

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.039.34

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ
СОЗДАНИЯ ИЗОТОПНОГО ГЕНЕРАТОРА $^{103}\text{Ru}/^{103\text{m}}\text{Rh}$

©2025 г. В. А. Загрядский^а, К. О. Королев^а, Я. М. Кравец^а,
А. В. Курочкин^а, А. Н. Стрепетов^а, Т. А. Удалова^{а,*}

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

*e-mail: udalova_ta@nrcki.ru

Поступила в редакцию 27.11.2024 г.

После доработки 11.02.2025 г.

Принята к публикации 25.02.2025 г.

Для разработки изотопного генератора $^{103}\text{Ru}/^{103\text{m}}\text{Rh}$ проводилось реакторное получение и идентификации радиоизотопа ^{103}Ru . Отработаны методики синтеза и дистилляции высоколетучего RuO_4 из металлического рутения и из растворов, продемонстрирован эффект очистки RuO_4 от сопутствующих радионуклидных примесей при дистилляции. Впервые продемонстрирована возможность разделения рутения и целевого радиоизотопа $^{103\text{m}}\text{Rh}$ методом термической отгонки RuO_4 .

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время и в нашей стране, и за рубежом большое внимание уделяется разработкам и внедрению таргетных терапевтических препаратов, основанных на использовании оже-эмиттеров и конверсионных электронов в качестве терапевтических агентов, позволяющих уничтожать раковые клетки, минимизируя побочные радиологические эффекты. Оже-эмиттеры и конверсионные электроны имеют малый пробег и высокую удельную линейную потерю энергии, они способны повреждать раковые клетки в пределах нескольких десятков микрон, но не оказывают цитотоксического действия на больших расстояниях, не повреждая здоровые клетки и ткани. Радиоизотоп $^{103\text{m}}\text{Rh}$ по праву относится к наиболее эффективным, безопасным и удобным для практического применения оже-

эмиттерам и конверсионных электронов [1–3]. У него наименьшее отношение числа γ -квантов к числу электронов, и он может быть получен генераторным способом. Предшественниками ^{103m}Rh ($T_{1/2} = 56.1$ мин) в генераторе могут быть ^{103}Ru ($T_{1/2} = 39.25$ сут.) или ^{103}Pd ($T_{1/2} = 16.99$ сут.). Использование в качестве предшественника ^{103}Ru более предпочтительно в связи с большим периодом полураспада и возможностью в качестве стартового материала при его наработке по реакции $^{102}\text{Ru}(n, \gamma)^{103}\text{Ru}$ использовать природный рутений, в котором содержание изотопа ^{102}Ru составляет 31.6%, в то время как при наработке ^{103}Pd по реакции $^{102}\text{Pd}(n, \gamma)^{103}\text{Pd}$ необходимо использовать высокообогащенный изотоп ^{102}Pd , содержание которого в природной смеси изотопов не превышает 1%. Рисунок 1 иллюстрирует цепочку генераторного получения и последующего распада радиоизотопа ^{103m}Rh с предшественником ^{103}Ru .

Рис. 1. Схема наработки и изомерного перехода целевого радиоизотопа ^{103m}Rh

Учитывая изложенное выше, задача создания изотопного генератора $^{103}\text{Ru}/^{103m}\text{Rh}$ представляется весьма актуальной. В настоящей статье описана техника реакторного получения и идентификации радиоизотопа ^{103}Ru , отработаны методики синтеза и дистилляции высоколетучего RuO_4 из металлического рутения и из растворов, продемонстрирован эффект очистки RuO_4 от сопутствующих радионуклидных примесей при дистилляции. Продемонстрирована возможность разделения рутения и целевого радиоизотопа ^{103m}Rh методом термической отгонки RuO_4 .

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Получение радиоизотопа ^{103}Ru и идентификация ^{103}Ru и ^{103m}Rh

Для получения радиоактивного ^{103}Ru порошок губчатого металлического рутения массой 46 мг природного состава облучался в течение суток потоком тепловых нейтронов с мощностью порядка 5 МВт в горизонтальном экспериментальном канале реактора ИР-8 НИЦ “Курчатовский институт”. Гамма- и рентгеновские спектры облученного образца были получены с помощью соответствующих спектрометров: гамма-спектрометра ORTEC GEM 35P4 и рентгеновского спектрометра фирмы ORTEC GLP 25325/10 (США) с детекторами из сверхчистого германия. Активность ^{103}Ru определялась по измерениям наиболее интенсивной гамма-линии ^{103}Ru с энергией $E_\gamma=497$ кэВ на γ -детекторе ORTEC. Фрагменты инструментальных гамма-спектров облученного образца рутения через четыре месяца после облучения и синтезированного из него RuO_4 представлены на рис. 2.

Рис. 2. Фрагменты аппаратурных гамма-спектров ^{103}Ru ...

После осуществления конверсии облученного Ru в сконденсированный кристаллический RuO₄ линии примесного ¹⁹²Ir в гамма-спектре не наблюдались.

Поскольку целевой изотоп ^{103m}Rh не имеет линий в гамма-диапазоне, измерение его активности проводилось с помощью X-гау спектрометра ORTEC в области энергий 20.15 кэВ, где рентгеновские линии ¹⁰³Ru и ^{103m}Rh перекрываются. При установившемся в системе равновесии вклады от ¹⁰³Ru и ^{103m}Rh в перекрывающийся пик полного поглощения в области энергий 20 кэВ определялись по измеренному суммарному пику в долях пропорционально их квантовым выходам. Квантовые выходы ¹⁰³Ru и ^{103m}Rh в области энергий 20 кэВ составляют 7.22% и 6.27% соответственно [4].

2.2. Синтез RuO₄ из металлического Ru

Методику конверсии металлического Ru в RuO₄ разрабатывали на необлученных промышленных образцах губчатого рутения.

Ожидаемые преимущества разрабатываемого генератора состоят в простоте эксплуатации, большом сроке работы без дозаправки и автоматической очистке рутения от радионуклидных примесей, которые нарабатываются при облучении, но не переходят в газовую фазу при конверсии Ru в RuO₄.

Оксид рутения RuO₄(VIII) – неорганическое соединение в виде желто-оранжевых кристаллов, умеренно растворимых в воде и образующих гидраты [5]. По измерениям зависимости $P(T)$ четырехоксида рутения [6] давление насыщенного пара составляет 8.6 мм рт. ст. при температуре 22°C. Разложение RuO₄ происходит при контакте с влагой при повышенных температурах и под воздействием света.

В работах [7, 8] наиболее совершенным методом синтеза RuO₄ названа отгонка четырехоксида рутения из серноокислой среды с периодатом калия KIO₄ в качестве окислителя.

Обобщенно эта реакция представляется уравнением



Однако с заметным выходом она может быть осуществлена только в несколько стадий, включающих предварительное окисление Ru в растворе щелочи до RuO₄²⁻ и последующую дистилляцию RuO₄ из раствора выдуванием его нейтральным газом.

2.2.1. Конверсия металлического Ru в растворимую соль K₂RuO₄. Первым этапом превращения металлического Ru в RuO₄ является перевод Ru в растворимую форму рутената калия K₂RuO₄.

Для этой цели было опробовано два способа.

1. Синтез K_2RuO_4 из исходного Ru окислением его в расплаве KOH и KNO_3 при температуре 400-500°C по следующей реакции:



2. Синтез K_2RuO_4 окислением Ru непосредственно в растворе KOH по следующим реакциям :



Для контроля K_2RuO_4 в растворах, синтезируемого по реакциям (2)–(4), проводились измерения спектров поглощения в диапазон длин волн 220–1000 нм на приборе SPECTROstar©Nano (производство Германия). Необходимые данные по коэффициентам экстинкции были взяты из обстоятельной работы [9] по спектроскопии растворов рутения, согласно которым ион RuO_4^{2-} (Ru(VI)) при $\lambda=465$ нм имеет коэффициент экстинкции $\varepsilon=1820$ л·моль⁻¹·см⁻¹ (рис. 3), а молекула RuO_4 , Ru(VIII) при $\lambda=385$ нм – $\varepsilon=930$ л·моль⁻¹·см⁻¹.

Количественные измерения K_2RuO_4 в получаемых растворах проводили следующим образом. Из синтезированного раствора отбирались дозированные пробы объемом несколько микролитров, которые вводились в оптическую кварцевую кювету с нейтральным растворителем (дистиллятом или KOH), после чего по измеряемой оптической плотности τ при длине волны $\lambda=465$ нм и известному для иона RuO_4^{2-} коэффициенту экстинкции ε (рис. 3) рассчитывалась масса растворенного K_2RuO_4 и массу Ru по формуле

$$m_{Ru(VI)} = \frac{V_{кюв} \cdot V_{раств}}{V_{проб} \cdot L_{раств}} \cdot \frac{\tau_{465}}{\varepsilon_{465}} \cdot \mu_{Ru}, \quad (5)$$

где $m_{Ru(VI)}$ [мг] – масса Ru(VI) в исследуемом растворе; $V_{кюв}$ [л] – объем оптической кюветы; $V_{раств}$ [л] – объем исследуемого раствора, из которого взята проба; $V_{проб}$ [л] – объем пробы; $L_{раств}$ [см] – толщина слоя раствора в оптической кювете; τ_{465} [отн. ед.] – измеренная оптическая плотность; ε_{465} [л·моль⁻¹·см⁻¹] – коэффициент экстинкции аниона RuO_4^{2-} ; μ_{Ru} [а.е.м.] – атомный вес Ru.

Контроль получаемых растворов в течение продолжительного времени показал, что концентрация K_2RuO_4 в щелочных растворах молярностью более 2М остается стабильной не менее двух недель.

Рис. 3. Молярный коэффициент экстинкции иона RuO_4^{2-} (Ru(VI)) как функция длины волны...

Реакция (2). Синтез рутената калия по реакции (2) в расплаве удовлетворительно воспроизводился по известной методике [10], и спектр его раствора соответствовал

литературным данным. Согласно спектрофотометрическим измерениям, выход K_2RuO_4 составил 80%.

Реакция (3). Синтез K_2RuO_4 в растворе по реакции (3) проводился в стеклянном бюксе, помещенном в нагреваемый термостат, в интервале температур 70–90°C в течение двух часов при непрерывном перемешивании с помощью магнитной мешалки. Как было установлено по спектрам поглощения, в получаемых растворах образовывалась рассеивающая мелкодисперсная взвесь, по-видимому KIO_3 , которую не удавалось устранить даже с помощью центрифуги на частоте 10^4 об/мин. Это приводило к искажению формы спектров K_2RuO_4 и невозможности определять по ним концентрацию.

Реакция (4). Для синтеза K_2RuO_4 в растворе по реакции (4) был опробован другой окислитель Ru – пероксидисульфат калия $K_2S_2O_8$, растворимость которого в воде при температуре 20°C составляет 4.49 г/100 мл, в то время как растворимость KIO_4 – лишь 0.42 г/100 мл. По литературным данным температура разложения $K_2S_2O_8$ составляет менее 100°C, поэтому при проведении реакции окисления Ru персульфатом калия температура нагрева была понижена. Синтез проводился в таком же стеклянном бюксе в течение 2 часов при температуре 55–60 °C при непрерывном перемешивании. В этих условиях удалось получить полноценные спектры K_2RuO_4 и путем варьирования относительных количеств реагентов подобрать условия максимального выхода Ru в раствор, который составил в итоге 78%.

Несмотря на столь же высокий выход K_2RuO_4 по реакции (2), получение K_2RuO_4 по реакции (4) оказалось более удобным, так как для проведения реакции (2) в расплаве требуются достаточно длительные манипуляции с радиоактивным порошком Ru (перемешивание с KNO_3 , поэтапное добавление этой смеси в расплав KOH и последующее ее растворение).

2.2.2. Синтез и дистилляция RuO_4 из раствора. Для реализации подхода, включающего отгонку RuO_4 из раствора, был собран специальный стенд (рис. 4). Приведенная в работах [7, 8] схема газового стенда для наработки RuO_4 не отвечала требованиям нашей задачи. Прежде всего, разборный стеклянный газовый стенд не обеспечивал достаточную герметичность без применения вакуумной смазки (активно взаимодействующей с RuO_4), а также не позволял провести высокое обезвоживание осушителя газов ангидрона $Mg(ClO_4)_2$. Поэтому при изготовлении стенда использовались детали, выполненные из нержавеющей стали и дюралюминия. В качестве соединяющих элементов между стеклом и металлом в первых экспериментах применялись трубки из полиэтилена и полипропилена. Однако из-за взаимодействия RuO_4 с внутренними поверхностями таких трубок (что проявлялось в их

почернении), они были заменены на трубки из фторопласта ПТФЭ. Стеклодержатель оставалась только перегонная “трехгорлая” колба 1 (рис. 4), шлифы которой смазывались серной кислотой. Реакционная смесь в колбе непрерывно перемешивалась магнитной мешалкой, якорь которой имел защитное покрытие из фторопласта. Ловушки 2, 3, 4 (рис. 4) были снабжены вентилями из нержавеющей стали. В качестве охлаждающей смеси использовался жидкий этилцеллозольв ($C_4H_{10}O_2$), который поддерживался при температуре $-78^{\circ}C$ путем периодического подливания жидкого азота. Перенос RuO_4 из реакционной колбы в ловушки-сборники осуществлялся потоком азота высокой чистоты из стандартного баллона объемом 40 л, расход задавался регулятором расхода РРГ-10. Использование магнитной мешалки позволило отказаться от погружения подводящей газ трубки непосредственно в реакционную смесь во избежание потерь Ru из-за разбрызгивания раствора и осаждения капель на стенках колбы.

Рис. 4. Схема газового стенда для синтеза и дистилляции RuO_4 ...

Процесс наработки и дистилляции RuO_4 проводился при комнатной температуре и состоял в следующем:

- в перегонную колбу помещался порошок KIO_4 в количестве 1–1.5 г.
- с помощью регулятора устанавливался расход азота ($q = 10$ л/ч).
- в колбу вливался раствор K_2RuO_4 в KOH (молярностью 4М) объемом 12–17.0 мл.
- капельное добавление концентрированной H_2SO_4 в раствор из делительной воронки.

Длительность эксперимента по наработке и отгонке RuO_4 не превышала двух часов. По мере увеличения концентрации H_2SO_4 цвет раствора и порошка KIO_4 на дне колбы из красно-коричневого становился желтым и постепенно бледнел к концу второго часа вплоть до полного обесцвечивания. Отгоняемый RuO_4 пропускаться через осушитель 2 (рис. 4) и конденсировался в металлической ловушке-сборнике 3 (рис. 4), которая по окончании процесса переносилась на вакуумный стенд (рис. 5).

Рис.5. Схема вакуумного стенда для операций по выделению ^{103m}Rh

После завершения отработки методики конверсии Ru в RuO_4 на необлученном металлическом рутении целевые операции – последовательные превращения Ru в K_2RuO_4 и K_2RuO_4 в RuO_4 – проводились на облученных образцах.

2.3. Выделение ^{103m}Rh при отгонке RuO_4

Вакуумный стенд, схема которого представлена на рис.5, предназначен для перегонки синтезированного RuO_4 в небольшие пригодные для хранения емкости, для оценки количества

собранного RuO₄ и, прежде всего, для выделения нарабатываемого ^{103m}Rh. Извлечение ^{103m}Rh проводилось путем его смыва со стенок кварцевых ловушек после выдерживания в них ¹⁰³RuO₄ и последующей его отгонки.

Емкости для операций с RuO₄ представляли собой ампулы из плавленного кварца 2, 3 (рис.5) с внутренним диаметром 10 мм и длиной 20 см, снабженные металлическими фланцами и надежными вентилями (с уплотнением металл по металлу). Использование таких емкостей обусловлено химической стойкостью кварца по отношению к кислотам, используемым при последующем растворении образующегося ^{103m}Rh, а также прозрачностью кварца для наблюдения за локализацией RuO₄.

Поскольку RuO₄ требует особо тщательного обращения, так как подвержен разложению при повышении температуры, в присутствии паров воды и под действием света, перед использованием кварцевые емкости тщательно герметизировались и дегазировались при температуре 200°C в течение одного часа. После переконденсации свежесинтезированного RuO₄ из металлической ловушки-сборника 1 (рис. 5) в кварцевую ловушку 2 (рис. 5), последняя закрывалась светонепроницаемым экраном и помещалась в морозильную камеру при температуре -22°C. При соблюдении этих мер предосторожности величина относительных потерь RuO₄ в результате его химического разложения составляла примерно 0.4 вес % за 10 суток хранения.

Количество собранного RuO₄, полученного из облученного образца металлического Ru весом 46 мг, определялось по измерению его давления. Для этого свежесинтезированный RuO₄ собирался в кварцевую емкость 3 (рис. 5), которая отогревалась до температуры 20°C, после чего газообразный RuO₄ распускался в известный объем гребенки, включающий мерную емкость 4 (рис. 5). Максимальное давление RuO₄ при распускании составило 6.2 мм рт. ст. (рис. 6), что позволило рассчитать массу RuO₄ в приближении идеального газа по следующей формуле:

$$m_{\text{RuO}_4} = \frac{P_{\text{RuO}_4} \cdot 3.3 \cdot 10^{19} \cdot V_{\text{RuO}_4}}{N_A} \cdot \mu_{\text{RuO}_4}, \quad (6)$$

где m_{RuO_4} [г] – масса RuO₄; $P_{\text{RuO}_4} = 6.2$ [мм рт.ст.] – давление RuO₄; $3.3 \cdot 10^{19}$ [мм рт.ст.⁻¹ · л⁻¹] – число молекул в одном литре газа при давлении 1 мм рт. ст. (при температуре 20°C); $V_{\text{RuO}_4} = 1.126$ [л] – объем газообразного RuO₄; $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ [моль⁻¹] – число Авогадро; $\mu_{\text{RuO}_4} = 165$ [г/моль] – молярная масса RuO₄; $\mu_{\text{Ru}} = 101$ [а. е. м.] – атомная масса Ru.

Рис. 6. Установление давления газовой фазы RuO₄ при распускании на мерный объем

Согласно расчету, масса собранного в ловушке RuO_4 составила 63 мг, масса Ru в котором 38.6 мг. Таким образом, при переработке облученного образца металлического рутения массой 46 мг в RuO_4 выход Ru составил примерно 84%.

Следует отметить, что одним из возможных перспективных путей использования синтезированного RuO_4 является формирование растворов комплексных соединений рутения, пригодных для извлечения дочернего $^{103\text{m}}\text{Rh}$ методом ионообменной хроматографии. Поскольку в силу своей высокой химической активности RuO_4 легко поглощается растворами кислот и щелочей, открывается возможность путем изменения состава растворителя, через который проводится его барботирование, получать такие соединения Ru, которые надежно удерживались бы на используемом сорбенте. Наличие в литературе количественных данных по молекулярным абсорбционным спектрам комплексов рутения [11] и родия [12] облегчает проведение поиска оптимальных растворителей для их разделения с помощью ионообменной хроматографии.

Процедура выделения $^{103\text{m}}\text{Rh}$ из RuO_4 осуществлялась следующим образом. Активность ^{103}Ru в ловушке с кристаллами RuO_4 измерялась по интенсивной гамма-линии $E_\gamma=497$ кэВ до и после процедуры отгонки RuO_4 . Длительность отгонки составила 15 минут. После отгонки активность ^{103}Ru в ловушке на линии $E_\gamma=497$ кэВ не наблюдалась. Интенсивность рентгеновской линии в области энергии 20 кэВ с учетом временных поправок соответствовала равновесной активности $^{103\text{m}}\text{Rh}$, близкой к исходной активности ^{103}Ru , что говорит о высокой эффективности выделения $^{103\text{m}}\text{Rh}$ из RuO_4 при отгонке последнего. После отгонки проводился смыв $^{103\text{m}}\text{Rh}$ кипящей царской водкой. Через три часа после окончания процесса фотопик в области энергии 20 кэВ в растворе уже не регистрировался.

В качестве иллюстрации на рис. 7 приведены аппаратурные рентгеновские спектры ^{103}Ru и $^{103\text{m}}\text{Rh}$ при операциях по выделению $^{103\text{m}}\text{Rh}$.

Рис.7. Стадии выделения $^{103\text{m}}\text{Rh}$ и соответствующие рентгеновские спектры...

Дальнейшее использование выделяемого таким образом $^{103\text{m}}\text{Rh}$ предполагает упаривание исходного раствора до влажных солей с последующим растворением в воде или кислотах с регламентированной молярностью.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие у Ru газообразной окиси (в отличие от иных элементов платиновой группы) оказалось весьма плодотворным для решения задачи по наработке изотопа $^{103\text{m}}\text{Rh}$,

рассматриваемого в качестве кандидата для создания радиофармпрепаратов на его основе. Проведенная в работе конверсия металлического Ru в газообразный RuO₄, позволила получить рутений без примесей в виде RuO₄ и использовать его для наработки ^{103m}Rh, а также выделить нарабатываемый целевой изотоп ^{103m}Rh путем отгонки RuO₄.

Использование такого подхода открывает возможность создания генератора ^{103m}Rh на основе многократной перегонки порции RuO₄ из ловушки в ловушку и наработки ^{103m}Rh путем чередования перегонок и элюирования.

В работе получены следующие основные результаты:

- показана возможность создания ¹⁰³Ru/^{103m}Rh изотопного генератора, основанного на выделении дочернего ^{103m}Rh путем газификации и отгонки материнского RuO₄;
- разработана методика конверсии металлического Ru в RuO₄ с выходом примерно 84% по металлу;
- разработан способ синтеза K₂RuO₄ в растворе с использованием K₂S₂O₈ в качестве окислителя;
- предложено использовать получаемый RuO₄ для синтеза растворимых рутениевых комплексов с известным зарядом, позволяющих разделять рутений и ^{103m}Rh методами ионообменной хроматографии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skarnemark G., Odegaard-Jensen A., Nilsson J., Bartos B., Kowalska E., Bilewicz A., Bernhardt P. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2009. V. 280. P. 371. <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0529-1>
2. Bernhardt P., Forssell-Aronsson E., Jacobsson L., Skarnemark G. // Acta Oncol. 2001. V. 40. P. 602. <https://doi.org/10.1080/028418601750444141>
3. Filosofov D., Kurakina E., Radchenko V. // Nucl. Med. Biol. 2021. V. 94–95. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2020.12.001>
4. De Frenne D. // Nucl. Data Sheets. 2009. V. 110. P. 2081. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2009.08.002>
5. Никольский А.Б., Рябов А.Н. // ЖНХ. 1965. Т. 10. С. 3.

6. *Никольский А.Б.* // ЖНХ. 1963. Т. 8. С. 1045.
7. *Горюнов А.А., Мюллер Р.Л., Капустина Л.К.* // Вестник ЛГУ. Серия физ. хим. 1960. Т. 10. вып. 2. С. 104.
8. *Горюнов А.А., Свешникова Л.А.* // ЖНХ. 1960. Т. 6. С. 1543
9. *Connick R.E., Hurley C.R.* // J. Am. Chem. Soc. 1952. V. 74. P. 5012.
<https://doi.org/10.1021/ja01140a007>
10. *Брауэр Г., Герцог С., Глемзер О.* Руководство по неорганическому синтезу. Т. 5. Москва: Мир, 1985.
11. *Башилов А.В.* Дис.... канд. хим. наук. Москва: МГУ, 2001.
12. *Wolsey W.C., Reynolds Ch.A., Kleynberg J.* // Inorg. Chem. 1963. V. 2. P. 463.
<https://doi.org/10.1021/ic50007a009>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема наработки и изомерного перехода целевого радионуклида ^{103m}Rh .
- Рис. 2.** Фрагменты аппаратных гамма-спектров ^{103}Ru : **а** – облученного образца металлического Ru нейтронами через четыре месяца после облучения; **б** – кристаллов $^{103}\text{RuO}_4$, полученных конверсией металлического ^{103}Ru .
- Рис. 3.** Молярный коэффициент экстинкции иона RuO_4^{2-} (Ru(VI)) как функция длины волны (по данным работы [9]).
- Рис. 4.** Схема газового стенда для синтеза и дистилляции RuO_4 : 1 – перегонная колба с KIO_4 и раствором K_2RuO_4 , сверху на колбе расположена воронка для капельного введения H_2SO_4 , под колбой – магнитная мешалка; 2 – колонка с осушителем газов ангидроном $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$; 3 – металлическая прокачанная ловушка-сборник RuO_4 ; 4 – вспомогательная прокачанная ловушка, предотвращающая конденсацию влаги из атмосферы в сборник RuO_4 при выключения потока азота; 5 – сосуды Дьюара с этилцеллозольвом ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$) при температуре -78°C .
- Рис. 5.** Схема вакуумного стенда для операций по выделению ^{103m}Rh : 1 – металлическая ловушка с синтезированным $^{103}\text{RuO}_4$; 2 – кварцевая емкость с металлическим фланцем; 3 – кварцевая емкость с металлическим фланцем; 4 – мерная емкость; 5 – сорбционная ловушка с активированным углем; 6 – датчик давления ДТ-5; 7 – термоэлектронный датчик давления; 8, 9 – сосуды Дьюара с жидким азотом; 10 – форвакуумный насос; 11–24 – вентили.
- Рис. 6.** Установление давления газовой фазы RuO_4 при распускании на мерный объем.
- Рис. 7.** Стадии выделения ^{103m}Rh и соответствующие рентгеновские спектры: **а** – сконденсированные в ампуле кристаллы $^{103}\text{RuO}_4$; **б** – оставшийся в ампуле ^{103m}Rh после полной отгонки RuO_4 (контроль Ru по линии с энергией 497 кэВ); **в** – ампула после смыва ^{103m}Rh царской водкой; **г** – бюкс со смывом ^{103m}Rh царской водкой объемом 1 мл.



Рис. 1.

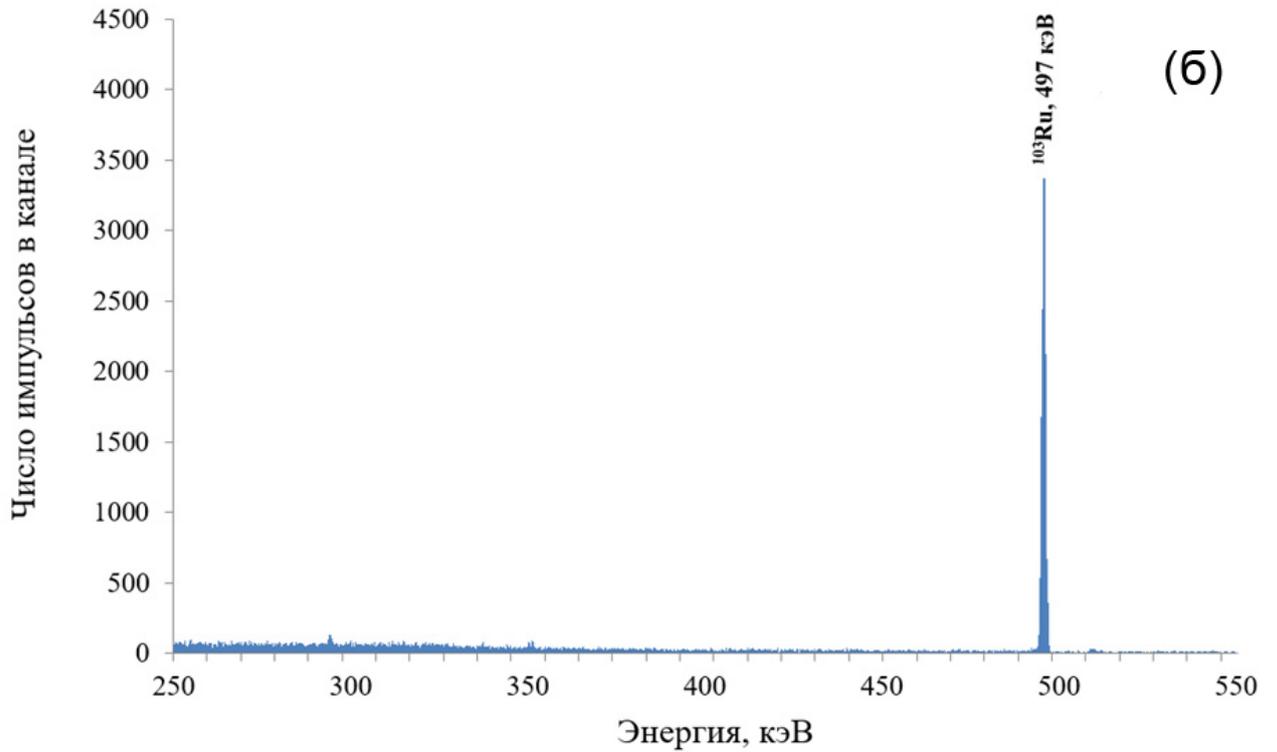
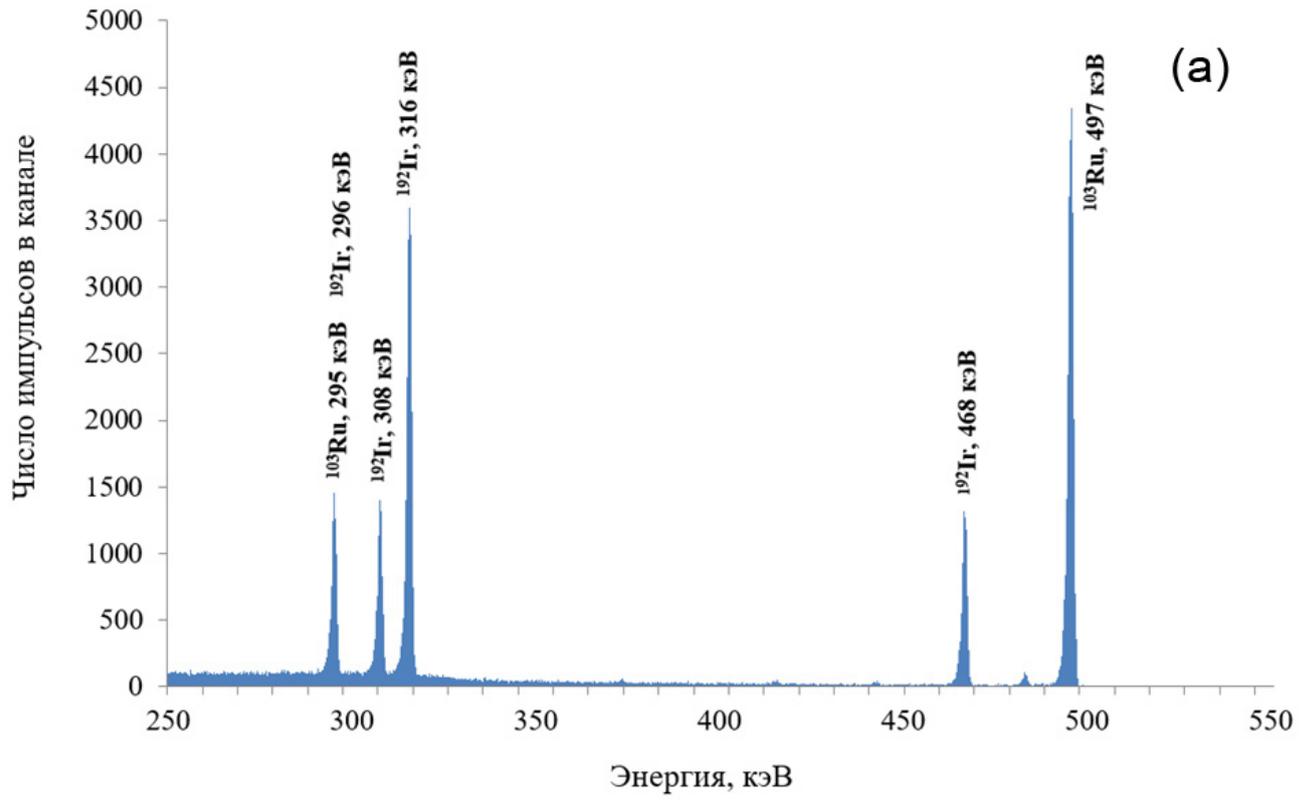


Рис. 2.

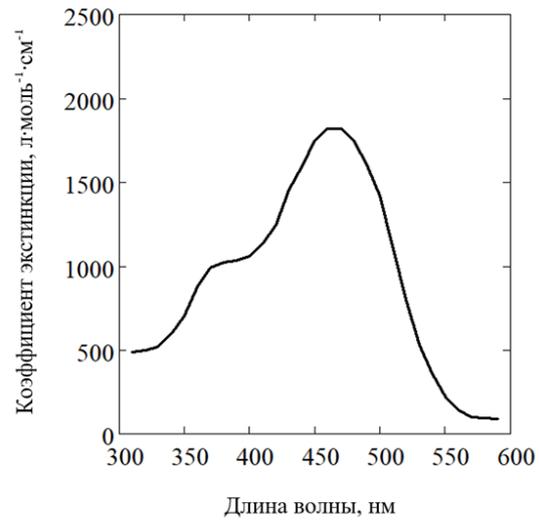


Рис. 3.

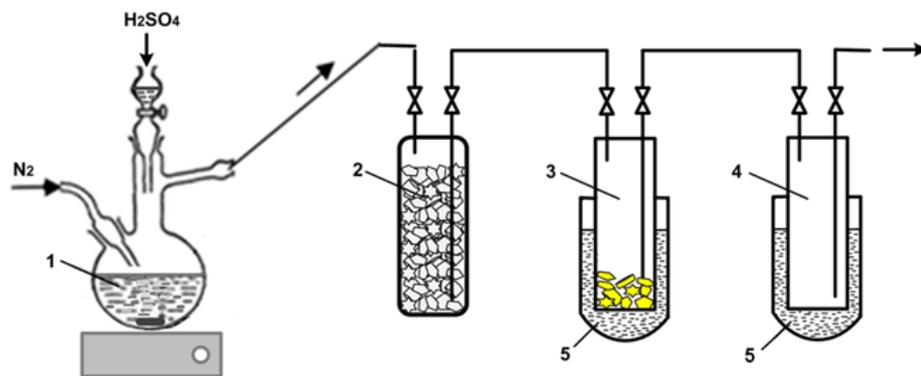


Рис. 4.

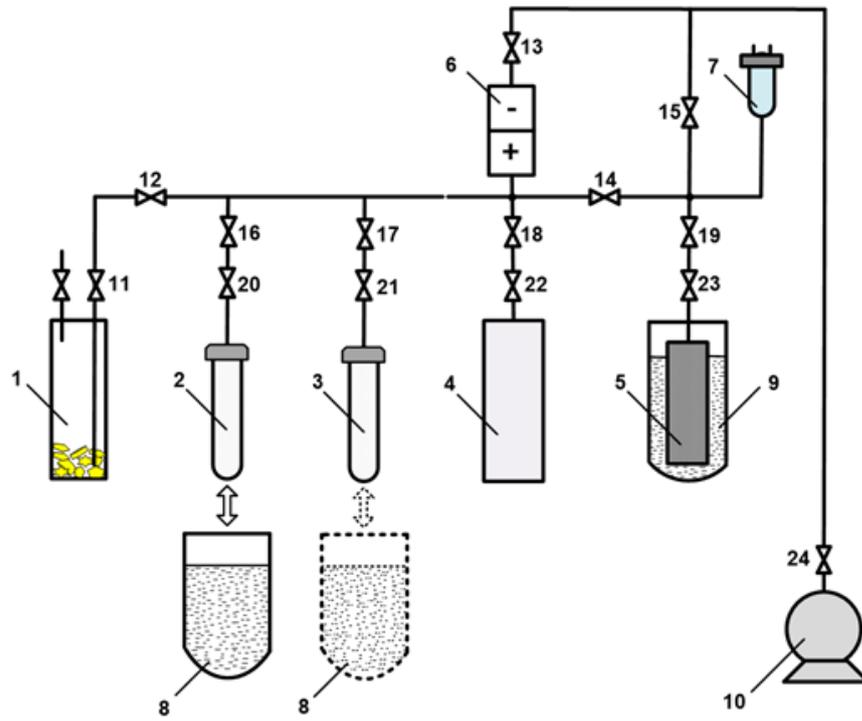


Рис. 5.

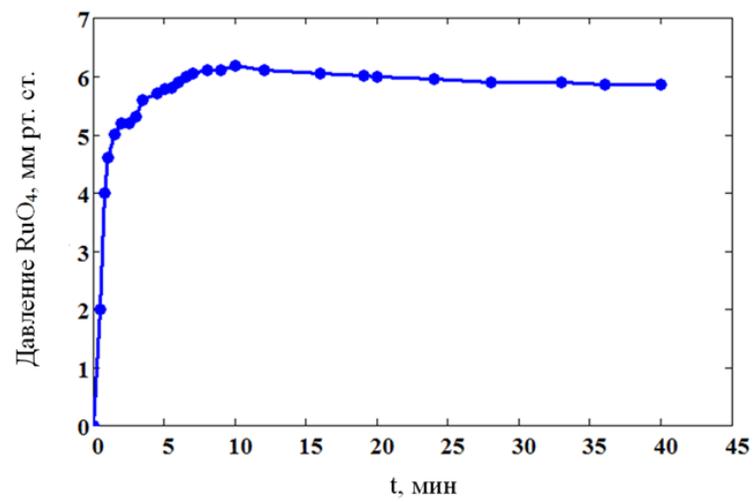


Рис. 6.

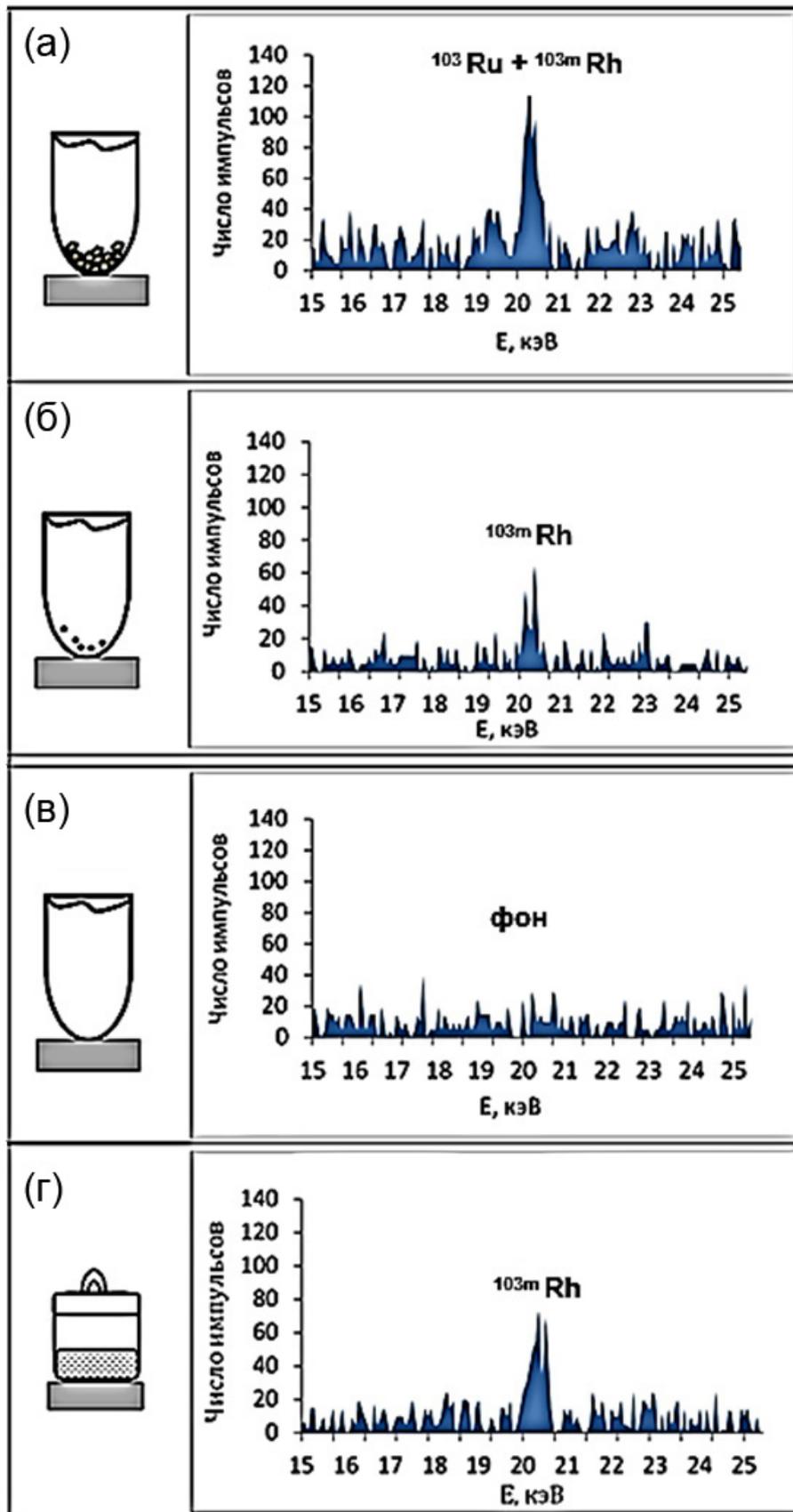


Рис. 7