# ОТЗЫВ

официального оппонента Ананьева Алексея Владиленовича на диссертацию Архипова Степана Павловича «Электрохимическое поведение урана, хрома, железа и никеля в расплаве $LiF-BeF_2$», представленную на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии

**Общая характеристика работы**

Диссертационная работа Архипова С.П. посвящена исследованию закономерностей электрохимического поведения U, Cr, Fe и Ni в расплавах, перспективных для использования в жидкосолевых ядерных реакторах (ЖСР) нового поколения, позволяющих решать важные задачи по утилизации высокоактивных долгоживущих радиоактивных отходов и повышении эффективности атомной энергетики в целом.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 153 страницы машинописного текста, включает 54 рисунка, 25 таблиц и список литературы из 132 наименований.

Диссертантом разработана оригинальная методика синтеза расплава $0{,}66LiF-0{,}34BeF_2$ с использованием таких исходных компонентов как металлический бериллий, фторид свинца и фторид лития. Основным преимуществом которой является возможность получить расплав, отвечающий качеству солевых систем для ЖСР без использования стадий дополнительной очистки с использованием агрессивных газообразных фторирующих агентов, что в будущем в значительной степени позволит упростить аппаратурное обеспечение необходимое для приготовления промышленных партий фторбериллатного расплава.

**Актуальность избранной темы и выполненной работы**

Расплавленные смеси на основе фторидов лития и бериллия рассматриваются в качестве перспективных сред для жидкосолевого ядерного

реактора (ЖСР), разработка и реализация которого в значительной степени зависит от достоверных сведений об устойчивости металлических конструкционных материалов ЖСР в этих расплавах. Кандидатами для работы в расплавах солей фторидов являются сплавы на основе никеля, содержащие Cr и Fe, среди которых следует выделить Inconel, INOR-8, Hastelloy N и ХН62М.

В связи с этим актуальность диссертационной работы Архипова Степана Павловича не вызывает сомнений, поскольку она посвящена вопросам синтеза и очистки расплавов 0,66LiF-0,34$BeF_2$ и 0,73LiF-0,27$BeF_2$. В работе подробно изучены процессы взаимодействия U, Cr, Fe и Ni с фторбериллатными расплавами. Получены достоверные данные о влиянии фторидов этих металлов на окислительно–восстановительный потенциал исследуемых систем, что позволят выделить оптимальные условия эксплуатации никелевых конструкционных материалов в среде топливной соли ЖСР.

**Обоснованность выбора методов исследования и достоверность получаемых результатов**

Представленная диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Для получения экспериментальных данных диссертантом были выбраны надежные электрохимических методы (измерение ЭДС, хронопотенциометрия, квадратно-волновая вольтамперометрия, измерение окислительно-восстановительного потенциала электролита, метод фиксации стационарных поляризационных кривых), а также современные физико-химические методы анализа состава и структуры материалов (масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, восстановительное плавление и рентгенофазовый анализ). Выбранные методики дополняют друг друга, позволяя проводить сравнительный анализ и оценивать сходимость результатов.

**Научная новизна полученных результатов, выводов, сформулированных в диссертации,** не вызывают сомнения.

Диссертантом впервые получены экспериментальные данные о температурных и концентрационных зависимостях равновесных потенциалов U, Cr, Fe и Ni в расплавах 0,66LiF-0,34$BeF_2$ и 0,73LiF-0,27$BeF_2$ по которым были определены условные-стандартные потенциалы соответствующих металлов для фторбериллатных солевых смесей. Эти данные обладают высокой теоретической и практической значимостью поскольку позволяют в значительной степени уточнить механизмы протекания коррозионных процессов в жидкосолевом ядерном реакторе и установить оптимальные диапазоны окислительно-восстановительных потенциалов фторбериллатных расплавов, при которых будет наблюдаться наибольшая устойчивость основных конструкционных материалов ЖСР в этих средах.

**Замечания и вопросы по содержанию работы**

1. В таблицах 1.3; 1.6, 1.7 и 1.9 приводятся результаты определения содержания макро- и микрокомпонентов синтезированных солевых плавов. По какой методике определяли содержание лития и бериллия? Аттестована ли эта методика и какова реальная погрешность определения содержания лития и бериллия? Соответствует ли число знаков после запятой величине погрешности определения?
2. Образование оксида бериллия по реакции (1.10) в количествах, обнаруживаемых методом РФА должно приводить к изменению соотношения Li/Be в соли и обогащению плава по фториду лития. Как учитывался этот факт при получении стехиометрического фторбериллата лития состава 66/34?
3. Вызывает сомнение указанный предел обнаружения примесного кислорода методом карботермического восстановления. Предел обнаружения кислорода в расплавах, содержащих дифторид бериллия по аттестованной методике составляет 100 ppm. Предел обнаружения в 5 ppm возможен лишь при испльзовании метода квадратно-волновой вольтамперометрии (для соли флинак).

4. В таблице 1.9 представлен целевой и примесный состав соли, прошедшей операцию электрохимической очистки. Однако отсутствует результат определения содержания примесного кислорода. Почему?
5. На Рис. 2.3, стр. 50 допущена неточность.Материал проволоки, погруженной в расплав соли обозначен как нитрид бора, вместо никеля.
6. В качестве главного недостатка никелевого капсулированного электрода сравнения, препятствующего его применение в условиях нейтронного облучения, указано использование нитрида бора в конструкции электрода. Вместе с тем, в динамическом бериллиевом торцевом электроде, который рекомендован в качестве электрода сравнения для для измерения ОВП в топливной соли ЖСР, также присутствует втулка из того же материала, в которую заключен металлический стержень. Прошу прокомментировать это противоречие.
7. В конструкцию электрохимической ячейки для измерения окислительно-восстановительно потенциала (ОВП) расплава (0,66LiF-0,34$BeF_2$)-$NiF_2$ (рисунок 4.3) включены три различных индикаторных электрода. Как выполняли измерения в этой ячейке: индикаторные электроды опускали в расплав одновременно или последовательно? И как это могло сказаться на результатах?
8. Автореферат, в целом полно отражает содержание диссертации, однако содержит досадную неточность. Так, остаточная концентрация кислорода в соли указана 0,0009 масс.% (стр.8), в то время как в тексте диссертации приводится значение 0,0249 масс.% (стр. 41).

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не влияют на общую высокую оценку представленной к защите работы.

Диссертация характеризуется внутренним единством и логикой. Автореферат полно отражает материал, представленный в диссертации.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени апробированы, доложены и обсуждены на 5 всероссийских и международных

конференциях. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах, включая 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых в базы данных Web of Sciences и Scopus. Получено 6 патентов РФ.

**Заключение**

Диссертация Архипова С.П. представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Поставленные цели и решенные задачи соответствуют заявленной научной специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии. *пункт 1 «Теоретические основы электрохимических и химических процессов»* в работе изучены электродные процессы на границах твердый электрод-солевой расплав и изменение равновесных потенциалов в зависимости от концентрации потенциалопределяющих ионов и температуры; *пункт 2. «Электрохимические методы защиты конструкционных материалов от коррозии»*: установлены интервалы окислительно-восстановительных потенциалов, при которых процессы коррозии никеля, железа и хрома в расплаве FLiBe, будут минимальны. *пункт 6. «Приборы и оборудование для исследований и реализации электрохимических и противокоррозионных технологий»:* разработан оригинальный капсулированный электрод сравнения для измерения равновесных потенциалов в фторидных расплавах.

Автором работы решена важная задача в области исследования коррозионных процессов: составлен экспериментальный ряд напряжений металлов во фторидных расплавах и определён интервал потенциалов, в котором коррозия основного конструкционного материала ЖСР будет минимальна.

Считаю, что диссертационная работа Архипова С.П. «Электрохимическое поведение урана, хрома, железа и никеля в расплаве $LiF\text{-}BeF_2$» соответствует критериям, установленным п. 9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного

Постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в актуальной редакции), а её автор, Архипов Степан Павлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии

**Официальный оппонент**

Главный научный сотрудник АО «ВНИИНМ»,
д.х.н.

А.В. Ананьев

Ананьев Алексей Владиленович

Контактная информация:
г. Москва, ул. Рогова, 5А
8(499)190-89-99, доб. 88-23
e-mail: allvlananyev@bochvar.ru

Подпись А.В.Ананьева заверяю
Первый заместитель генерального
директора - директор по развитию
к.т.н.

А.А. Перцев

30.12.2025