

Важными преимуществами схемы экспедиционного комплекса на базе ЯРД по сравнению с вариантом на базе ЖРД являются возможность реализации ускоренных экспедиций на Марс продолжительностью до 500 сут при приемлемой стартовой массе около 700 т (в 2—3 раза меньше) и существенно меньшая зависимость стартовой массы от допустимой скорости входа корабля возвращения в атмосферу Земли.

Таким образом, применение ЯРД в составе разгонных блоков и многоразовых межорбитальных буксиров для транспортных операций в околоземном пространстве нецелесообразно, поскольку снижает удельную стоимость доставки космических аппаратов на целевые орбиты по сравнению с разгонными блоками на базе кислородно-водородных ЖРД. Вместе с тем ЯРД могут рассматриваться как возможный вариант двигательного обеспечения марсианского экспедиционного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротеев А.С., Гафаров А.А., Сметанников В.П. и др. Опыт создания и основные направления развития и применения космической ядерной энергетики в России. — Бюл. по атомной энергии, 2003, № 9, с. 51—57 (ЦНИИАтоминформ).
2. Robbins W., Finger H. An Historical Perspective of the NERVA Nuclear Rocket Engine Technology Program. NASA-CR-187154 (AIAA-91-3451), 1991.
3. Gerrish H. Jr. Nuclear Thermal Propulsion Ground Test History. The Rover/NERVA Program. NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL, 2014.
4. Summary Report CY 1970 for Period Ending 30 September 1970. NERVA Program. Aerojet. M001-STR04-W234ald, 1970.
5. Gerrish H., Doughty G., Bhattacharyya S. Affordable development and qualification strategy for nuclear thermal propulsion. — In: 49th Joint Propulsion Conf. US, San Jose, AIAA 2013-4161.
6. Концептуальный проект ядерного ракетного двигателя для задач освоения космического пространства. Проект № 335. Т. 1. Концептуальный проект ЯРД для лунного буксира. МНТЦ 335-96, 1997.
7. Коротеев А.С., Гафаров А.А., Сметанников В.П. и др. Опыт создания и основные направления развития и применения космической ядерной энергетики в России. — Бюл. по атомной энергии, 2003, № 10, с. 31—36 (ЦНИИАтоминформ).
8. Баринев С.В., Беляков М.С., Колганов В.Д. и др. Концепция маршевой ядерной энергодвигательной установки для осуществления пилотируемой экспедиции на Марс (Проект МНТЦ № 2120). — В сб.: Межд. конф. «Ядерная энергетика в космосе—2005». Москва—Подольск, 2005, с. 489—497.
9. Borowski S., Sefcik R., Fittje J. Affordable development and demonstration of a small NTR engine and stage: how small is big enough? — In: AIAA Space & Astronautics Forum & Exposition (Space 2015). US, Pasadena, AIAA 2015-4524.

Поступила в Редакцию 15.01.18

УДК 532.133

ИЗМЕРЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ РАСПЛАВЛЕННЫХ СМЕСЕЙ ФТОРИДОВ НАТРИЯ, ЛИТИЯ, БЕРИЛЛИЯ И ВЛИЯНИЕ НА ВЯЗКОСТЬ ЭВТЕКТИКИ ДОБАВКИ ТРИФТОРИДА ЦЕРИЯ

Мерзляков А.В., Игнатьев В.В. (НИИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

В настоящее время во многих странах мира ведутся работы по жидкосолевым ядерным реакторам с циркулирующим топливом на основе расплавов солей фторидов металлов. Для их расчетного обоснования необходимо знать теплофизические свойства используемой топливной соли. Одним из важнейших ее свойств является вязкость. В некоторых работах рассматривается возможность использования расплава NaF—LiF—BeF_2 в топливном контуре сжигателя трансурановых элементов из отработавшего ядерного топлива легководных реакторов [1].

Теплофизические свойства расплавов солей фторидов металлов, предлагаемых к использо-

ванию в жидкосолевом реакторе, изучали у нас в стране и за рубежом [2—4].

Данные о вязкости требуемого молярного состава расплава и особенно влияния на вязкость добавки трифторидов металлов ограничены. Поэтому для конкретной топливной соли необходимо ее измерить. Исследование, помимо практической ценности, имеет определенный научный интерес: в смесях присутствуют ионы с высокой поляризующей способностью (Be^{2+}) и процессы комплексообразования должны сказываться на свойствах подобных расплавов.

В настоящей работе для измерения вязкости были выбраны три расплава молярного со-

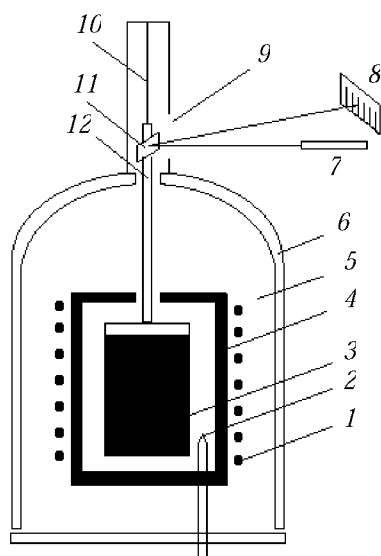
става $64,2\text{NaF}—7,0\text{LiF}—28,8\text{BeF}_2$, $56,7\text{NaF}—22,0\text{LiF}—21,3\text{BeF}_2$ и эвтектика $58\text{NaF}—15\text{LiF}—27\text{BeF}_2$. Для последнего состава расплава было исследовано влияние на вязкость добавки 1 мол. доля, % трифторида церия. Вязкость измеряли методом крутильных колебаний заполненного расплавом цилиндрического тигля. Подробно методика описана в [5].

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Цилиндрический тигель из коррозионно-стойкой стали с расплавом соли 3 через металлический стержень 12 подвешивался на упругой металлической нити 10 внутри термостатической вставки 4, изготовленной из материала с высокой теплопроводностью. На внешней стороне термостатической вставки размещался нагреватель 1. Температуру измеряли термопарой 2, расположенной вблизи тигля внутри термостатической вставки. Нагреваемую зону отделяли от герметичного водоохлаждаемого корпуса 6 толстым слоем теплоизоляции 5. На стержне подвесной системы 12 монтировали зеркало 11. Луч гелий-неонового лазера 7 через окно 9 направляли на зеркало 11. Положение отраженного луча фиксировалось на шкале 8. Эксперименты проводили в атмосфере чистого аргона.

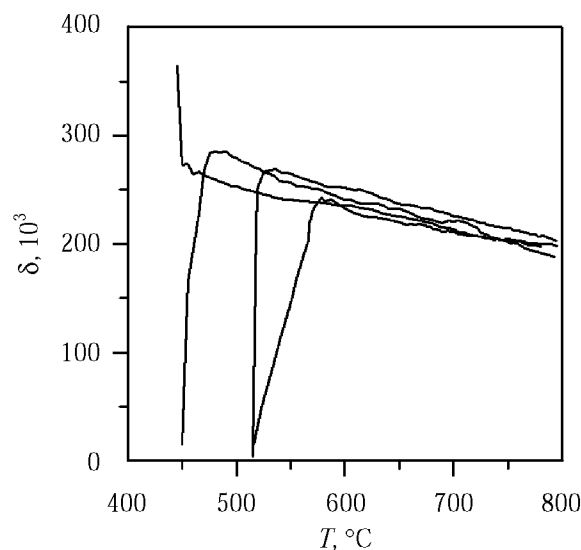
Для проверки работоспособности системы и корректности обрабатывающих программ была измерена вязкость нескольких растворов глицерина в воде. Сравнение показало, что методика измерений и обработки экспериментальных данных позволяет получать корректные резуль-

таты в диапазоне кинематической вязкости от 10^{-6} до $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Используемая методика позволяет определять и температуру ликвидуса расплава. На рис. 2 представлены зависимости декремента затухания от температуры для всех четырех исследованных в настоящей работе составов. В области существования нормальной жидкости декремент затухания медленно возрастает с понижением температуры. Уменьшение декремента с понижением температуры означает выделение твердого вещества на дне или боковых стенках тигля. Температуру начала процесса можно интерпретировать как температуру ликвидуса. Подобные зависимости характерны для трех исследованных составов. Для четвертого состава с добавкой трифторида церия наблюдается резкое скачкообразное повышение декремента затухания при снижении ниже определенной температуры, что можно интерпретировать как образование твердых частиц в объеме жидкости. Температуру, при которой это происходит, также можно интерпретировать как температуру ликвидуса. На основании измерений определена температура ликвидуса исследованных расплавов следующего молярного состава, °C: 525–530 для расплава $64,2\text{NaF}—7,0\text{LiF}—28,8\text{BeF}_2$, ~580 для $56,7\text{NaF}—22,0\text{LiF}—21,3\text{BeF}_2$, ~480 для $58\text{NaF}—15\text{LiF}—27\text{BeF}_2$ и ~450 для $0,99(58\text{NaF}—15\text{LiF}—27\text{BeF}_2) + 1\text{CeF}_3$. Температура ликвидуса для эвтектического состава



Р и с. 1. Схема экспериментальной установки для измерения кинематической вязкости



Р и с. 2. Зависимость декремента затухания от температуры расплава молярного состава $64,2\text{NaF}—7,0\text{LiF}—28,8\text{BeF}_2$ (штрих-пунктир), $56,7\text{NaF}—22,0\text{LiF}—21,3\text{BeF}_2$ (сплошная), $58\text{NaF}—15\text{LiF}—27\text{BeF}_2$ (длиннопунктир), $0,99(58\text{NaF}—15\text{LiF}—27\text{BeF}_2) + 1\text{CeF}_3$ (короткопунктир)

58NaF—15LiF—27BeF₂ и молярного состава 64,2NaF—7,0LiF—28,8BeF₂ совпадает с фазовой диаграммой [3]. Для молярного состава 56,7NaF—22,0LiF—21,3BeF₂ температура ликвидуса примерно на 50 градусов выше приводимой на фазовой диаграмме [3]. Возможно, это расхождение обусловлено тем, что фазовая диаграмма получена в результате расчетов и в некоторой части может содержать неточности.

Добавление трифторида церия к эвтектике молярного состава 58NaF—15LiF—27BeF₂ снижает температуру ликвидуса, что находится в некотором противоречии с расчетными данными [4] для добавки трифторида плутония. По расчетным данным [4] при добавлении 1,3 мол. доля, % трифторида плутония температура ликвидуса увеличивается с 480 до ~562 °С.

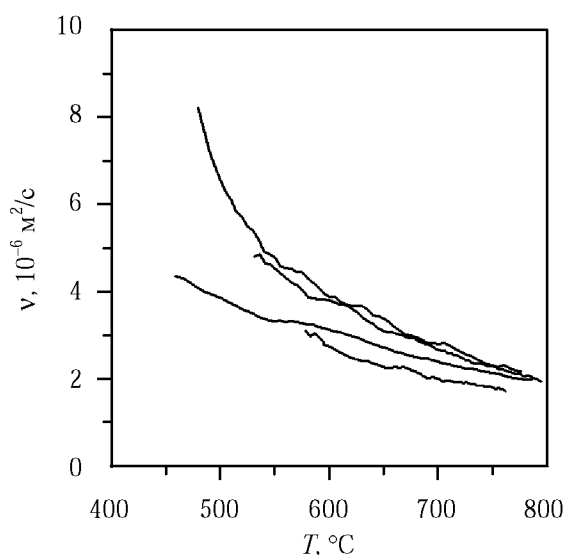
Измеренная кинематическая вязкость четырех исследованных составов показана на рис. 3. Видно, что составы 64,2NaF—7,0LiF—28,8BeF₂ и 58NaF—15LiF—27BeF₂ с близким содержанием дифторида бериллия имеют и близкую вязкость. Зависимость кинематической вязкости от температуры в экспериментально исследованном диапазоне температуры представлялась в виде

$$10^6 \nu = A \exp[E_A(1/T - 1/T_{cp})],$$

где A — предэкспоненциальный множитель; E_A — коэффициент, пропорциональный энергии активации текучести; T , T_{cp} — температура и средняя температура по набору экспериментальных точек K .

Соответственно логарифм кинематической вязкости можно представить в виде $\ln(10^6 \nu) = \ln(A) + E_A(1/T - 1/T_{cp})$.

Для определения параметров экспериментальные точки методом наименьших квадратов аппроксимировали линейной зависимостью в координатах $1/T$, $\ln(\nu)$. В таблице представлены полученные параметры, среднее квадратическое



Р и с. 3. Зависимость вязкости от температуры расплава молярного состава 64,2NaF—7,0LiF—28,8BeF₂ (—), 56,7NaF—22,0LiF—21,3BeF₂ (—), 58NaF—15LiF—27BeF₂ (—), 0,99(58NaF—15LiF—27BeF₂) + 1CeF₃ (—)

отклонение экспериментальных точек от полученных параметрических зависимостей σ , температурный интервал и число измерений.

В бинарных расплавах солей LiF—BeF₂ и NaF—BeF₂ проявляется сходное влияние увеличения концентрации фторида бериллия на рост вязкости [5]. При постоянной температуре вязкость сначала изменяется незначительно и начинает резко увеличиваться только после достижения некой критической концентрации BeF₂. Критическая концентрация тем больше, чем выше температура расплава. Это можно трактовать как полимеризацию за счет молекул дифторида бериллия. В области 20—30 мол. доля, % BeF₂ вязкость изучаемых составов определяется концентрацией BeF₂ только при температуре ниже 600 °С. Отметим также, что при прочих равных условиях вязкость системы LiF—BeF₂ оказывается выше, чем системы NaF—BeF₂. Если признать данные [5] достоверными, то снижение вязкости при уменьшении концентрации BeF₂ может в некоторых случаях компен-

Параметры, характеризующие вязкость расплавленных смесей фторидов лития, натрия и бериллия

Молярный состав	A , м ² /с	E_A , К	T_{cp} , К	σ , 10 ⁶ м ² /с	Δt , °С	Число измерений
64,2NaF—7,0LiF—28,8BeF ₂	2,93	2923,9	941,79	0,065	525—794	83
56,7NaF—22,0LiF—21,3BeF ₂	2,13	2556,04	954,37	0,048	578—792	63
58NaF—15LiF—27BeF ₂	3,66	3171,69	894,85	0,189	475—800	189
0,99(58NaF—15LiF—27BeF ₂) + 1CeF ₃	2,91	1846,18	882,8	0,087	450—805	199

сироваться ее увеличением за счет повышения концентрации фторида лития. Это находит подтверждение в полученных в настоящей работе данных, где наблюдается почти полное совпадение вязкости для расплавов молярного состава $58\text{NaF}—15\text{LiF}—27\text{BeF}_2$ (эвтектика) и $64,2\text{NaF}—7,0\text{LiF}—28,8\text{BeF}_2$. В тройной эвтектике концентрация BeF_2 и NaF ниже на 1,8 и 6,2 мол. доля, % соответственно по сравнению с последним составом. Однако этот состав содержит заметно меньше LiF по сравнению с эвтектическим тройным составом. При высокой температуре разница в вязкости между этими составами не превышает экспериментальную ошибку.

После измерения вязкости эвтектического состава в тот же тигель была добавлена 1 мол. доля, % CeF_3 и определена вязкость. Эксперимент проводили в тех же условиях, что и первый. В экспериментальных результатах наблюдали особенности, которые требуют дополнительного обсуждения. Например, добавление трифторида церия к эвтектике снижает температуру ликвидуса и уменьшает кинематическую вязкость при низкой температуре.

Исходная эвтектическая композиция находится в области концентрации фторида бериллия, где при низкой температуре расплава его вязкость определяется сеткой связей между молекулами BeF_2 . Это означает, что молекулы BeF_2 образуют достаточно большие кластеры. Если добавление CeF_3 приводит к разрушению

связей между молекулами BeF_2 , то размеры кластеров уменьшаются. При высокой температуре добавка фторида церия почти не влияет на кинематическую вязкость расплава.

Таким образом, в настоящей работе получены экспериментальные данные о вязкости некоторых составов солевой системы $\text{NaF}—\text{LiF}—\text{BeF}_2$ и исследовано влияние на вязкость эвтектики добавки трифторида церия. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования концепции жидкосолевого реакторасжигателя трансурановых элементов из отработавшего ядерного топлива легководных реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игнатьев В.В., Фейнберг О.С., Загнитко А.В. и др. Жидкосолевые реакторы: новые возможности, проблемы и решения. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 3, с. 157—165.
2. Phase Diagrams of Nuclear Reactor Materials. Ed. R. Thoma. Rep. ORNL-2548, 1959.
3. Beneš O., Konings R.J.M. Thermodynamic evaluation of the $\text{LiF}—\text{NaF}—\text{BeF}_2—\text{PuF}_3$ system. — J. Chem. Thermodyn., 2009, v. 41, p. 1086—1095.
4. Десятник В.Н., Нечаев В.И., Червинский Ю.Ф. Вязкость расплавленных смесей фторида бериллия с фторидами лития и натрия. — Журнал прикладной химии, 1981, т. 54(10), с. 2310—2312.
5. Abalin S., Asmolov V., Daragan V. e.a. Corium kinematic viscosity measurement. — Nucl. Engng Design, 2000, v. 200, p. 107—115.

Поступила в Редакцию 14.11.17

УДК 621.182.12

УЧЕТ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА 2-го КОНТУРА АЭС С ВВЭР

Гаврилов А.В., Прохоров Н.А., Крицкий В.Г. (АО «АТОМПРОЕКТ», г. Санкт-Петербург)

Главной задачей водно-химического режима рабочей среды 2-го контура АЭС с ВВЭР является поддержание определенных значений pH для минимизации скорости коррозии конструкционных материалов и соответственно скорости роста отложений на теплообменных трубках парогенераторов. Согласно современным представлениям для обеспечения этого условия показатель pH_{25} питательной воды должен быть более 9,7. В мировой практике для поддержания необходимых значений pH в рабочей среде

2-го контура широко применяются водно-химические режимы с дозированием органических аминов [1, 2]. В отечественной практике для проектируемых и строящихся блоков АЭС с ВВЭР предложен аммиачно-этаноламиновый водно-химический режим с дозированием гидразина для связывания кислорода [3, 4]. Опыт подтвердил значительное снижение скорости коррозии во 2-м контуре [3—5]. Аммиачно-этаноламиновый водно-химический режим в настоящее время рассматривается в качестве основ-