

## УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор ФГБОУВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и

дизайна» д.т.н., профессор  
П.В. Луканин

«23» августа 2026 г.



## О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию *Алферовой Дарьи Артемовны* на тему: «Характеристики неидеальности систем ди(2-этилгексил)фосфорная кислота – углеводородный растворитель в экстракции редкоземельных элементов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.4.4 – физическая химия

### 1. Актуальность темы диссертации

Жидкостная экстракция является основным промышленным методом выделения и разделения редкоземельных элементов (РЗЭ) на группы и индивидуальные металлы. Применение экстракционного метода извлечения РЗЭ из фосфатного сырья является особенно актуальным в условиях России, обладающей большими запасами апатит-нефелиновых руд, содержащих редкоземельные металлы. Выбор экстракционных систем, включающий необходимый экстрагент, представляет собой сложную теоретическую и технологическую задачу. Подбор составов систем и режимов процесса экстракции на их основе – это, как правило, чистый эксперимент, требующий большого количества затрат времени. В этой связи применение моделей для корреляции и предсказания термодинамических свойств систем (т.е. основы создаваемых процессов экстракции), содержащих РЗЭ, является актуальной задачей физической химии – химической термодинамики массообменных процессов.

### 2. Научная новизна диссертации

Газохроматографический метод анализа жидких систем использован для расчета коэффициентов активности компонентов смешанного растворителя в присутствии ди(2-этилгексил)фосфорной кислоты (Д2ЭГФК). Предложен метод выбора UNIFAC-модельных

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-400 от 03.09.26<sup>1</sup>  
АУ УС

подгрупп для определения энергетических параметров взаимодействия, который позволил получить минимальные отклонения расчетных значений коэффициентов активности (и активностей) от экспериментальных. Установлена зависимость произведения коэффициентов активности экстрагента и соответствующего комплекса эрбия от мольной доли комплекса эрбия, что доказывает квазиидеальность экстракционного процесса.

### **3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность научных положений, результатов и выводов исследования обеспечена применением надежных аналитических методов и стандартной измерительной аппаратуры, а также согласованностью полученных результатов и их сопоставлением со справочными и литературными источниками; теория основана на достоверных данных и соответствует современным представлениям в научной литературе по теме работы; идея базируется на критическом анализе отечественных и зарубежных литературных данных по тематике исследования; использованы общепринятые экспериментальные методы анализа, известные подходы и соответствующие решаемым задачам методы обработки и теоретического анализа экспериментальных результатов; установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами по близким аналогам в области физической химии растворов, использован широкий набор современных методик сбора и анализа исходной информации и стандартизованных методик, использующихся в физической химии и химии РЗЭ.

### **4. Научные результаты, их ценность**

К числу важных научных результатов работы можно отнести:

- определение коэффициентов активности н-гексана, бензола и толуола в бинарных смесях с Д2ЭГФК изопиестическим и газохроматографическим методами при 293,15 К;
- определение энергетических параметров межгруппового взаимодействия для модели UNIFAC, и введение структурной группы  $\text{Er}(\text{PO}_4)_3$ , для которой рассчитаны геометрические характеристики (с целью расчета коэффициентов активности);
- синтез и характеристика комплекса ди-(2-этилгексил)фосфата эрбия (III);
- впервые на основе термодинамического моделирования обнаружен фундаментальный эффект компенсации неидеальности в процессе экстракции РЗЭ.

Результаты работы расширяют фундаментальные представления в области физической химии экстракционных процессов и химической термодинамики многокомпонентных систем. Разработанный метод может быть использован для целенаправленного выбора и оптимизации состава органической фазы, что позволяет сократить эмпирическую составляющую при проектировании технологических схем и повысить эффективность процессов выделения и разделения РЗЭ.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных

работах, в том числе в 2 статьях – в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК), в 2 статьях – в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования (Scopus); получено 1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

## **5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации**

Теоретическая значимость результатов работы заключается в том, что метод определения термодинамических характеристик неидеальности систем позволяет установить влияние коэффициентов активности компонентов на эффективность экстракции редкоземельных элементов. На основе представлений о термодинамических особенностях бинарных и многокомпонентных систем экспериментально подтверждена и смоделирована возможность оптимизации состава органической фазы для извлечения РЗЭ из фосфорнокислых растворов. Практическая значимость результатов работы заключается в возможности их применения при создании и оптимизации процессов переработки апатитового сырья, прежде всего в металлургии РЗЭ. Указанные теоретическая и практическая значимость результатов работы имеют важное значение для развития физической химии систем и процессов.

## **6. Рекомендации по использованию результатов работы**

Результаты работы рекомендуются к применению при исследовании (моделировании, непосредственном создании и масштабировании) процессов экстракции РЗЭ в системе «смешанный углеводородный растворитель – Д2ЭГФК». Перспективность дальнейших исследований, предусматривающая расширение разработанной термодинамической модели на другие редкоземельные элементы и экстрагенты на основе диалкилфосфатов, а также её экспериментальная апробация не вызывает сомнений и возражений. С результатами работы следует ознакомить научные коллективы следующих организаций для продолжения исследований: Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского НЦ РАН, СПбГТИ (ТУ), Томский политехнический университет, РХТУ им. Д.И. Менделеева, ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН, а также производственные и научные организации горнорудного профиля ГК «Росатом», в которых целесообразно внедрить результаты работы – АО «Гиредмет» и ОАО «Соликамский магниевый завод».

## **7. Замечания и вопросы по работе**

1. Чем обусловлен выбор «модифицированной» модели UNIFAC, учитывая, что аналогичная «модифицированная» модель UNIQUAC успешно используется для описания фазовых равновесий? Почему автор не приводит сведений в обзоре литературы и не рассмотрел

возможность использования модели SAFT, а также электролитных версий моделей NRTL, UNIQUAC и UNIFAC (особенно для тройных систем, содержащих соль эрбия)?

2. Было ли определено содержание воды в использованных растворителях? Синтезированная соль эрбия использовалась после высушивания или содержала 5% адсорбированной воды (см. раздел 4.2.4)?

3. Достоинством работы можно считать доказательство существования Д2ЭГФК в изучаемых системах в виде димера, но с другой стороны, автор работы справедливо сообщает об опубликованных данных по составам растворов в других подобных неполярных растворителях, в которых Д2ЭГФК присутствует также в димерном состоянии. Гораздо важнее была бы информация о степени диссоциации (или о константе диссоциации) Д2ЭГФК в одном и/или смешанном растворителе, а также экспериментальные данные об электропроводности систем на основе соли эрбия.

4. Не обозначены параметры модели UNIFAC ( $A_{ij}$ ,  $a_{ij}$  или  $\Psi_{ij}$ ? Их размерность?), которые определил автор, например, на стр. 128. Цитата: «Полученные параметры составили:  $\text{Er}(\text{PO}_4)_3\text{--CH}_2 = -400$  и  $\text{CH}_2\text{--Er}(\text{PO}_4)_3 = 2560$ .»). Следовало бы привести полную матрицу (в виде таблицы!) энергетических параметров взаимодействия для всех рассматриваемых систем «Д2ЭГФК/соль эрбия – растворитель/смешанный растворитель». Несмотря на то, что абсолютно понятно количество UNIFAC-подгрупп для каждого из использованных растворителей и для Д2ЭГФК, следовало бы указать данную информацию в виде таблицы, т.к. это учитывается в расчетах коэффициентов активности.

5. Автором охарактеризован комплекс ди-(2-этилгексил)фосфата эрбия (III). Почему тогда в модельных расчетах использован «координационный фрагмент» в виде ортофосфата эрбия, учитывая успешное термодинамическое моделирование в системах на основе Д2ЭГФК?

6. Технические замечания: в литературном обзоре при рассмотрении моделей NRTL и UNIQUAC следовало бы указать первоисточники публикаций Ренона и Праусница (1968 г.), а также Абрамса и Праусница (1975 г.), соответственно. Рисунки хроматограмм (3.4 и 4.1) можно было не приводить в тексте диссертации; имеются немногочисленные опечатки (в т.ч. в автореферате).

## 8. Заключение по диссертации

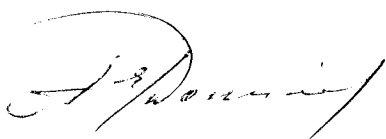
Диссертация «Характеристики неидеальности систем ди(2-этилгексил)фосфорная кислота – углеводородный растворитель в экстракции редкоземельных элементов», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.4.4 – физическая химия полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от

20.05.2021 № 953 адм, а ее автор **Алферова Дарья Артемовна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности физическая химия.

Отзыв на диссертацию и автореферат диссертации **Алферова Дарья Артемовна** обсужден и утвержден на заседании кафедры Материаловедения и технологии машиностроения **Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»**, протокол №11 от 24 августа 2026 года.

Председатель заседания

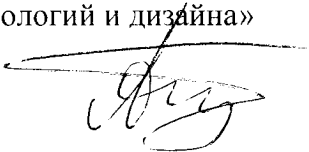
Заведующий кафедрой Материаловедения и технологии машиностроения Высшей школы технологии и энергетики ФГБОУВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», к.х.н. (специальность 02.00.04 – физическая химия), доцент



**Евдокимов Андрей Николаевич**

Секретарь заседания

Старший преподаватель кафедры Материаловедения и технологии машиностроения Высшей школы технологии и энергетики ФГБОУВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»



**Таразанов Алексей Александрович**

Подписи Евдокимова Андрея Николаевича и Таразанова Алексея Александровича заверяю.

Начальник УК ВШТЭ СПбГУПТД

М.П.

ПРАВЛЕНИЕ  
КАДРОВ



Т.Р. Шишигина

**Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Почтовый адрес: 191186, г. Санкт-Петербург, улица Большая Морская, дом 18.

Официальный сайт в сети Интернет: [www.sutd.ru](http://www.sutd.ru)

эл. почта: [rector@sutd.ru](mailto:rector@sutd.ru)

телефон: (812)3157525