

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛУПРОТИВОТОЧНОГО ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ЛЮТЕЦИЯ И ИТТЕРБИЯ И ЕЕ ВЕРИФИКАЦИЯ НА МОДЕЛЬНЫХ РАСТВОРАХ

© 2023 г. Е. В. Амбул^{а, б}, Н. Д. Голецкий^{а, б, *}, А. А. Наумов^{а, б},
Е. А. Пузиков^а, М. В. Мамчич^а, А. В. Бизин^а, А. И. Медведева^а

^а Радиевый институт им. В.Г. Хлопина,
194021, Санкт-Петербург, 2-й Мушинский пр., д. 28

^б Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26

*e-mail: goletsky@khlopin.ru

Поступила в редакцию 20.12.2022, после доработки 28.02.2023, принята к публикации 06.03.2023

Разработана математическая модель экстракционного разделения лютеция и иттербия. С использованием экстракционной системы на основе моно-2-этилгексилового эфира 2-этилгексилфосфоновой кислоты в Isopar M проведены оптимизационные расчеты двух экстракционных схем отделения лютеция от иттербия с подвижной легкой (экстракционная смесь) и тяжелой (азотная кислота) фазой. Выбрана схема с подвижной легкой фазой, позволяющая сконцентрировать лютеций в 3–5 раз на стадии ре-экстракции и сократить конечный объем выделенной фракции лютеция. Предложена схема отделения лютеция от иттербия экстракционной системой 10 % P507 в Isopar M–2 моль/л HNO₃ на центробежных экстракторах МЦЭ-45-12П, оснащенных полупротивоточными (67 шт.) и противоточными (5 шт.) экстракционными ступенями. Проведена верификация математической модели с помощью динамических испытаний схемы полупротивоточно-противоточной экстракции на модельных растворах с имитацией миллиграммовой (500 мг Yb) и декаграммовой (20 г Yb) облученной иттербиевой мишени. На динамических испытаниях с мишенью массой 500 мг показана возможность отделения лютеция от иттербия с очисткой от Yb в 25 раз за 5 ч. При этом математическая модель продемонстрировала высокую сходимость выходящих хроматограмм с динамическими испытаниями. В ходе динамических испытаний на иттербиевой мишени массой 20 г подтверждена возможность очистки лютеция от иттербия не менее чем в 20 раз за 18.5 ч работы с выходом по ¹⁷⁷Lu (с учетом распада) до 82%. При этом математическая модель дает худший прогноз по разделению, чем в случае динамических испытаний. Для корректировки модели требуется исследовать влияние высоких концентраций иттербия на экстракцию лютеция и уточнить математическое описание распределения компонентов в области высоких насыщений экстракта металлами.

Ключевые слова: лютеций, иттербий, разделение, полупротивоточная экстракция, моно-2-этилгексильный эфир 2-этилгексилфосфоновой кислоты, Isopar M, азотная кислота.

DOI: 10.31857/S0033831123030036, **EDN:** ENONWU

ВВЕДЕНИЕ

¹⁷⁷Lu является одним из наиболее перспективных и эффективных радионуклидов лечебного и

¹По материалам доклада на X Российской конференции с международным участием «Радиохимия-2022» (Санкт-Петербург, 26–30 сентября 2022 г.)

тераностического назначения [1]. Для получения лютеция-177 высокой удельной активности проводят облучение стартового материала, обогащенного ¹⁷⁶Yb, в ядерном реакторе. Дальнейшее разделение иттербия и лютеция осуществляют одним из способов: хроматографией [2], жидкостной экстракцией [3] или вакуумной сублимацией [4].

Таблица 1. Значения параметров уравнения (2)

Параметр	Isopar M	
	Yb	Lu
$\lg K^0$	-1.93	-2.01
a	0.630	0.627

В качестве экстракционной смеси для полупротивоточной экстракции предлагается использовать фосфорорганические соединения, которые показали свою эффективность в металлургии лантанидов «тяжелой» подгруппы [5, 6]. Финальную очистку Lu до требований Европейской фармакопеи осуществляют ионообменной хроматографией [7]: $\text{Fe} \leq 0.25$, $\text{Cu} \leq 0.5$, $\text{Zn} \leq 0.25$, $\text{Pb} \leq 0.5$, $\text{Yb} \leq 0.1$ мкг/ГБк.

Ранее были проведены лабораторные исследования распределения лютеция и иттербия при их экстракции растворами моно-2-этилгексилового эфира 2-этилгексилфосфоновой кислоты (P507) в Isopar M и *m*-нитробензотрифториде (Ф3) из азотнокислых сред [8], которые показали, что факторы разделения пары Lu/Yb составляют 1.4–1.6. Также было проведено математическое описание экстракции и были рассчитаны значения концентрационных констант равновесия (1) и параметры влияния разбавителя (a , уравнение (2)) (табл. 1):

$$\text{Ln}^{3+}_{(в)} + n\text{NO}_3^-_{(в)} + m(\text{HA})_{2(о)} = [\text{Ln}(\text{NO}_3)_n\text{A}_{3-n}(\text{HA})_{(2m+n-3)}]_{(о)} + (3-n)\text{H}^+_{(в)}, \quad (1)$$

где Ln^{3+} – катион РЗЭ, а HA – молекула фосфорорганической кислоты;

$$\lg K = \lg K^0 + a \lg C_{\text{HA}}, \quad (2)$$

где $\lg K^0$ – константа равновесия при концентрации экстрагента, равной 1, C_{HA} – общая концентрация экстрагента.

Данная статья посвящена созданию математической модели полупротивоточного экстракционного разделения лютеция и иттербия, ее верификации с помощью проведения динамических экспериментов по переработке мишеней разной массы, а также выбору оптимальных условий разделения лютеция и иттербия на основе проведенных расчетов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для составления математической модели использовали массив экспериментальных данных, полученных в ходе экстракционного разделения

Lu/Yb в системе P507–Isopar M (легкий углеводородный разбавитель)–азотная кислота [8]. Значения коэффициентов распределения иттербия и лютеция рассчитывали на основе сложившихся представлений [9] об экстракции редкоземельных элементов катионообменными экстрагентами по реакции (1). При этом влияние разбавителя на константу данного равновесия учитывали с помощью параметра a по эмпирическому уравнению (2). Значения констант равновесия K^0 и параметров a определены методом наименьших квадратов на основе экспериментальных данных об экстракции редкоземельных металлов экстрагентом P507 и приведены в работе [8].

В основе модели ступенчатого полупротивоточного режима экстракционного разделения компонентов лежит уравнение нестационарного материального баланса. Для i -й ступени каскада с подвижной водной фазой для любого экстрагируемого компонента оно может быть записано в виде:

$$\frac{dx_i}{dt} \omega_b + \frac{dY_i}{dt} \omega_o = L(X_{i-1} - X_i), \quad (3)$$

где X_i – концентрация компонента в водной фазе в ступени i , Y_i – концентрация компонента в органической фазе, ω_b – объем водной фазы, ω_o – объем органической фазы, L – поток водной фазы.

В начальный момент времени принимается допущение, что каскад заполнен чистой жидкостью, не содержащей компонентов. После начала пропускания раствора экстрагируемые компоненты начинают переходить в органическую фазу вплоть до ее насыщения. При этом движущей силой процесса массопереноса является разность между текущей (Y_i) и равновесной (Y_i^*) концентрациями компонентов в органической фазе. Расчет равновесных концентраций компонентов в органической фазе проводили по уравнениям (1) и (2). Интегрируя уравнение (3) методом Рунге–Кутты 4-го порядка, получали распределение компонентов по ступеням каскада. Метод Рунге–Кутты является наиболее распространенным методом численного решения дифференциальных уравнений, в котором искомая функция аппроксимируется рядом Тейлора с 4 членами.

Описанный алгоритм расчета был реализован в виде программного обеспечения, созданного с по-

мощью среды быстрой разработки Delphi 2010. Интерфейс программы [10] представлен на рис. 1.

Расчеты по динамической математической модели проводили для двух принципиальных технологических схем разделения лютеция и иттербия с подвижной тяжелой (водной) фазой (рис. 2) и с подвижной легкой (органической) фазой с последующей последовательной рекстракцией лютеция и иттербия из органической фазы (рис. 3). Оптимизацию схем проводили по числу экстракционных ступеней, по качеству и минимальной длительности разделения за счет варьирования концентрации азотной кислоты и концентрации экстрагента. Принципиальные технологические схемы опытной установки были разработаны для реализации процесса разделения Yb и Lu с подвижными тяжелой и легкой фазами.

Параметры, варьируемые в процессе расчетов: концентрация HNO_3 , концентрация Yb в исходном растворе, число ступеней, заполненных исходным раствором, общее число ступеней, концентрация экстрагента, выбор подвижной фазы. Параметры, которые оставались неизменными: объемы органической и водной фаз в экстракционной ступени и расход подвижной фазы.

Массу иттербиевой мишени задавали исходя из заданного значения концентрации Yb и объема раствора иттербия, т.е. объема заполняемых исходным раствором ступеней.

Верификацию математической модели проводили путем проведения динамических испыта-

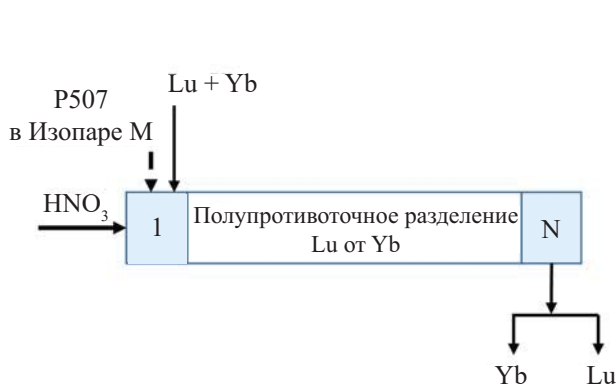


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема полупротивоточного экстракционного разделения лютеция и иттербия с подвижной тяжелой фазой.

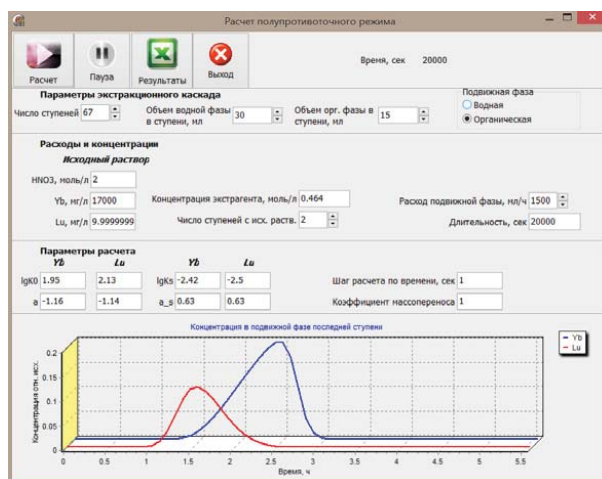


Рис. 1. Интерфейс программы для расчета полупротивоточного режима.

ний на автоматизированном стенде центробежных экстракторов (экстрактора модели МЦЭ-45-12П разработаны НПО «ТехПроГрупп»), оснащенных полупротивоточными и противоточными экстракционными ступенями, а также двухконтурной системой охлаждения экстракторов, перистальтического восьмиканального насоса Heidolph серии HeiFLOW и весовыми дозаторами реагентов производства ООО «Сенсор». Рабочая температура экстракторов составляла не более 30°C. Полупротивоточные экстракционные ступени имели конструкцию двух типов с подвижными легкой и тяжелой фазами с общим рабочим объемом 45 мл (объем легкой фазы 15, тяжелой фазы – 30 мл) [11]. Максималь-

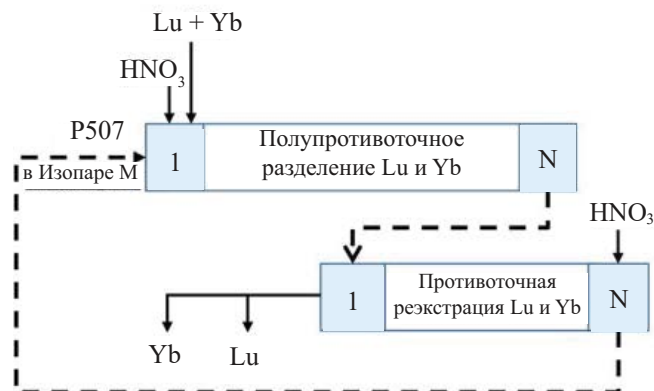


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема полупротивоточного экстракционного разделения лютеция и иттербия с подвижной легкой фазой с последующей противоточной рекстракцией.

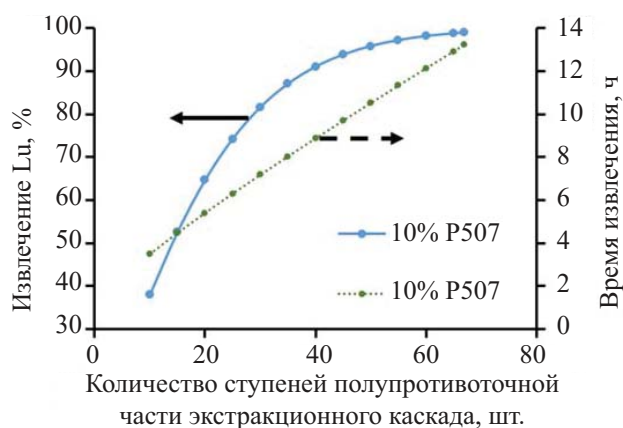


Рис. 4. Расчетные зависимости выхода и времени извлечения Lu от количества ступеней при условии выхода Yb с резэкстрактом Lu 5 мас% (степень извлечения лютеция – сплошные, продолжительность опыта – пунктирные линии). Расход подвижной легкой фазы 1500 мл/ч, промывной раствор (неподвижная фаза) 2 моль/л HNO_3 , масса мишени 500 мг Yb и 0.3 мг Lu.

ная производительность экстрактора МЦЭ-45-12П по подвижной фазе – 2 л/ч. В ступенях достигается полное смешение с образованием эмульсии в камере смешения с отдельным выведением подвижной фазы с взаимным уносом фаз менее 0.05%. Конструкция противоточных ступеней не отличалась от стандартного МЦЭ-30-12 [12].

В работе использовали оксиды иттербия и лютеция марки х.ч., азотную кислоту марки ос.ч., P507 производства фирмы Luoyang Zhongda Chemical Co. с чистотой не менее 99%, Isopar M производства Exxon Mobil химической чистоты 99%. Содержание металлов в пробах определяли с помощью спектрального анализа методом ICP AES на приборе Varian 725. Активность меточных изотопов ^{177}Lu и ^{176}Yb определяли по γ -спектрам с использованием спектрометра фирмы Canberra.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Математическое моделирование

Были проведены расчеты зависимости влияния количества ступеней на выход и время извлечения Lu (рис. 4). Установлено, что при увеличении коли-

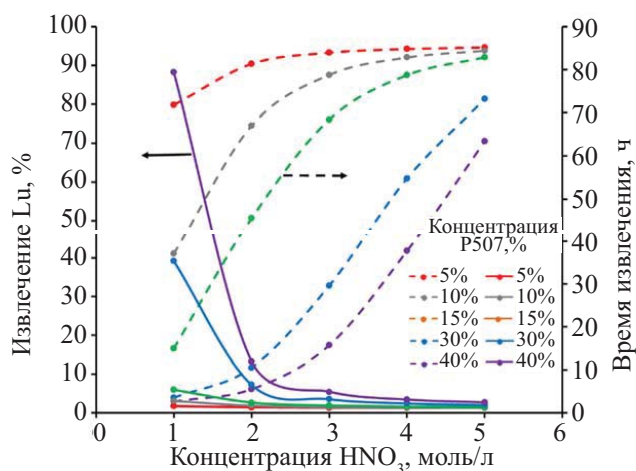


Рис. 5. Влияние концентраций азотной кислоты и экстрагента, находящегося в неподвижной фазе, на выход и время извлечения Lu при условии выхода Yb с резэкстрактом Lu 5 мас% (степень извлечения лютеция – сплошные, продолжительность опыта – пунктирные линии). Число ступеней 67, расход подвижной фазы 1500 мл/ч, масса мишени 500 мг).

чества ступеней каскада до 67 достигается извлечение ~99% Lu.

Для обоснования выбора варианта схемы с подвижной тяжелой или легкой фазами (рис. 2 и 3 соответственно) были проведены сравнительные расчеты влияния концентрации азотной кислоты на степень извлечения и длительность отделения Lu от Yb с проскоком во фракцию Lu 5% Yb (рис. 5 и 6 соответственно).

В схеме с подвижной тяжелой фазой (рис. 2) в качестве подвижной фазы используется азотная кислота, а неподвижной – P507 в Isopar M. Такой вариант схемы является аналогом хроматографического разделения с использованием ТВЭКСа LN2 на основе экстрагента P507 [13]. При этом с хроматографической колонки вымывается азотной кислотой сначала Yb, а затем Lu. По математической модели рассчитаны влияние азотной кислоты на степень извлечения Lu с выходом 5 мас% Yb в данную фракцию и длительность такого разделения (рис. 5).

Установлено, что для обеспечения извлечения 80% Lu необходимо повышать до 40% концентрацию P507. Однако увеличение концентрации приводит к загрязнению получаемой конечной фракции

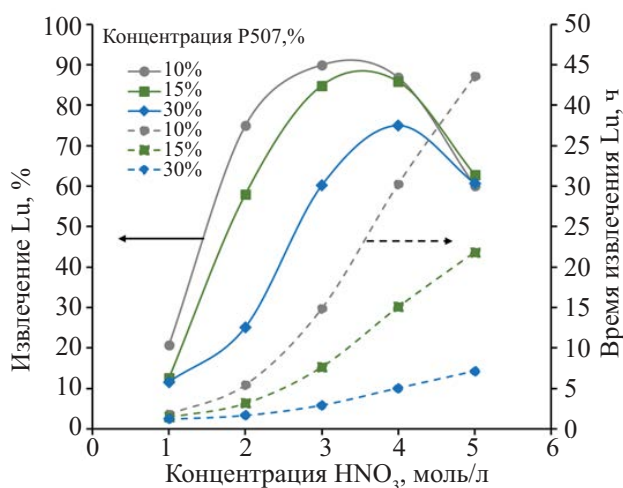


Рис. 6. Влияние концентраций азотной кислоты и экстрагента, находящегося в подвижной фазе, на выход и время извлечения Lu при условии выхода Yb с реэкстрактом Lu 5 мас% (степень извлечения лютеция – сплошные, продолжительность опыта – пунктирные линии). Число ступеней 67, расход подвижной фазы 1500 мл/ч, масса мишени 500 мг.

Lu продуктами деструкции экстрагента, что создаст определенные сложности при финальной хроматографической очистке препарата Lu, поэтому использование данной схемы нецелесообразно.

В схеме с подвижной легкой фазой (рис. 3) в качестве подвижной фазы использовали P507 в Isopar M, а неподвижной – азотную кислоту. По математической модели рассчитаны влияние азотной кислоты на степень извлечения Lu с выходом Yb в данную фракцию 5 мас% и длительность такого разделения (рис. 6).

Установлено, что в диапазоне от 2 до 4 моль/л HNO₃ можно наблюдать максимум извлечения лютеция. Наиболее эффективное отделение лютеция от иттербия наблюдается (рис. 6) с использованием экстракционной системы 10% P507 в Isopar M–3 моль/л HNO₃ с выделением фракции 90% Lu и 5% Yb за 15 ч. С учетом радиоактивного распада ¹⁷⁷Lu ($T_{1/2} = 6.7$ сут) схожие показатели по разделению 80% Lu и 5% Yb могут быть достигнуты за 5 ч при использовании в качестве промывного раствора 2 моль/л HNO₃.

Для изучения влияния массы облученной мишени на процесс разделения Lu от Yb были проведены соответствующие расчеты с учетом влияния концентрации экстрагента, находящегося в подвижной фазе, на выход и время извлечения Lu при условии

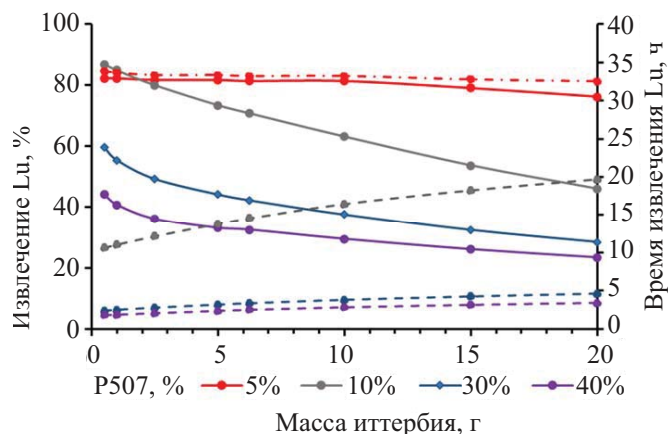


Рис. 7. Влияние массы иттербия и концентрации экстрагента, находящегося в подвижной фазе, на выход и время извлечения Lu при условии выхода Yb с реэкстрактом Lu 5 мас% (степень извлечения лютеция – сплошные, время разделения – пунктирные линии). Число ступеней 67, расход подвижной фазы 1500 мл/ч, неподвижная фаза 2 моль/л HNO₃.

выхода Yb с реэкстрактом Lu 5 мас% (рис. 7). Установлено, что увеличение массы мишени негативно сказывается на извлечении Lu. Для экстракционной смеси 10% P507 в Isopar M время для разделения меняется с 10 до 20 ч при росте массы иттербия с 0.5 до 20 г. Для отделения Lu от Yb наиболее подходящей является схема с подвижной легкой (органической) фазой (рис. 3).

Для верификации математической модели были проведены динамические испытания на модельных растворах схемы полупротивоточно-противоточно-го экстракционного разделения лютеция и иттербия с подвижной легкой фазой (рис. 3). Такая схема позволяет сконцентрировать Lu и Yb в растворе азотной кислоты от 3 до 5 раз на стадии реэкстракции из подвижной органической фазы. В качестве экстракционной системы выбрана 10% P507 в Isopar M–2 моль/л HNO₃. Имитировали миллиграммовую (500 мг Yb) и декаграммовую (20 г Yb) облученную иттербиевую мишень.

*Проведение динамических испытаний
на модельных растворах и сопоставление
их результатов с расчетами
по математической модели*

Внешний вид испытательного стенда с использованием стабильных лютеция и иттербия пред-

ставлен на рис. 8. При работе с метками ^{177}Lu и ^{175}Yb центробежные экстракторы были размещены в защитном пространстве.

*Проведение динамических испытаний
на малонасыщенной системе*

Для динамических испытаний с имитацией миллиграммовой облученной иттербиевой мишени расход подвижной фазы составлял 1500 мл/ч (10% P507 в Isopar M), расход реэкстрагента – 350 мл/л (5 моль/л HNO_3). На первом этапе эксперимента в качестве исходного раствора использовали ~30 мл раствора 200 мг/л Lu (5.8 мг Lu) в 2 моль/л HNO_3 . На втором этапе использовали ~30 мл раствора с концентрацией 17.2 г/л Yb (500 мг Yb). Продолжительность первого этапа испытаний с использованием только лютеция составила 9, второго этапа – 10 ч. Выходные кривые Lu и Yb из каскада (хроматограммы) представлены на рис. 9. Условия отделения лютеция от иттербия в зависимости от времени определяли путем наложения выходных концентрационных кривых лютеция и иттербия при допущении сохранения коэффициентов разделения лютеция и иттербия в смеси. Результаты обработки данных хроматограмм лютеция и иттербия представлены в табл. 2.

*Проведение динамических испытаний
на насыщенной системе*

Для динамических испытаний с имитацией декаграммовой облученной иттербиевой мишени с общим содержанием 20 г иттербия использовали



Рис. 8. Внешний вид испытательного стенда.

стабильный иттербий и метки 32.5 МБк ^{175}Yb и 1.4 ГБк ^{177}Lu . Метки ^{177}Lu и ^{175}Yb получали путем облучения 500 мг ^{176}Yb с обогащением 99.59% производства комбината «Электрохимприбор» на исследовательском реакторе ИВВ-2М Института реакторных материалов в нейтронном потоке $2.7 \times 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в течение 140 ч. Расход подвижной фазы составлял 1335 мл/ч, реэкстрагента – 220 мл/л. Также были использованы метки ^{177}Lu и ^{175}Yb для аналитического контроля. На рис. 10 представлена зависимость концентрации компонентов от времени выхода из каскада Lu и Yb.

Экспериментально полученные показатели процесса выделения лютеция с 0.5 и 20 г иттербия представлены в таблице 2.

Расхождение между экспериментальным и расчетным выходом лютеция из экстракционного каскада может быть обосновано его экстракцией его из смешанного раствора, содержащего Lu и Yb [14]. При этом показатели по разделению Lu и Yb оказались лучше, чем прогнозировала математическая модель. Математическая модель предска-

Таблица 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по разделению лютеция и иттербия

Мишень Yb, г	Yb, г/л	Время, ч	Выход Lu, %		Выход Yb, %		Выход Yb, мг	
			расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
0.5	17.2	6.5	95.0	92.4	3.8	3.9	18.7	19.4
		7.0	97.0	92.8	9.6	8.8	43.5	44.1
		7.5	98.3	93.0	19.6	18.6	98.0	90.6
		8.0	99.2	93.2	33.9	32.6	170.0	163.0
20	98	15	0.7	60	0	0.6	0.0	120.3
		17.1	3.1	78.2	0.01	2.8	2.0	564.8
		18.1	4.5	81.3	0.06	4.1	12.0	820.3
		18.7	5.1	92.5	0.11	4.9	22.0	977.7

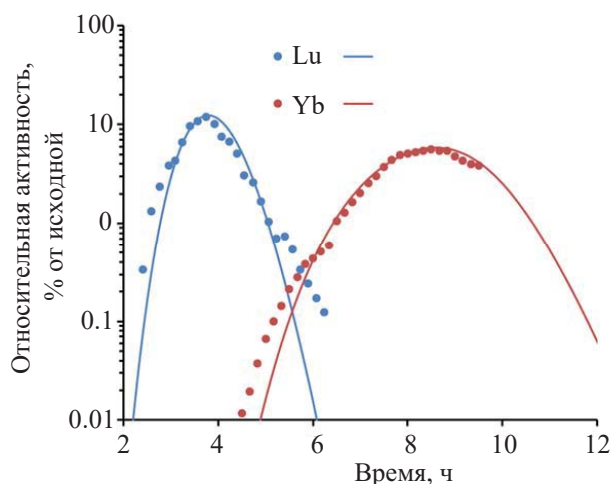


Рис. 9. Зависимость относительной массы Lu и Yb от времени на выходе из каскада (хроматограммы) (точки – эксперимент, линии – расчет по модели). Число ступеней на разделение 55, масса иттербия 500 мг, неподвижная фаза 2 моль/л HNO_3 .

зывала выход только около 50% Lu за 20 ч при условии выхода Yb с реэкстрактом Lu 5 мас%, тогда как в эксперименте этот показатель составил 92% за 18.2 ч. Для уточнения математической модели требуется ее корректировка с учетом повышения коэффициентов распределения лютеция в области высокого насыщения экстракта иттербием, однако уже полученной точности модели достаточно для выявления оптимальных условий для получения удовлетворительных показателей разделения Lu и Yb по результатам испытаний.

Анализ результатов динамических испытаний с использованием с 500 мг иттербия (табл. 2) показывает, что выход 92.4% Lu с содержанием около 4% Yb достигается за 6.5 ч при объеме целевого продукта до 1.5 л. Двукратное нарастание иттербия происходит за 30 мин, что ухудшает показатели качества фракции лютеция и требует применения хроматографических колонок большего объема на последующих циклах очистки. Для организации промышленного процесса разделения лютеция от иттербия требуется использование проточного гамма-спектрометра и автоматизация процесса дозирования всех продуктов.

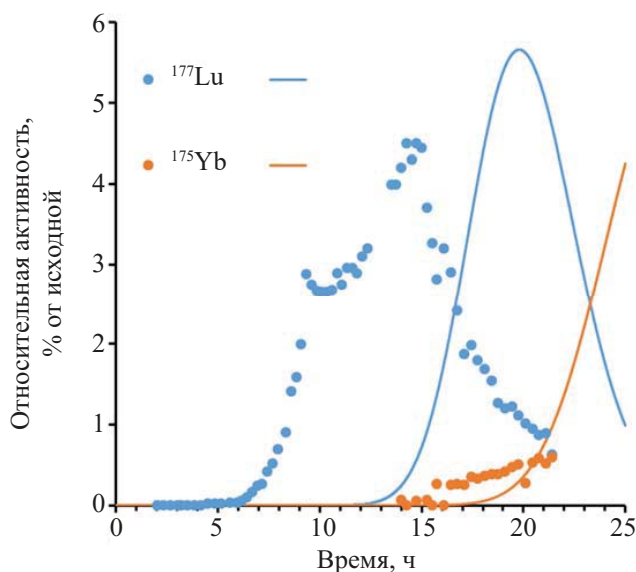


Рис. 10. Зависимость относительной массы Lu и Yb от времени на выходе из каскада (хроматограммы) (точки – эксперимент, линии – расчет по модели). Число ступеней 67, масса мишени 20 г, неподвижная фаза 2 моль/л HNO_3 .

В случае динамических испытаний на 20 г иттербиевой мишени показатель выхода лютеция составляет 92.5% с проскоком до 4.9% Yb за 18.7 ч при объеме целевого продукта 2.2 л. С учетом радиоактивного распада ^{177}Lu этот показатель будет несколько ниже и будет составлять 85.3%. При этом концентрация иттербия нарастает более плавно и управлять процессом разделения становится проще.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано программное обеспечение, позволяющее оценить влияние параметров процесса (состава фаз, соотношения потоков и числа ступеней) на полупротивоточное экстракционное разделение лютеция и иттербия. Продемонстрировано совпадение расчетных и экспериментальных данных в пределах 10% по времени извлечения и концентрациям компонентов в реэкстрактах лютеция и иттербия для малонасыщенных систем.

Для более концентрированных растворов необходимо дополнительно исследовать влияние высоких концентраций иттербия на экстракцию лютеция и уточнить математическое описание распределения компонентов в данной области.

Предложена схема разделения лютеция от иттербия экстракционной системой 10% P507 в Isopar M (подвижная фаза)–2 моль/л HNO_3 (неподвижная фаза) на центробежных экстракторах МЦЭ-45-12П, оснащенных полупротивоточными и противоточными экстракционными ступенями.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность за разработку полупротивоточных центробежных экстракторов А.В. Чиркову (ООО «НПО «ТехПро-Групп»).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuznetsov R.A., Bobrovskaya K.S., Svetukhina V.V., Fomina A.N., Zhukova A.V. // *Radiochemistry*. 2019. Vol. 61, N 4. P. 381–395.
2. Horwitz E.P., McAlister D.R., Bond A.H., Barrans R.E., Williamson J.M. // *Appl. Radiat. Isot.* 2005. Vol. 63, N 1. P. 23–36.
3. Голецкий Н.Д., Шишкин Д.Н., Петрова Н.К. и др. Пат. РФ № 2773142. Опубл. 31.05.2022.
4. Brunetti B., Piacente V., Scardala P. // *J. Chem. Eng. Data*. 2005. Vol. 50. № 4. P. 1801–1813.
5. Radhika S., Nagaphani Kumar B., Lakshmi Kantam M., Ramachandra Reddy B. // *Sep. Purif. Technol.* 2010. Vol. 75, N 3. P. 295–302.
6. Корпусов Г.В., Кузнецов Г.И., Патрушева Е.Н., Попков Г.П., Яковлева Г.Я. // *Радиохимия*. 1974. Т. 15, N 5. С. 695–701.
7. *European Pharmacopoeia*. Strasbourg: Council of Europe, 2017. 8th ed. Vol. 1.
8. Амбул Е.В., Голецкий Н.Д., Медведева А.И., Наумов А.А., Пузиков Е.А., Афонин М.А., Шишкин Д.Н. // *Радиохимия*. 2022. Т. 64, № 3. С. 1–8.
9. Яцимирский К.Б., Костромина Н.А., Шека З.А., Давиденко Н. К., Крисс Е.Е., Ермоленко В.И. *Химия комплексных соединений редкоземельных элементов* // Киев: Наук. думка, 1966. 494 с.
10. Голецкий Н.Д., Пузиков Е.А., Наумов А.А., Амбул Е.В., Кудинов А.С., Металиди М.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2023613898. 2023.
11. Амбул Е.В., Голецкий Н.Д., Медведева А.И., Наумов А.А., Пузиков Е.А., Чирков А.В. // IX междунар. научно-практическая конф. молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА». IX Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА-2021», СПб: СИНЭЛ, 2021. С. 274
12. Кузнецов Г.И., Пушков А.А., Косоголов А.В. *Центробежные экстракторы* Центрэк. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2000. 214 с.
13. McAlister D.R., Horwitz P.E. // *Solvent Extr. Ion Exch.* 2007. Vol. 25, N 6. P. 757–769.
14. Игумнов С.Н., Вальков А.В. // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2: Химия*. 2017. Т. 58, № 3. С. 120–125.