

Раздел четвертый
**ФИЗИКА РАДИАЦИОННЫХ
И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

УДК 621.039.736

**СИНТЕЗ СТРОНЦИЕВОГО ФТОРАПАТИТА
НА ОСНОВЕ ПИРОФОСФАТА КАЛЬЦИЯ**

*В.А. Шкуропатенко, Р.В. Тарасов, Е.А. Прудывус, С.Ю. Саенко,
Ф.В. Белкин, Л.М. Литвиненко, А.Г. Миронова, А.В. Пилипенко, Г.А. Холмеев*
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: shkuropatenko@kipt.kharkov.ua; тел./факс +38(057)335-39-05

Исследовалась возможность включения стронция в иммобилизационные кристаллические матрицы на основе фторапатита. Изучена эволюция фазового состава исходной шихты в процессе термообработок. Результаты показывают, что введение стронция в исходную шихту понижает температуру синтеза фторапатита с 1000 до 700 °С и сопровождается появлением β-трикальцийфосфата.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из долгосрочных и опасных последствий ядерных программ является накопление все возрастающих объемов радиоактивных отходов (РАО). Наибольшую опасность для биосферы представляют высокоактивные отходы (ВАО). В связи с тем, что периоды полураспада, биологическая опасность и химические свойства компонентов ВАО сильно различаются, сомнительна целесообразность включения всех радионуклидов в одну и ту же матрицу. Поэтому развивается концепция фракционирования ВАО.

Для того чтобы включенные в матрицу радионуклиды были надёжно иммобилизованы в течение необходимого времени, она должна обладать определённым комплексом физических и химических характеристик (теплофизические свойства материала, механические характеристики, радиационная стойкость, химическая стабильность) [1].

В качестве матриц для включения ВАО наибольшее развитие и применение получило стекло. Однако наряду с приемлемыми физико-механическими свойствами этих матриц, им присущ ряд недостатков, которых лишены кристаллические матрицы. Развитие альтернативного остекловыванию направления связано с использованием обладающих большей устойчивостью кристаллических матриц.

Концепция иммобилизации радиоактивных отходов в кристаллические матрицы основана на использовании в качестве матриц таких минеральных фаз, которые имеют природные аналоги, устойчивые на протяжении длительных геологических эпох.

В качестве монофазных матриц наиболее целесообразно рассматривать радиационно-устойчивые аналоги природных минералов, таких как цирконолит, холландит, перовскит, циркон [2], шпинель [3] и другие. Одним из перспективных

материалов может быть фторапатит $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, так как его структура в природных условиях имеет высокую химическую и термическую стабильность. Фторапатит входит в состав природных горных пород, содержащих в естественном состоянии радиоактивные вещества, и является известным радиационно-стойким материалом. Повреждения, вызванные излучением, во фторапатите являются термически не стабильными и при температуре выше 60 °С его структура восстанавливается до исходного состояния [4]. Кроме того, эта матрица интересна тем, что в ее структуре возможны многочисленные замещения. В частности, атомы кальция могут быть замещены некоторыми металлами, в том числе цезием и стронцием, которые представляют собой основную опасность в первые десятилетия хранения или захоронения отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и продуктов его переработки.

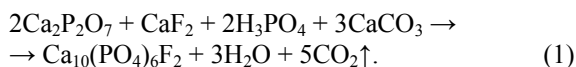
В результате Чернобыльской аварии на некоторой части территории Украины была приостановлена полноценная хозяйственная деятельность. Одним из реабилитационных мероприятий на этих территориях является иммобилизация золы от озонения древесины, которая загрязнена радиоактивными отходами, такими как цезий и стронций. В работе [5] исследовали синтез аналога природного фторапатита с использованием как основного компонента золу от озонения твердых органических отходов с Чернобыльской зоны.

Целью данной работы было изучение условий синтеза фторапатита, полученного на основе пирофосфата кальция, и исследование эволюции фазового состава в процессе термообработок.

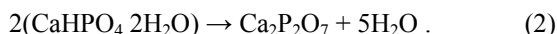
**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ОБОРУДОВАНИЕ**

Для получения фторапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ использовали такие компоненты: пирофосфат

кальция $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$, фторид кальция CaF_2 , карбонат кальция CaCO_3 в виде мела, ортофосфорную кислоту H_3PO_4 , которые были взяты в необходимой стехиометрии. Процесс получения фторапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ осуществляется по следующей реакции:



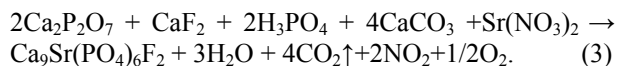
Порошок пирофосфата кальция получали путем термообработки дикальцийфосфата дигидрата $2(\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ при температуре 700°C в течение 4 ч. Количество дикальцийфосфата дигидрата $2(\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ брали исходя из того, что его разложение осуществлялось по реакции



Для получения мелкодисперсного порошка пирофосфата кальция измельчение проводили в монопланетарной мельнице в среде изопропилового спирта.

Пирофосфат кальция, карбонат кальция и фторид кальция смешивали в мельнице в среде изопропилового спирта и сушили при температуре $\sim 100^\circ\text{C}$ до остаточной влажности 3...5%. Высушенную шихту фторапатита просеяли через сито с размером ячеек 100 мкм.

Для введения стронция в шихту фторапатита использовали азотнокислый стронций $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ в виде водного раствора. Это обеспечивало равномерное распределение азотнокислого стронция в шихте. Процесс получения стронциевого фторапатита осуществлялся по следующей реакции:



Были получены и исследованы фторапатиты следующих составов: $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, $\text{Ca}_9\text{Sr}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, $\text{Ca}_8\text{Sr}_2(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, $\text{Ca}_7\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$.

Термообработку небольших порций порошка проводили на воздухе в печах СУОЛ-0,25.1/12-М1 и МП-2У в интервале температур $100\text{...}1200^\circ\text{C}$, с шагом 100°C . Для более полного понимания процессов синтеза фторапатита использовали термогравиметрический и дифференциально-термический анализ (ТГА/ДТА). ТГА/ДТА проводили на дериватографе Q-1500 D в интервале температур $20\text{...}1000^\circ\text{C}$, скорость нагрева $12^\circ\text{C}/\text{мин}$. Исследование фаз, которые образовались в процессе термообработки, проводили с помощью метода рентгенофазового анализа (РФА) (ДРОН-1,5, в медном излучении с применением никелевого селективного фильтра). Для идентификации фаз использовали базу дифракционных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эволюция фазового состава исходной шихты при синтезе фторапатита

Для определения оптимальной температуры синтеза фторапатита без стронция и фторапатита с различным содержанием стронция проводили термообработку небольших порций порошка в

интервале температур $100\text{...}1200^\circ\text{C}$, с шагом 100°C . В процессе термообработки проводился контроль убыли массы порошка с помощью взвешивания на весах. На рис. 1 приведены графики зависимости массы порошка от времени термообработки. На всех зависимостях можно выделить две стадии. Первая – отвечает за падение массы в процессе термообработки. По наклону кривых первой стадии видно, что, чем выше температура термообработки, тем больше скорость убыли массы. Вторая стадия (прямолинейный участок) показывает величину постоянной массы при температуре испытания. Из графиков видно, что чем больше содержание стронция в исходной шихте, тем при более низких температурах происходит стабилизация величины массы порошка. Данные по убыли массы порошков хорошо согласуются с результатами термогравиметрического и дифференциально-термического анализов (рис. 3, 6, 8, 10).

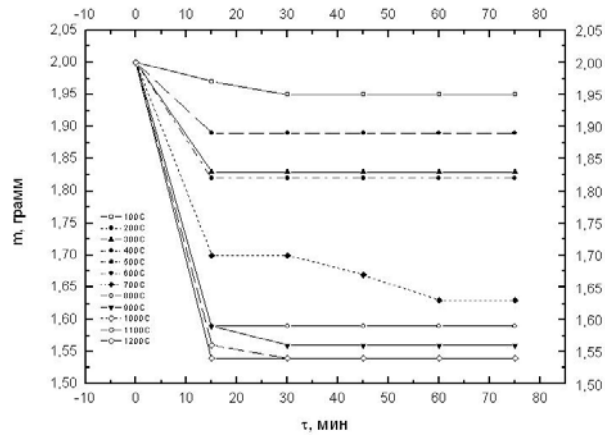
По результатам РФА после смешивания исходных компонентов были обнаружены только линии предварительно синтезированного пирофосфата кальция $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ (рис. 2). По данным работы [5] рентгенофазовые исследования показали, что после смешивания исходных компонентов шихту составляют: оксифосфат кальция (зола), фторид кальция и следы карбоната кальция. Сравнивая дифрактограмму исходной шихты при синтезе фторапатита с имитатором радиоактивной золы [5] и дифрактограмму исходной шихты при синтезе фторапатита на основе пирофосфата (см. рис. 4,а), можно сделать вывод, что отсутствие линий других компонентов шихты, возможно, связано с наложением линий $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ и CaF_2 (на углах $2\theta = 46\text{...}47^\circ$), разделить которые не удастся. Результаты термического анализа шихты фторапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ представлены на рис. 3. Термообработка исходной шихты до 500°C согласно рентгеновским исследованиям не влияет на изменение фазового состава (см. рис. 4,б). По данным ТГА и ДТА в интервале температур $120\text{...}280^\circ\text{C}$ отмечается мощный эндотермический эффект с минимумом при 140°C . Второй небольшой эндотермический пик на кривой ДТА возникает в интервале температур $440\text{...}520^\circ\text{C}$, с минимумом при 460°C .

На дифрактограмме образца, который термообработан при 600°C (см. рис. 4,в), наблюдается появление пиков фторапатита. При температуре 700°C появляется значительное количество линий фторапатита, а также снижается интенсивность линий $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$. Синтез фторапатита с использованием оксифосфата кальция полностью происходит в интервале температур $600\text{...}700^\circ\text{C}$. Дальнейшее повышение температуры приводит к росту зерен и более упорядоченному состоянию кристаллической структуры фторапатита [5].

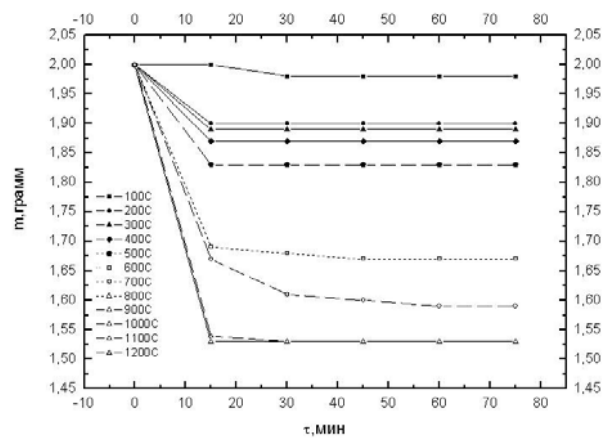
Полный синтез фторапатита с разрушением $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ протекает при температуре 900°C (см. рис. 4,д). На кривой ДТА в этой области температур наблюдается довольно сильный эндотермический

эффект с экстремумом при 900 °С. Кроме линий синтезированного фторapatита на дифрактограмме появляются линии трикальцийфосфата $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

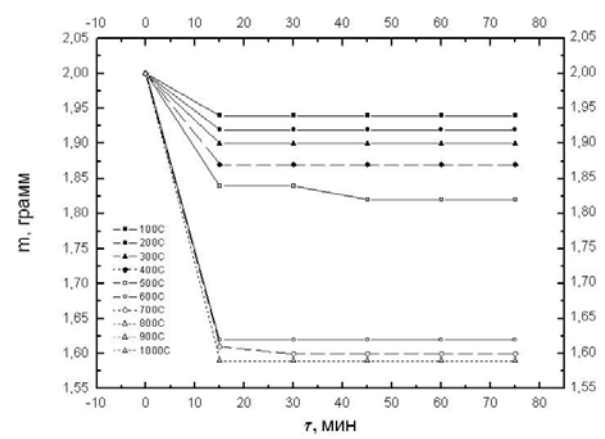
($\beta\text{-ТКФ}$). С увеличением температуры отжига до 1100 °С интенсивность линии данного фосфата уменьшается.



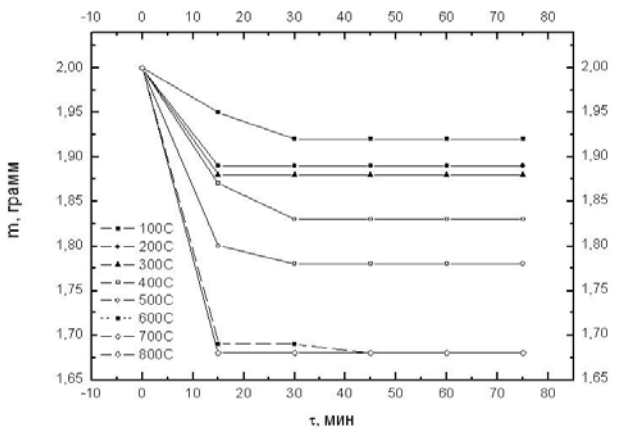
а



б



в



з

Рис. 1. График зависимости падения массы порошка от температуры и времени термообработки:
а – $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$; б – $\text{Ca}_9\text{Sr}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$; в – $\text{Ca}_8\text{Sr}_2(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$; з – $\text{Ca}_7\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$

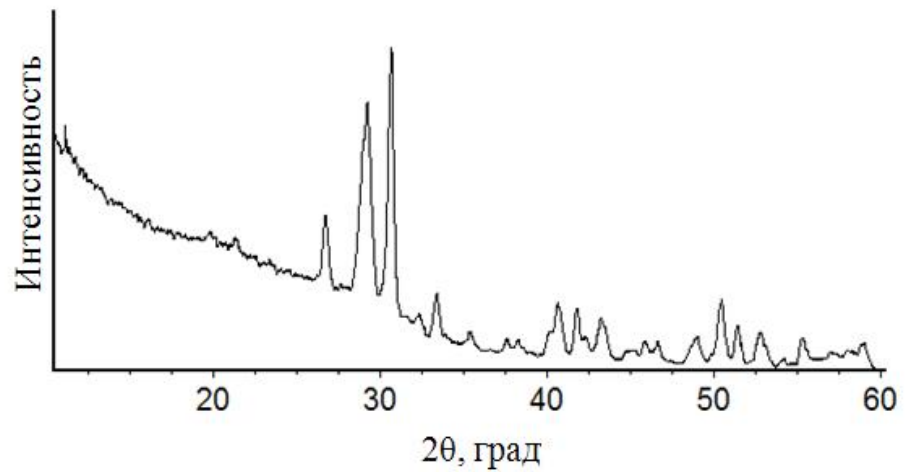


Рис. 2. Дифрактограмма синтезированного фосфата кальция $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$

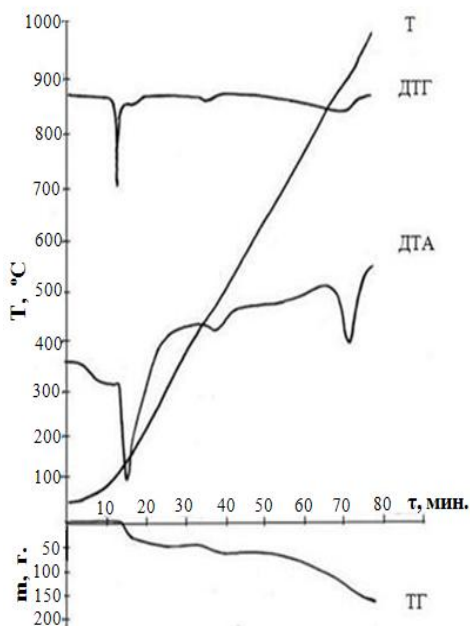


Рис. 3. Результаты термогравиметрического и дифференциально-термического анализа для фторапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$

Синтез стронциевого фторапатита

При включении значительного количества радионуклидов, например ^{90}Sr , в матрицу фторапатита закономерно возникнут проблемы, связанные с разогревом полученного вещества и необходимостью организации отвода тепла от канистр с ВАО при его хранении. Так в работе [6] рассматривается возможность хранения продуктов переработки ОЯТ в виде стержней, изготовленных из смеси оксидов Cs и Sr с удельным энерговыделением до 180 Вт/кг. При этом для хранения на воздухе максимальный диаметр стержней в расчетах принимался от 35 до 41 мм в зависимости от пористости материала, и температура на поверхности стержней составляла 516...587 К. Для хранения стержней в воде диаметр принимался от 51 до 80 мм и температура ~ 325 К.

Расчетная зависимость удельного энерговыделения во фторапатите за счет радиоактивного распада ^{90}Sr от степени замещения им кальция показана на графике рис. 5. Из графика следует, для того чтобы энерговыделение не превышало, например, рассмотренного в работе [6] уровня 180 Вт/кг, степень замещения кальция на ^{90}Sr во фторапатите не должна превышать величины 2,4. Для исследования влияния степени замещения кальция стронцием на свойства фторапатита исходную шихту готовили трех стехиометрических составов, чтобы получить стронциевый фторапатит $\text{Ca}_{10-x}\text{Sr}_x(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ с тремя различными значениями степени замещения $x = 1; 2; 3$.

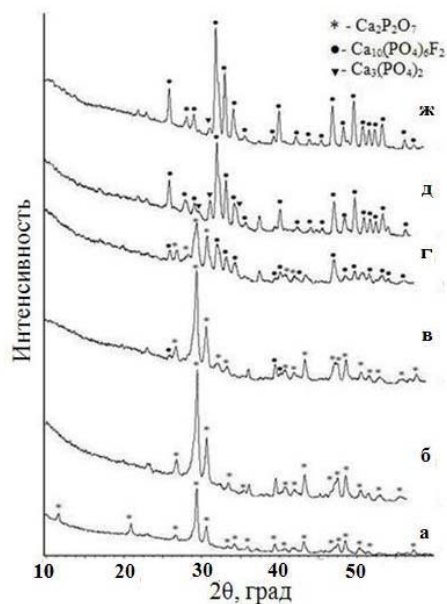


Рис. 4. Дифрактограммы образцов фторапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, синтезированного при разных температурах: а – исходная шихта; б – шихта, термообработанная при 500°C ; в – 600°C ; г – 700°C ; д – 900°C ; ж – 1100°C

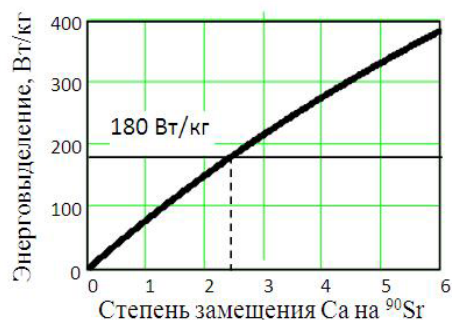


Рис. 5. Зависимость энерговыделения во фторапатите от степени замещения кальция на ^{90}Sr

Исследование первой смеси ($x = 1$) показало, что термообработка шихты фторапатита до температуры 500°C (рис. 7,а,б), как и в случае, когда $x = 0$, не влияет на изменение фазового состава. Однако на кривой ДТА (см. рис. 6) первый эндотермический пик ($110...290^\circ\text{C}$) с минимумом при 140°C менее выражен, чем при синтезе кальциевого фторапатита ($x = 0$). В интервале температур $400...600^\circ\text{C}$ возникает эндотермический эффект (с минимумом при 480°C), который переходит в слабо выраженный экзотермический (с максимумом при 530°C). Интенсивный синтез фторапатита проходит при температуре 600°C (см. рис.7 в). На ДТА (см. рис. 6) в этой области температур возникает эндотермический эффект с минимумом при 630°C . В отличие от смеси, где $x = 0$, наблюдается достаточно выразительное уменьшение интенсивности линий пирофосфата кальция и появление большего количества линий фторапатита.

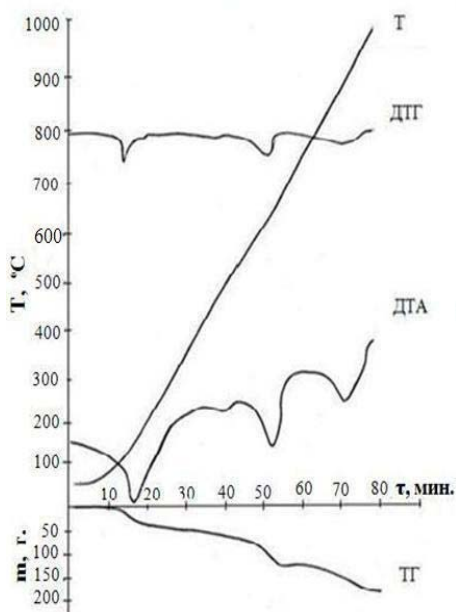


Рис. 6. Результаты термогравиметрического и дифференциально-термического анализа для фторапатита $\text{Ca}_9\text{Sr}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$

Полный синтез фторапатита с разрушением исходных фаз протекает в интервале температур 800...900 °С (см. рис.7,д) и сопровождается на кривой ДТА эндотермическим эффектом с экстремумом при температуре 880 °С. Как и для случая с кальциевым фторапатитом, на дифрактограмме появляются линии β-ТКФ.

Процесс разложения исходных компонентов продолжается при дальнейшем повышении температуры термообработки. На кривой ДТА (см.

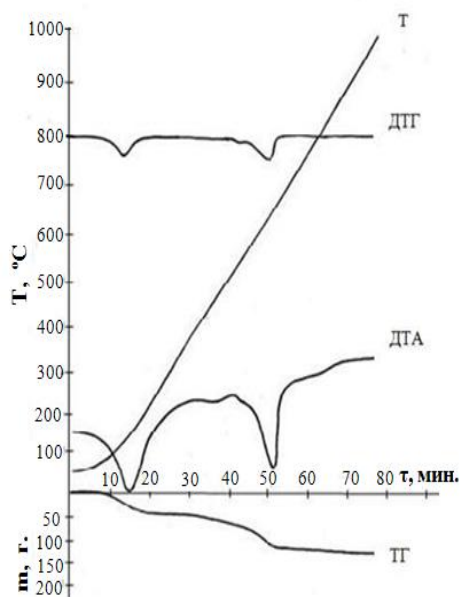


Рис. 8. Результаты термогравиметрического и дифференциально-термического анализа для фторапатита $\text{Ca}_8\text{Sr}_2(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$

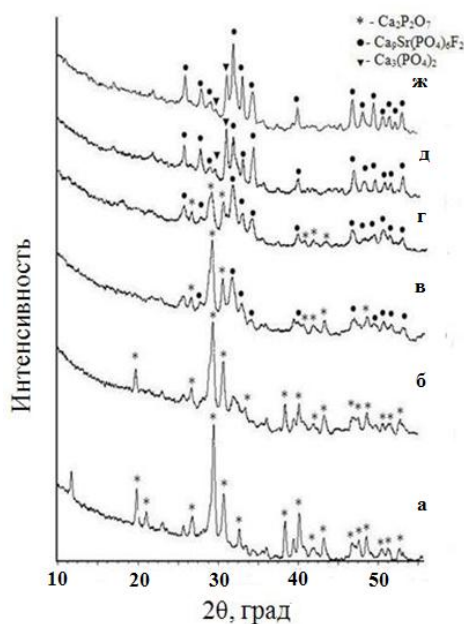


Рис. 7. Дифрактограммы образцов фторапатита $\text{Ca}_9\text{Sr}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, синтезированного при разных температурах: а – исходная шихта; б – шихта, термообработанная при температуре 500 °С; в – 600 °С; г – 700 °С; д – 900 °С; ж – 1100 °С

рис. 8) наблюдается достаточно сильный эндотермический пик в интервале температур 540...680 °С с минимумом при 620 °С. Дифрактограммы, которые отвечают данному температурному интервалу (рис. 9,в,г) указывают на дальнейшее разложение пирофосфата кальция с последующим частичным синтезом фторапатита. Полный синтез фторапатита завершается при температуре термообработки 900 °С (см. рис. 9,д).

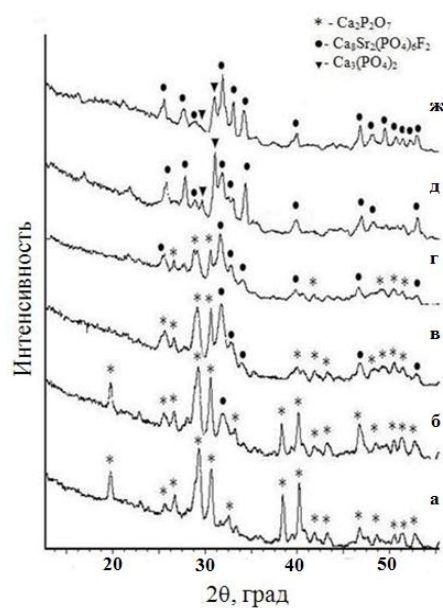


Рис. 9. Дифрактограммы образцов фторапатита $\text{Ca}_8\text{Sr}_2(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, синтезированного при разных температурах: а – исходная шихта; б – шихта, термообработанная при температуре 500 °С; в – 600 °С; г – 700 °С; д – 900 °С; ж – 1100 °С

При увеличении содержания стронция до $x = 3$ поведение системы напоминает механизм синтеза фторапатита при $x = 2$. Согласно данным ТГА/ДТА (см. рис. 10) в интервале температур 40...530 °С наблюдается четкий эндотермический эффект (40...280 °С) и менее четкие эндотермический (400...490 °С) и экзотермический (490...530 °С) эффекты. Дальнейшее повышение температуры термообработки вызывает интенсивное разложение

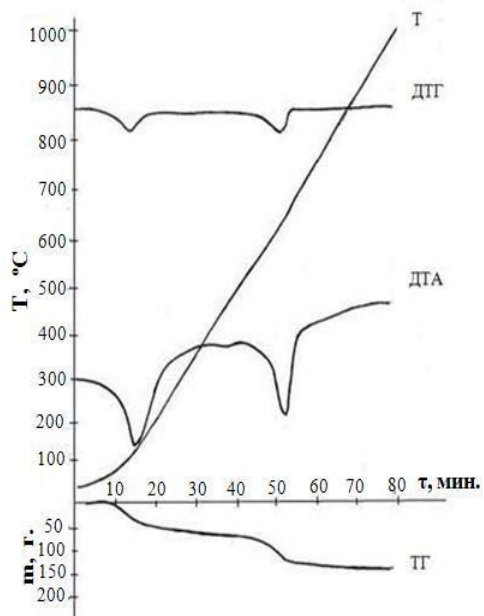


Рис. 10. Результаты термогравиметрического и дифференциально-термического анализа для фторапатита $\text{Ca}_7\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$

При дальнейшем увеличении температуры синтеза фторапатита исследуемых составов наблюдается постепенное уменьшение количества линий β -трикальцийфосфата, и при температуре 1300 °С (рис. 12) данная фаза зафиксирована только для состава $\text{Ca}_7\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$.

Для определения параметров кристаллической решетки фторапатита использовали отражения, лежащие в диапазоне углов $2\theta = 50...54$ град. Это связано с тем, что в диапазоне этих углов в медном излучении находятся три достаточно сильных отражения с индексами (410), (402) и (004), которые позволяют с достаточно высокой точностью (до 0,05 град) определить положение максимума. На основании этих трех отражений попарно определяли три значения параметров решетки, что позволило определить среднеарифметическое значение параметров решетки фторапатита. Параметры кристаллической решетки синтезированного фторапатита приведены в таблице. Для сравнения влияния введения стронция в систему параметры рассчитывались при температуре термообработки 900 °С.

исходных фаз, о чем свидетельствует эндотермический эффект в интервале температур 580...690 °С с экстремумом при 620 °С. Одновременно продолжается образование $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (рис. 11,в). При температуре 700 °С (см. рис. 11,г) наблюдается начало кристаллизации фторапатита. Завершение синтеза фторапатита происходит при 800 °С (см. рис. 11,д). Однако при этом сохраняется значительное количество линий $\beta\text{-ТКФ}$.

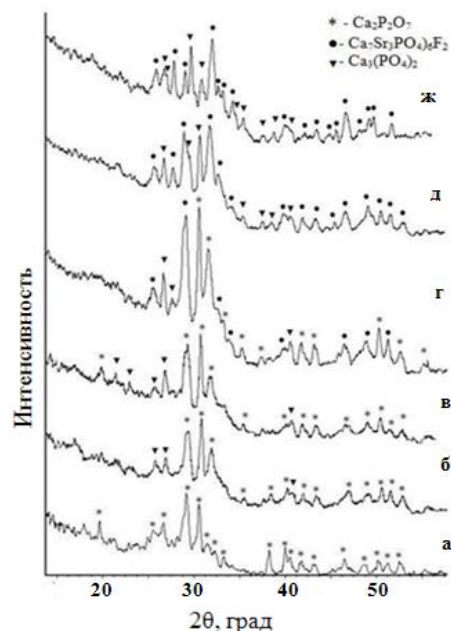


Рис. 11. Дифрактограммы образцов фторапатита $\text{Ca}_7\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, синтезированного при разных температурах: а – исходная шихта; б – шихта, термообработанная при температуре 500 °С; в – 600 °С; г – 700 °С; д – 800 °С; ж – 900 °С

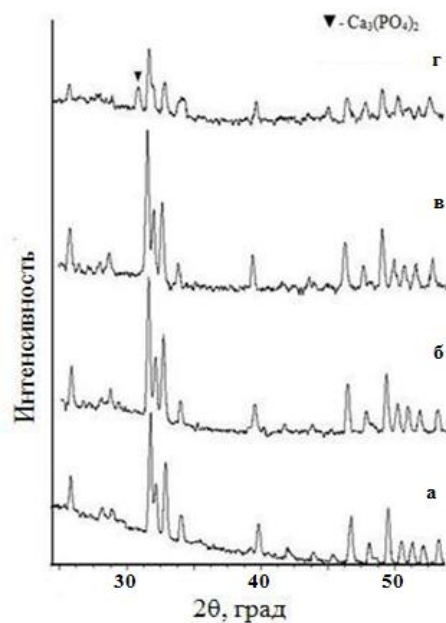


Рис. 12. Синтез фторапатита при температуре 1300 °С: а – $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$; б – $\text{Ca}_9\text{Sr}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$; в – $\text{Ca}_8\text{Sr}_2(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$; г – $\text{Ca}_7\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$

Как видно из таблицы, наблюдается тенденция к увеличению параметров кристаллической решетки с увеличением количества стронция во фторапатите.

Зависимость параметров кристаллической решетки фторапатита от степени замещения x

| x | Параметры кристаллической решетки | |
|---|-----------------------------------|---------------------------|
| | $a \pm 0,01, \text{ \AA}$ | $c \pm 0,01, \text{ \AA}$ |
| 0 | 9,35 | 6,87 |
| 1 | 9,37 | 6,88 |
| 2 | 9,37 | 6,89 |
| 3 | 9,37 | 6,89 |

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Каждая стадия на кривой ТГ характеризуется присущим ей процессом, который происходит во время термической обработки исходной шихты фторапатита. Сравнение результатов ТГА/ДТА и РФА показывает, что для всех составов фторапатита в интервале температур 80...280 °С происходит удаление сорбированной воды, о чем свидетельствует потеря веса на кривых ТГ, эндотермические эффекты на кривых ДТА, а также отсутствие видимых изменений в фазовом составе. При дальнейшем повышении температуры термообработки для всех составов наблюдаются эндотермические эффекты в интервале 400...500 °С, которые связаны с началом разложения карбоната кальция, находящегося в шихте в малом количестве.

С добавлением стронция данный эндотермический эффект переходит в экзотермический, который связан с кристаллизацией фторапатита для $x = 1$ и 2 (см. рис. 9,б) и образованием β -ТКФ для $x = 3$ (см. рис. 11,б). Синтез $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ протекает в пределах эндотермического эффекта 900...1000 °С (см. рис. 3). Синтез стронциевого фторапатита происходит при более низких температурах. Чем выше содержание стронция, тем ниже температура синтеза фторапатита. При сравнительно низких температурах (700...900 °С) происходит синтез фторапатита с частичным образованием β -ТКФ. С повышением температуры до 1300 °С β -ТКФ исчезает.

В отличие от результатов других авторов, у которых при синтезе стронциевого фторапатита никакие другие фазы не образуются [7], получение фторапатита по химическим реакциям (1)-(3), указанным ранее, сопровождается появлением новой фазы β -ТКФ в интервале температур 500...1100 °С и исчезающей с увеличением температуры до 1300 °С. Следует отметить, что в работе [8] при синтезе стронциевых апатитов $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ образуются две фосфатные фазы: $\text{Sr}_2(\text{PO}_4)_2$ (~ 15 вес.%) и $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7$ (~ 1 вес.%). Появление β -ТКФ наблюдается при термической обработке нестехиометрических апатитов. Термообработка стехиометрических апатитов не приводит к преобразованию их ни в какую другую фазу [9]. Большое количество β -ТКФ, особенно при синтезе фторапатита $\text{Ca}_7\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, возможно вызвано трудностями создания гомогенной исходной шихты.

ВЫВОДЫ

Проведено исследование эволюции фазового состава при синтезе кальциевого фторапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ и фторапатита с частичным замещением кальция стронцием $\text{Ca}_{10-x}\text{Sr}_x(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, где $x = 1; 2; 3$.

Методами ТГА/ДТА и РФА показано, что с добавлением ^{88}Sr , имитатора радионуклида ^{90}Sr , синтез фторапатита начинается при более низких температурах, что важно при проведении технологических операций с легколетучими радионуклидами.

Синтез стронциевого фторапатита на основе пирофосфата кальция на воздухе при относительно низких температурах сопровождается образованием новой фазы β -ТКФ, которая исчезает с увеличением температуры до 1300 °С.

Полученный материал на основе фторапатита может быть использован как иммобилизационная матрица для радионуклидов стронция.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.О. Меркушин. *Получение химически устойчивых матриц для иммобилизации актиноидной фракции ВАО*: Дис. ... канд. хим. наук. М.: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2003.
2. В.М. Ажажа, В.А. Белоус, С.В. Габелков, Е.Д. Джур, Ю.А. Крикун, В.В. Левенец, Г.В. Лисиченко, И.М. Неклюдов, С.Ю. Саенко, Р.В. Тарасов, Б.А. Шиляев, Б.М. Широков, А.В. Щур. *Ядерная энергетика. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами*. Киев: «Наукова думка», 2006, 253 с.
3. С.В. Габелков, Р.В. Тарасов, Н.С. Полтавцев, М.П. Старолат, Е.П. Березняк, А.В. Пилипенко, А.Г. Миронова, В.В. Макаренко. *Магний-алюминиевая шпинель – инертная матрица для изоляции высокоактивных отходов: Тезисы докладов на XVIII Междун. конф. по физике радиац. явлений и радиац. материаловедению, 8-13 сентября, 2008 г., Алушта, Крым*. Харьков, 2008, с. 328-329.
4. Карпена Жозель, Буае Лоран, Лаку Жан-Луи. *Способ захоронения плутония в апатитовой керамике и продукт, полученный с использованием этого способа*. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, Российская Федерация, 1999.09.10, заявка №2001110070/06.
5. Ф.В. Белкин, Р.В. Тарасов, В.А. Шкурпатенко, К.А. Прудивус, А.Г. Миронова, Л.М. Литвиненко. *Штучний фторапатит для іммобілізації золи від спалювання деревини Чорнобильської зони // Ядерна та радіаційна безпека, 2012 (в печати)*.
6. Michael D. Kaminski. *Engineering product storage under the advanced fuel cycle initiative. Part I: An iterative thermal transport modeling scheme for high-heat-generating radioactive storage forma // Journal of nuclear materials*. 2005, p. 94–102.

7. B.E. Burakov. *Development of fluorapatite as a Waste Form: Final Report*, 2004, V.G. Khlopin Radium institute, Saint-Petersburg, Russia.

8. Elena Maserata, Piergiuseppe Innocente, Mario Mariani and Michele Galletta. Immobilization of

radioactive isotopes in fluorapatite matrices // *Materials Research Society*. Dipartimento di Energia, Serione Ingegneria Nucleare – CeSNEF, Politecnico di Milano, via G. Ponzio, 34/3, I-20133, Milano, Italy.

Статья поступила в редакцию 12.07.2012 г.

СИНТЕЗ СТРОНЦІЄВОГО ФТОРАПАТИТУ НА ОСНОВІ ПРОФОСФАТУ КАЛЬЦІЮ

В.А. Шкуропатенко, Р.В. Тарасов, К.А. Прудивус, С.Ю. Саєнко, Ф.В. Белкін, Л.М. Литвиненко, А.Г. Миронова, О.В. Пилипенко, Г.О. Холомєєв

Досліджувалась можливість включення стронцію в іммобілізаційні кристалічні матриці на основі фторапатиту. Досліджена еволюція фазового складу початкової шихти в процесі термообробок. Результати показують, що введення стронцію в початкову шихту знижує температуру синтезу фторапатиту з 1000 до 700 °С і супроводжується появою β-трикальційфосфату.

SYNTHESIS STRONTIUM FLUORAPATITE ON A BASIS CALCIUM PYROPHOSPHATE

V.A. Shkuropatenko, R.V. Tarasov, K.A. Prudyvus, S.Yu. Sayenko, F.V. Belkin, L.M. Lytvynenko, A.G. Myronova, A.V. Pylypenko, G.A. Kholomyeyev

In this study we investigated the possibility of including strontium in the immobilisation matrix based on crystalline fluorapatite. Evolution of phase composition of the initial charge in the process of heat treatment is study. The results show that the incorporation of strontium in the initial mixture decreases the temperature of the synthesis of fluorapatite from 1000 to 700 °C and is accompanied by the appearance of β-tricalcium phosphate.