2 + xFe + yY_2O_3$, $Na_2O_2 + xFe + yLa_2O_3$, $Na_2O_2 + xFe + yYb_2O_3$. Значения коэффициентов x , y находились в пределах горения изучаемых составов: $0.2 < x, y < 2.0$.

Для исследованных систем максимальные температуры горения (T_c), преимущественно жидкофазного, были от 900 ± 10 до 1600 ± 16 К, а скорости распространения фронта волны горения (u) — $(2 \pm 0.1) \div (30 \pm 1.5)$ мм/с (см. данные в табл. 1).

В исследуемых системах при прохождении фронта волны горения через регистрирующий зонд наблюдались характерные изменения амплитуды ЭДС горения от времени t [10]. Ниже описаны полученные экспериментальные результаты для горящих систем, в которых эти изменения были наиболее четко выражены.

На рис. 1 представлены начальные участки зависимостей $E_c(t)$ горящих систем, содержащих некоторые химические элементы основной подгруппы III группы Периодической таблицы — бор и алюминий. Хорошо видны характерные особенности этих кривых, которые согласно концепции существования термодиффузионного потенциала [12] можно приписать электрическим откликам от потоков ионов B^{3+} и Al^{3+} и Ba^{2+} , участвующих в процессе гетерогенного горения. Идентификация сигналов, связанных с катионами исследуемых химических элементов, в этом случае проводилась с помощью определенных ранее максимальных зна-

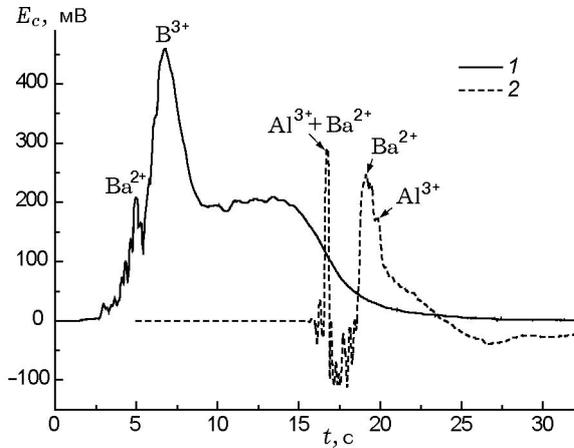


Рис. 1. Начальные участки зависимости ЭДС горения от времени при гетерогенном горении систем $\text{BaO}_2 + 2\text{B} + 1.5\text{BaO}$ (1), $\text{BaO}_2 + 0.5\text{Al} + 0.75\text{Al}_2\text{O}_3$ (2)

чений ЭДС горения E_c^{peak} , отвечающих термодиффузионным потокам катионов $\text{Ba}^{2+} - 117 \pm 0.5$ мВ [12]. В ходе идентификации, отраженной символами ионов химических элементов на рис. 1, принимался также во внимание тот факт, что максимальная ЭДС горения E_c^{peak} (мВ) в процессах с участием любых ионов химических элементов, согласно [12, 13, 9], прямо пропорциональна значению их ионного потенциала $\varphi = Z/r$:

$$E_c^{peak} = 1.44k\varphi, \quad (1)$$

где Z — заряд иона химического элемента (в единицах заряда электрона), r — его эффективный радиус (пм), k — безразмерный эмпирический коэффициент [13], однозначно зависящий от номера ряда и периода, в которых находится химический элемент в Периодической таблице [14]. С помощью выражения (1), пользуясь известными значениями эффективных радиусов ионов (в 6-координатном окружении) [15–17], можно определить значения E_c^{peak} для всех известных катионов химических элементов данной подгруппы (см. табл. 2). При этом наблюдается полное согласие результатов с полученными ранее данными по максимальной ЭДС горения для других составов горящих систем, содержащих катионы бора [13] и алюминия [12].

На рис. 2 приведены те же зависимости для горящих систем, содержащих более тяжелые химические элементы основной подгруппы

Таблица 2

Ионные потоки, идентифицированные в СВС-процессах с участием химических элементов III группы

Ион	E_c^{peak} , мВ	r , пм	φ , В	k
B^{3+}	376 ± 2	23 [10]	187.8	2
Al^{3+}	173 ± 1	50 [11]	86.4	2
Ga^{3+}	209 ± 1	62 [10]	69.7	3
In^{3+}	213 ± 1	81 [11]	53.3	4
Tl^{3+}	227 ± 2 (выч.)	95 [11]	54.5	5
Sc^{3+}	267 ± 3 (выч.)	81 [11]	53.3	3.3
Y^{3+}	209 ± 1	93 [11]	46.5	4.48
La^{3+}	224 ± 1	104 [12]	41.5	5.44
Yb^{3+}	289 ± 1.5	81 [12]	53.3	5.44

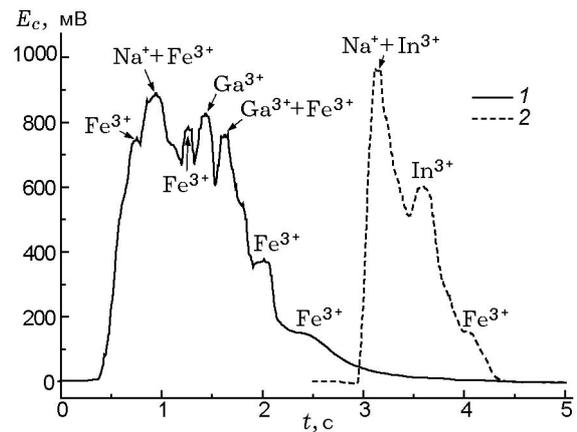


Рис. 2. Начальные участки зависимости ЭДС горения от времени при гетерогенном горении систем $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{Fe} + 0.75\text{Ga}_2\text{O}_3$ (1), $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{Fe} + 0.5\text{In}_2\text{O}_3$ (2)

III группы — галлий и индий. Наблюдаемые электрические отклики также можно приписать различным комбинациям таких откликов от потоков ионов Ga^{3+} и In^{3+} , участвующих в процессе гетерогенного горения. Идентификация сигналов, связанных с катионами этих химических элементов, в этом случае проводилась с помощью определенных ранее максимальных значений E_c^{peak} , отвечающих термодиффузионным потокам катионов $\text{Na}^+ - 755 \pm 3$ мВ [7] и $\text{Fe}^{3+} - 135 \pm 0.5$ мВ [18] (см. данные в табл. 2, где также приведены расчетные значения для катионов трехвалентного таллия).

На рис. 3 показаны начальные участки

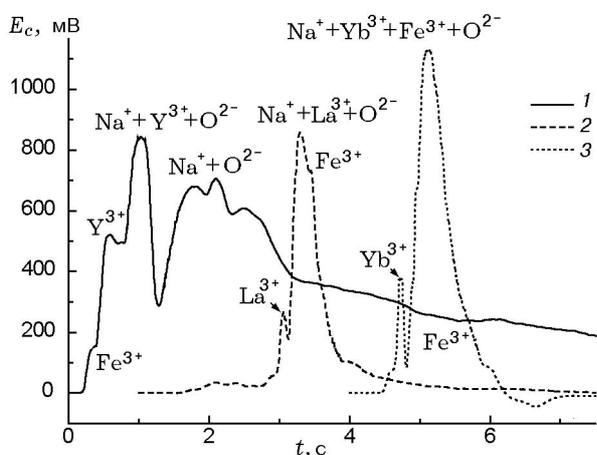


Рис. 3. Начальные участки зависимости ЭДС горения от времени при гетерогенном горении систем $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{Fe} + \text{Y}_2\text{O}_3$ (1), $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{Fe} + 0.25\text{La}_2\text{O}_3$ (2), $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{Fe} + 0.25\text{Yb}_2\text{O}_3$ (3)

зависимости $E_c(t)$ горящих систем, содержащих основные оксиды некоторых химических элементов побочной подгруппы III группы — иттрия, лантана и иттербия. Хорошо видные особенности на этих кривых можно приписать электрическим откликам от потоков катионов Y^{3+} , La^{3+} и Yb^{3+} , наблюдающимся в течение нескольких секунд. Как и для систем с химическими элементами основной подгруппы, по совокупности полученных результатов были определены максимальные ЭДС горения, созданные катионами побочной подгруппы (см. данные для катионов этих химических элементов в табл. 2, включая вычисленные значения для катионов скандия Sc^{3+}).

Полученные результаты позволяют сделать некоторые предположения о механизме взаимодействия ионных потоков химических элементов, возникающих в рассматриваемых горящих системах. Хорошо известно, что взаимодействие между атомами в расплаве оксида в основном ионно-ковалентное [19]. Поскольку в СВС-процессах расплав едва перегрет относительно температуры ликвидуса, при плавлении в нем в определенной мере сохраняется некоторое упорядочение, соответствующее кристаллической структуре компонентов. Вследствие этого структура расплава представляет собой взаимопроникающие структуры отдельных компонентов. Координационные числа ионов в таком расплаве будут такими же, как и в исходном поликристаллическом веществе. При гетерогенном горении в исследу-

емых системах происходит термохимический распад оксидов и пероксидов на термодиффузионные потоки ионов отдельных химических элементов. Кроме того, во фронте волны горения возникают динамические ионные состояния — виртуальные оксиды, которые являются следствием взаимодействия катионных и анионных потоков всех элементарных компонентов [18].

С учетом данных рентгенофазового анализа для описания поведения исследованных выше систем, например галлийсодержащих, можно использовать реакцию, описывающую синтез галлата натрия NaGaO_2 . Здесь могут быть виртуальные оксиды галлия — поток соответствующих ионных пар, т. е. $\text{Ga}_2\text{O}_3 \leftrightarrow (2\text{Ga}^{3+} + 3\text{O}^{2-})$, потоки других компонентов и их различные комбинации. Как видно из данных рис. 2, для такой системы максимальная положительная ЭДС горения не превышает сумму ЭДС от катионных потоков входящих в нее химических элементов — натрия, галлия и железа: $755 + 209 + 135 = 1099 \pm 5$ мВ.

Можно попытаться описать подобным образом поведение индийсодержащих систем при синтезе индата натрия NaInO_2 . Здесь также присутствует виртуальный оксид индия, т. е. $\text{In}_2\text{O}_3 \leftrightarrow (2\text{In}^{3+} + 3\text{O}^{2-})$. Для исследуемой системы, включающей катионы Na, In и Fe, максимальная положительная ЭДС горения не будет превышать сумму $755 + 213 + 135 = 1103 \pm 5$ мВ (что видно на рис. 2).

Описание поведения иттрийсодержащей системы при синтезе сложного оксида натрия — иттрия — железа NaFeYO_{7+x} включает существование комбинированных потоков виртуального пероксида натрия $\text{Na}_2\text{O}_2 \leftrightarrow (2\text{Na}^{+} + 2\text{O}^{2-})$, оксида иттрия $\text{Y}_2\text{O}_3 \leftrightarrow (2\text{Y}^{3+} + 3\text{O}^{2-})$ и потоков катионов железа. Согласно вышеупомянутому подходу максимальная ЭДС горения этой системы не превышает суммарного значения ЭДС от катионных потоков натрия, иттрия и железа: $755 + 209 + 135 = 1099 \pm 5$ мВ.

В то же время, например, в процессе горения системы $\text{Na}_2\text{O}_2 + x\text{Fe} + y\text{La}_2\text{O}_3$ имеет место химическое взаимодействие только между железом и виртуальным оксидом лантана (III) — $\text{La}_2\text{O}_3 \leftrightarrow (2\text{La}^{3+} + 3\text{O}^{2-})$, натрийсодержащие соединения являются дополнительными внутренними источниками кислорода, а устойчивого продукта горения, включающего

в себя все отдельные химические элементы, не образуется. В зоне догорания и последующего охлаждения комбинированные ионные потоки железа и виртуального оксида лантана формируют кристаллическую решетку феррита лантана, что показывают данные РФА продуктов горения (см. табл. 1). В результате этого возникают устойчивые химические связи ионного характера. Для исследуемой системы в стационарном режиме самораспространения максимально возможная ЭДС горения при таком предположении не должна превышать сумму значений ЭДС от катионных потоков натрия, лантана и железа: $755 + 224 + 135 = 1114 \pm 5$ мВ, что и наблюдается экспериментально.

При горении системы $\text{Na}_2\text{O}_2 + x\text{Fe} + y\text{Yb}_2\text{O}_3$ происходят сходные процессы, существует мощный комбинированный ионный поток, включающий в себя все присутствующие в системе химические элементы и виртуальные оксиды. Однако в результате горения в подобных условиях получаются не ферриты, а такие продукты, как NaYbO_2 . Максимальное значение ЭДС горения для катионного потока Yb^{3+} в исследуемой системе оценивается из данных рис. 3 в 289 ± 1.5 мВ, что находится в полном согласии с результатами вычислений по формуле (1).

Как известно, особую роль в процессах, сопровождаемых ЭДС горения, играет взаимное расположение электрических зондов [20]. В результате модельных исследований было предположено, что использование двухэлементной батарейной схемы с двумя регистрирующими зондами может заметно увеличить уровень прямой генерации ЭДС по сравнению с уровнем генерации одиночного элемента [21, 9]. При этом, однако, необходимо позаботиться о достаточной синхронизации процессов горения в обоих элементах. Для проверки такого предположения была сконструирована батарейная сборка, в которой подобная ситуация была обеспечена особой схемой включения зондов, где оба зонда в близкие моменты времени являлись как опорными, так и регистрирующими для разных систем (рис. 4, а). Эксперимент выполнялся в упомянутой выше кварцевой кювете, разделенной надвое перегородкой из шамотного кирпича для двух шихт из свободно насыпанных смесей порошков. Использовались исследованные ранее «положительная» система $\text{KClO}_4 + 2\text{Cr} + \text{Cr}_2\text{O}_3$ ($T_c = 1610$ К, $u = 2.0$ мм/с, $E_c^{\text{peak}} = +1.99$ В [9]) и «отрица-

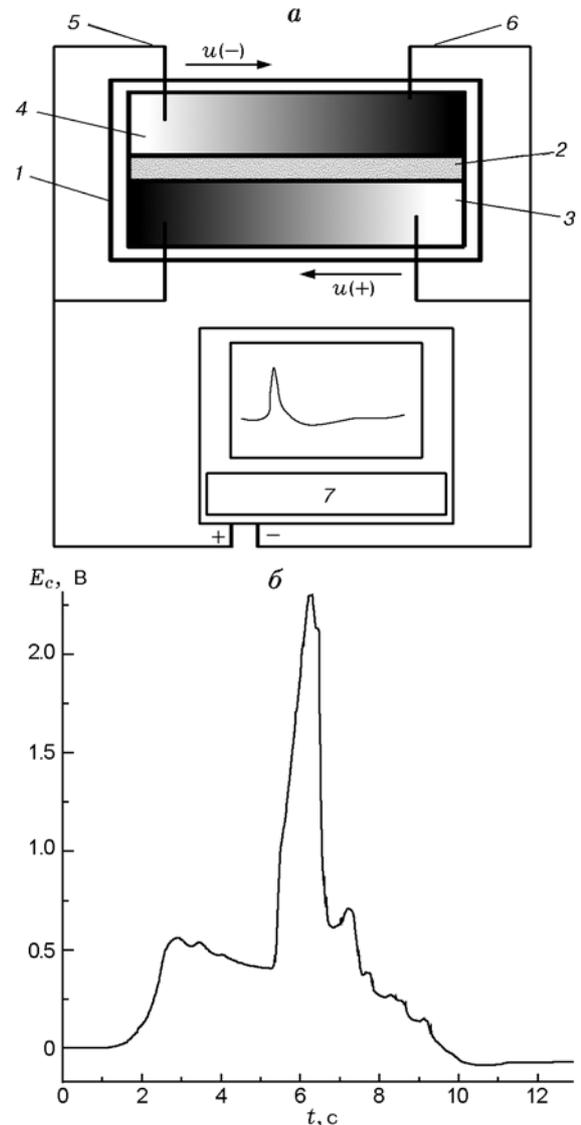


Рис. 4. Схема батарейной сборки элементов ЭДС горения (а) и зависимость суммарной ЭДС от времени после инициирования горения в батарейной сборке (б):

1 — кварцевая кювета, 2 — теплоизолирующая перегородка, 3 — «положительная» система, 4 — «отрицательная» система, 5, 6 — вольфрамовые зонды, 7 — временной регистратор

тельная» система $\text{CrO}_3 + \text{BaO}_2$ ($T_c = 1260$ К, $u = 2.2$ мм/с, $E_c^{\text{peak}} = -0.8$ В [18]). В каждую из них было помещено по два вольфрамовых зонда, попарно соединенных с зондами своей полярности в другой смеси (см. рис. 4, а). Инициирование смесей осуществлялось с помощью мини-горелки практически одновременно с противоположных сторон кюветы перед соответствующими зондами.

На рис. 4,б показано поведение ЭДС от времени после инициирования встречного горения в такой батарейной сборке. Видно, что прямая развиваемая суммарная ЭДС достигает 2.3 В. Хорошо заметно наличие двух пиковых стадий регистрации ЭДС, возникающих в процессе распространения фронтов волн горения в этих системах в пределах длины кюветы, обусловленное несколько более быстрым горением «отрицательной» системы по сравнению с «положительной» системой. При этом очевидно, что имеет место как бы последовательное соединение одиночных динамических элементов ЭДС: «положительная» система дает положительный сигнал (относительно заземленной точки) на положительный зонд, в то время как «отрицательная» система — отрицательный сигнал на отрицательный зонд (т. е. второй положительный сигнал на положительный зонд). За счет близости скоростей горения сигналы от ЭДС обеих систем в процессе горения у зондов успевают суммироваться, причем суммарная ЭДС будет тем ближе к сумме максимальных ЭДС горения обеих систем, чем точнее удастся синхронизировать в них процесс горения. Таким образом, использование двух разнополярно реагирующих систем в качестве элементов ЭДС горения в одной батарейной сборке позволяет заметно увеличить прямую регистрируемую разность электрических потенциалов до 2.3 В по сравнению с максимальной достигнутой ранее в одноэлементном исполнении для смеси $KClO_4 + 2Cr + Cr_2O_3$ [9].

ВЫВОДЫ

ЭДС горения, возникающая между фронтом волны горения и продуктами синтеза в гетерогенных системах с участием химических элементов III группы Периодической таблицы Менделеева, прямо пропорциональна ионному потенциалу химического элемента. Максимальные значения электродвижущей силы горения, созданной разными химическими элементами этой группы, составляют $150 \div 400$ мВ. Использование двух разнополярно реагирующих систем в качестве элементов ЭДС горения в одной батарейной сборке позволяет увеличить прямую регистрируемую разность электрических потенциалов до 2.3 В. Полученные результаты предоставляют возможность искать новые пути извлечения электрической энергии, вырабатываемой в процессе гетерогенного горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Процессы горения и синтез материалов / под ред. В. Т. Телепы, А. В. Хачояна. — Черноголовка: ИСМАН, 1998.
2. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Нерсисян М. Д., Мержанов А. Г. Электрохимические явления в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Докл. АН. — 1996. — Т. 351, № 6. — С. 780–782.
3. Максимов Ю. М., Кирдяшкин А. И., Корогодов В. С., Поляков В. Л. Генерация и перенос электрического заряда при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе на примере системы $Co-S$ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 5. — С. 130–133.
4. Кирдяшкин А. И., Поляков В. Л., Максимов Ю. М., Корогодов В. С. Особенности электрических явлений в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 2. — С. 61–67.
5. Максимов Ю. М., Кирдяшкин А. И., Габбасов Р. М., Саламатов В. Г. Эмиссионные явления в волне горения СВС // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 4. — С. 121–127.
6. Кирдяшкин А. И., Саламатов В. Г., Максимов Ю. М., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф., Габбасов Р. М. Особенности спектра оптического излучения в процессах горения с образованием конденсированных продуктов реакции // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 132–135.
7. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Бахтатов С. Г., Чобко А. А. Динамика ионов в процессах гетерогенного горения с участием твердых окислителей на основе щелочных металлов // Хим. физика. — 2005. — Т. 24, № 1. — С. 95–101.
8. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Бахтатов С. Г., Бусурин С. М., Чобко А. А. Образование ионов в процессах термического распада твердых окислителей на основе щелочноземельных металлов // Хим. физика. — 2007. — Т. 26, № 8. — С. 54–62.
9. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Белоусова О. В. Генерация электрических потенциалов при гетерогенном горении в системах, содержащих химические элементы VI группы // Хим. физика. — 2009. — Т. 28, № 10. — С. 58–64.
10. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В. Влияние магнитного поля на электродвижущую силу горения // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 1. — С. 22–26.
11. Проскудин В. Ф. ЭДС твердопламенного горения гетерогенных систем в насыпном и пресованном виде // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 71–77.

12. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В. О происхождении электродвижущей силы горения // Хим. физика. — 2000. — Т. 19, № 11. — С. 98–104.
13. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Бахтатов С. Г., Бусурин С. М. Исследование взаимодействия бора с оксидом хрома методом динамической ионографии // Химия и хим. технология. — 2003. — Т. 46, № 4. — С. 93–98.
14. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В. Электродвижущая сила горения и ионный потенциал в периодической таблице Д. И. Менделеева // 18 Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. — М.: ИФХиЭХ РАН, 2007. — Т. 1. — С. 343.
15. Ahrens L. H. The use of ionization potentials. Pt I. — Ionic radii of the elements // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 1952. — V. 2, N 3. — P. 155–169.
16. Pauling L. C. The Nature of the Chemical Bond. — Ithaca, NY: Cornell Univ. Press, 1960.
17. Бокий Г. Б. Кристаллохимия. — М.: Наука, 1971.
18. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В. Динамическая ионография СВС-процессов // Хим. физика. — 2001. — Т. 20, № 11. — С. 28–34.
19. Григорьева Т. Ф., Ворсина И. А., Корчагин М. А., Барина А. П., Ляхов Н. З. Получение ультрадисперсных сложных оксидов вольфрама и молибдена // Химия в интересах устойчивого развития. — 1999. — Т. 7, № 5. — С. 511–515.
20. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В. О зондовых измерениях ионизации при распространении пламени // Теплофизика высоких температур. — 1998. — Т. 36, № 2. — С. 338–340.
21. Martirosyan K. S., Filimonov I. A., Luss D. New measuring techniques of electric field generated by combustion synthesis // Intern. J. of SHS. — 2002. — V. 11, № 4. — P. 325–334.

Поступила в редакцию 19/III 2010 г.
