

УСТРОЙСТВА И ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ  
НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

УДК 544.58

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ЭМАНИРОВАНИЯ  $^{220}\text{Rn}$   
НА ОСНОВЕ ТОНКОСЛОЙНОГО НОСИТЕЛЯ  $^{228}\text{Th}$

© 2024 г. А. А. Артюхов<sup>1,\*</sup>, А. А. Артюхов<sup>1</sup>, П. Н. Ивлиев<sup>1</sup>, К. В. Коков<sup>1</sup>, Т. М. Кузнецова<sup>1</sup>,  
В. В. Лебедев<sup>1</sup>, К. А. Маковеева<sup>1</sup>, Д. Ю. Чувилин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

\*E-mail: artukhov\_aa@nrcki.ru

Поступила в редакцию 10.01.2023 г.

После доработки 10.01.2023 г.

Принята к публикации 09.06.2023 г.

Описаны результаты исследований эманирования радона-220 из источника, в качестве которого служила полимерная мембрана сложной пористой структуры с сорбированным материнским радионуклидом торием-228. Показано, что такой вид источников может использоваться для получения целевого радионуклида свинца-212 высокой радионуклидной чистоты для нужд ядерной медицины.

DOI: 10.56304/S1992722323040039

ВВЕДЕНИЕ

Активно развивается направление ядерной медицины, основанное на введении в организм человека радиофармпрепаратов, содержащих радиоизотопы для осуществления различных диагностических и терапевтических целей. Таргетная терапия с применением меченых радионуклидами специфических органических молекул рассматривается как один из наиболее эффективных и перспективных вариантов лечения многих онкологических заболеваний. В связи с этим весьма актуальной задачей является разработка новых способов получения терапевтических радионуклидов и радиофармацевтических лекарственных препаратов (РФЛП) на их основе.

Одним из перспективных радионуклидов для таргетной терапии является радиоизотоп  $^{212}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 10.64$  ч), который можно рассматривать

как *in vivo*-генератор радионуклида  $^{212}\text{Bi}$ . Актуальность исследований, направленных на разработку способов получения  $^{212}\text{Pb}$  и применения РФЛП на его основе, подтверждается динамикой публикаций, посвященных работам по применению этого радионуклида [1].

Радионуклид  $^{212}\text{Pb}$  образуется в цепочке распада  $^{228}\text{Th}$  (рис. 1).

В настоящее время рассматриваются два основных подхода по получению радионуклида  $^{212}\text{Pb}$ : первый основан на методах ионообменной хроматографии и заключается в элюировании  $^{212}\text{Pb}$  из колонки с ионообменной смолой, содержащей  $^{224}\text{Ra}$ . Этот метод имеет несомненные достоинства, которые определили создание и функционирование генераторов  $^{224}\text{Ra}/^{212}\text{Pb}$  [2], основными из них являются высокий выход радионуклида  $^{212}\text{Pb}$ , простота конструкции и эксплуатации. Однако у него

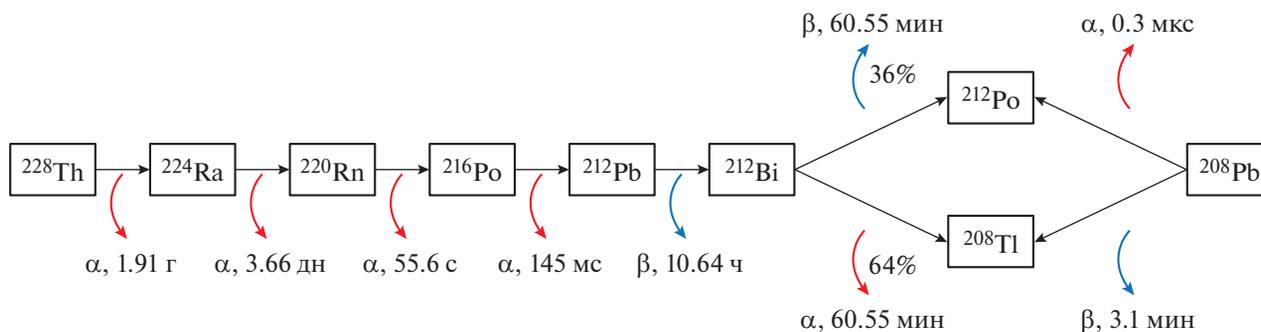


Рис. 1. Цепочка распада  $^{228}\text{Th}$ .

## МЕТОДЫ

имеются значительные недостатки, а именно, необходимость проводить дополнительные радиохимические операции по отделению  $^{224}\text{Ra}$  от материнского изотопа  $^{228}\text{Th}$ , в связи с коротким периодом полураспада  $^{224}\text{Ra}$  ( $T_{1/2} = 3.6$  сут) время эффективной работы  $^{224}\text{Ra}$ -содержащей ионообменной колонки не превышает 4–5 сут, использующийся элюент определяется свойствами ионообменной колонки, и получаемый элюат не всегда подходит для дальнейшего синтеза радиофармпрепаратов. Главным недостатком данного метода является необходимость проведения дополнительных процедур контроля чистоты полученного радионуклида, поскольку проводимые радиохимические операции не могут гарантировать чистоту целевого продукта от материнских радионуклидов.

Второй подход основан на эманировании газообразного радионуклида  $^{220}\text{Rn}$  (торон) из носителя, содержащего  $^{228}\text{Th}$ , с последующим перемещением  $^{220}\text{Rn}$  в объем накопителя, где происходит его распад и накопление целевого радионуклида  $^{212}\text{Pb}$ . Преимуществами этого способа являются длительный период работы генератора (до двух лет), что обеспечивает значительное снижение дозовой нагрузки на персонал, и, что особенно важно, достигается высокая радионуклидная чистота конечного продукта за счет разделения материнских радионуклидов  $^{228}\text{Th}$  и  $^{224}\text{Ra}$ , находящихся в твердофазном состоянии, и газообразного продукта распада  $^{220}\text{Rn}$ .

Отметим, что создание регулируемого источника и осуществление количественной, стабильной генерации изотопов радона ( $^{220}\text{Rn}$  и  $^{222}\text{Rn}$ ) требуются не только для получения медицинских радионуклидов, но и для применения в различных биологических, физико-химических исследованиях [2].

Ключевым элементом, определяющим эффективное эманирование  $^{220}\text{Rn}$ , является источник эманации. Материал, содержащий соединения  $^{228}\text{Th}$ , должен соответствовать следующим требованиям: обеспечение высокой степени эманирования  $^{220}\text{Rn}$ ; надежное удержание материнских радионуклидов  $^{228}\text{Th}$  и  $^{224}\text{Ra}$  на носителе; достаточная радиационная стойкость материала носителя, обеспечивающая длительный период его эксплуатации; простота изготовления и доступность материалов.

Цель проведенного исследования заключалась в изучении возможности использования микрофилтрационных фторопластовых гидрофильных мембран в качестве тонкослойного носителя  $^{228}\text{Th}$ , из которого происходит эманирование  $^{220}\text{Rn}$ .

В рамках данного исследования проведен анализ публикаций российских и зарубежных авторов, касающийся изучения материалов, которые могли бы обеспечить эффективное эманирование радона и надежное удержание материнских радионуклидов. Но для создания источника эманирования радона помимо перечисленных выше требований необходимо иметь в виду, что радионуклид  $^{220}\text{Rn}$  имеет ультракороткий период полураспада ( $T_{1/2} = 55.6$  с). Поэтому толщина носителя должна быть минимальной, чтобы обеспечить возможность диффузии  $^{220}\text{Rn}$  через слой материала в свободное пространство. В опубликованных исследованиях подробно изучена эманлирующая способность многих органических веществ и материалов, определенных коэффициенты диффузии радона в наиболее распространенных полимерах, однако количество разработок, направленных на создание источников эманирования, весьма незначительно.

В [3] предложен вариант твердофазного источника эманирования  $^{220}\text{Rn}$ , в котором использовалась высокая эманлирующая способность  $^{228}\text{Th}$ -содержащих бариевых солей жирных кислот. В частности, высокий коэффициент эманирования показывают такие соли, как стеарат  $\text{C}_{36}\text{H}_{70}\text{BaO}_4$  (95%) и пальмитат  $\text{C}_{32}\text{H}_{62}\text{BaO}_4$  (100%) бария.

На основе стеарата бария был создан прототип проточного радонового генератора [4, 5], позволяющий достигать выхода радона 70%. Однако было отмечено, что степень эманирования радона снижается из-за радиолитической деструкции легированного стеарата бария. Уровни удельной активности материала, приемлемые для стабильной работы генератора, находятся в области от 12 до 50 МБк/0.09 г. Существенным недостатком представленного источника эманирования радона является то, что синтез  $^{228}\text{Th}$ -легированного стеарата бария и дальнейшее изготовление изделия на его основе представляют собой трудоемкие, многостадийные процессы с необходимостью ручной работы с высокоактивными веществами.

В [6] была изучена возможность использования  $^{228}\text{Th}$ -содержащего анионита АВ-17-8 в качестве источника эманирования  $^{220}\text{Rn}$ . Получение такого носителя не требует проведения сложных химических синтезов, и изготовление устройства эманирования относительно несложно. Было показано, что максимально возможная степень эманирования  $^{220}\text{Rn}$  из монослоя гранул  $^{228}\text{Th}$ -содержащей ионообменной смолы достигает 90–95%. Однако с увеличением толщины слоя смолы происходит значительное уменьшение степени эманирования из-за процессов ресорбции и дополнительных препятствий для свободной диффузии

радона. Таким образом, в конструкции генератора на основе  $^{228}\text{Th}$ -содержащего анионита АВ-17-8 необходимо обеспечить условия для максимально тонкого равномерного распределения гранул. Необходимо также учитывать, что при работах с высокой активностью источник  $^{220}\text{Rn}$  должен иметь большую эффективную площадь, либо удельная активность гранул должна быть достаточно высокой, что может быть ограничено радиационной стойкостью анионита АВ-17-8. Для достижения высокой степени эманирования нужно проводить увлажнение анионита, причем значение влажности должно находиться в определенных пределах, поэтому в конструкции генератора необходимо предусматривать устройство и операции для поддержания оптимальной влажности ионообменной смолы. Кроме того, отмечены нестабильность эманлирующей способности анионита и тенденция к ее снижению при выходе на равновесие.

В настоящей работе исследовали возможность применения мембранных носителей в качестве источника эманации для использования в генераторе  $^{220}\text{Rn}$ . При этом принимали во внимание условия, которым должен соответствовать источник эманации. В качестве материала для изготовления носителя  $^{228}\text{Th}$  использовали микрофильтрационные фторопластовые гидрофильные мембраны МФФК-3Г (“ВЛАДИПОР”, г. Владимир).

Мембрана МФФК-3Г представляет собой лавсановую подложку, на которую нанесен слой пористого фторопласта-42Л. Изготовителем предлагаются мембраны с размером пор 0.15, 0.25, 0.45, 0.65, 0.8 мкм и общей пористостью 80–85%. Толщина мембраны составляет 150 мкм, производительность по воде при давлении 0.05 МПа – 10400  $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \text{ч})$ , точка пузырька по воде – 1.4 атм. Гидрофильность мембраны обеспечивается обработкой уретановым олигомером  $\text{H}_2\text{N}-\text{COOH}$  [7]. Максимальная температура эксплуатации – 80°C. Мембраны обладают высокой химической стойкостью.

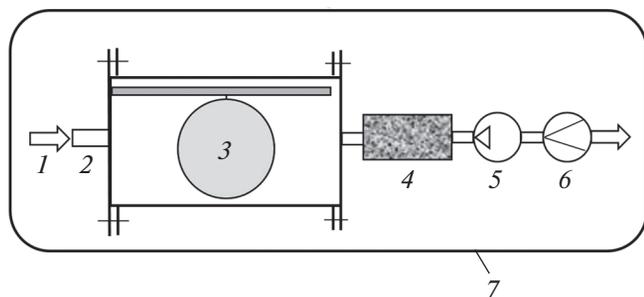
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения степени эманирования  $^{220}\text{Rn}$  использовали образцы мембран в виде дисков диаметром 20 мм. Для этого на диск или отрезок мембраны большего размера приклеивали кольцо-оправку из полимера (полиэтилентерефталат) размером  $20 \times 18 \times 1$  мм. В качестве клея использовали фторопластовый лак марки ЛФ-42л. После высыхания клея припуск обрезали по внешнему диаметру кольца-оправки. Подготовленный таким образом образец мембраны помещали в специальный держатель из фторопласта для нанесения раствора нитрата тория. Раствор нитрата тория, имеющего удельную активность 263 кБк/мл и кислот-

ность 1.5 М  $\text{HNO}_3$ , в количестве 500 мкл наносили равномерно порциями по 20 мкл. После нанесения раствора проводили сушку образца мембраны. Высушенный образец мембраны помещали в чашку Петри диаметром 30 мм, закрывали и герметизировали пленкой Parafilm и самоклеящейся алюминиевой лентой. Контроль герметичности осуществляли с помощью дозиметра-радиометра ДКС-96 с блоком детектирования БДЗА-96. Герметично закрытый образец мембраны выдерживали в течение ~100 ч для достижения равновесных значений активности. По окончании выдержки проводили измерение равновесной активности образца мембраны. Измерения проводили полупроводниковым Ge-детектором, соединенным с многоканальным анализатором (ORTEC). Активность радионуклида  $^{212}\text{Pb}$  измеряли по интегралу фотопика  $\gamma$ -линии 238.63 кэВ.

Эксперименты по определению степени эманирования  $^{220}\text{Rn}$  из мембраны проводили на установке, представленной на рис. 2. Образец мембраны извлекали из чашки Петри и устанавливали в специальный держатель, который размещали по центру отрезка трубы из винипласта длиной 300 мм и внутренним диаметром 20 мм таким образом, чтобы поверхность мембраны располагалась вертикально по центру сечения трубы. На выходной конец трубы герметично присоединяли адсорбер с активированным углем для улавливания  $^{220}\text{Rn}$ . К адсорберу подсоединяли мембранный насос-компрессор, обеспечивавший поток воздуха через трубу с установленным образцом мембраны. Расход воздуха регулировали давлением на насосе-компрессоре и поддерживали на уровне 2500  $\text{см}^3/\text{мин}$ , контроль осуществляли ротаметром. Экспериментальная установка размещалась в вытяжном шкафу. В ходе эксперимента включали насос-компрессор, устанавливали необходимый расход воздуха и таким образом происходил равномерный обдув образца мембраны ламинарным потоком воздуха. Обдув проводили в течение 48 ч. По окончании обдува выключали насос-компрессор, извлекали образец мембраны из трубы и помещали его в чашку Петри, герметизировали и проводили измерения активности. Степень эманирования  $^{220}\text{Rn}$  из образца мембраны определяли как процентное отношение активности  $^{212}\text{Pb}$  образца сразу после обдува к равновесной активности герметично закрытого образца мембраны после 100-часовой выдержки.

Для качественной оценки изменения свойств мембраны после нанесения на нее  $^{228}\text{Th}$ -содержащего раствора измеряли скорость растекания капли дистиллированной воды по ее поверхности, что характеризует величину динамического смачивания мембраны (“степень гидрофильности”) [8]. Измерения проводили на исходных образцах мембран, на образцах после обработки их



**Рис. 2.** Схема установки для определения степени эманации  $^{220}\text{Rn}$ : 1 – узел подачи воздуха, 2 – труба для обдува образцов мембраны МФФК-3Г, 3 – образец мембраны МФФК-3Г, 4 – адсорбер с активированным углем, 5 – насос-компрессор, 6 – ротаметр, 7 – вытяжной шкаф.

1.5 М раствором  $\text{HNO}_3$  и раствором нитрата тория с кислотностью 1.5 М  $\text{HNO}_3$ . С помощью дозатора в центр сухого образца вносили 30 мкл дистиллированной воды и измеряли скорость распространения капли до его границы. Было выявлено, что скорость смачивания образцов после обработки раствором азотной кислоты сравнима со скоростью смачивания исходных образцов, однако после нанесения раствора нитрата тория ее значение уменьшается в 1.7 раза. Величины скорости смачивания образцов с разным размером пор различаются приблизительно в 2 раза (0.25 мкм – 0.036  $\text{см}^2/\text{с}$ , 0.65 мкм – 0.071  $\text{см}^2/\text{с}$ ), но тенденция уменьшения “степени гидрофильности” после обработки активным раствором сохраняется.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Возможность использования микрофильтрационной фторопластовой гидрофильной мембраны в качестве источника эманации  $^{220}\text{Rn}$  оценивали по следующим параметрам:

- эманулирующая способность материала (степень эманации  $^{220}\text{Rn}$ );
- способность материала удерживать родительские изотопы  $^{228}\text{Th}$  и  $^{224}\text{Ra}$ ;
- радиационная стойкость материала;
- доступность материала и возможность автоматизации технологических процессов.

**Таблица 1.** Эманирование  $^{220}\text{Rn}$  из мембраны в зависимости от размера пор

Диаметр образца, мм	20	20	20
Размер пор образца, мкм	0.25	0.45	0.6
Равновесная активность, кБк	6.95	5.9	6.2
Активность после обдува, кБк	0.55	0.45	0.62
Степень эманации $^{220}\text{Rn}$ , %	92.1	92.4	90.0

Эманулирующую способность образцов мембран оценивали при нормальных условиях. Образцы мембран обдували атмосферным воздухом естественной влажности, при этом соблюдали условия ламинарного движения газа. Объемный расход воздуха устанавливали с кратным запасом, чтобы весь эманулирующий  $^{220}\text{Rn}$  удалялся из образца. В табл. 1 представлены характеристики экспериментальных образцов.

Из табл. 1 видно, что материал характеризуется высокой эманулирующей способностью. Степень эманации  $^{220}\text{Rn}$  составляет не менее 90%. Учитывая, что эксперименты проводили при температуре 24°C, можно предположить, что при ее повышении степень эманации будет близка к 100%. Этому способствуют увеличение скорости диффузии и уменьшение сорбционной способности полимеров по отношению к радону с ростом температуры [9].

Способность материала удерживать родительские радионуклиды  $^{228}\text{Th}$  и  $^{224}\text{Ra}$  оценивали как на этапе подготовки образцов мембран, так и в ходе экспериментов по определению эманулирующей способности мембран. В процессе нанесения активного раствора на образцы мембран нельзя исключить возможность выхода активного раствора за пределы мембраны. Были проведены смывы 0.1 М раствором  $\text{HNO}_3$  с чашек Петри, в которых проводили насыщение образцов мембран  $^{228}\text{Th}$ -содержащим раствором. Пробы смывного раствора отбирали для проведения  $\alpha$ -спектроскопического и химического анализов. На рис. 3 показан спектр  $\alpha$ -излучения пробы раствора. В спектре видны линии, характерные для продуктов распада  $^{220}\text{Rn}$ , в то же время в спектре отсутствуют линии, характерные для родительских радионуклидов  $^{228}\text{Th}$  и  $^{224}\text{Ra}$ .

При проведении химического анализа в образцах смывного раствора обнаружено присутствие фтористого водорода в количестве ~0.1 моль/л, что было оценено по помутнению азотнокислого раствора лантана. Судя по появлению фтористого водорода в растворе и отсутствию в нем родительских радионуклидов  $^{228}\text{Th}$  и  $^{224}\text{Ra}$ , а также с учетом наблюдаемого уменьшения “степени гидрофильности” образцов мембраны МФФК-3Г можно предположить, что при нанесении активного раствора на мембрану происходит процесс полимеризации с участием уретанового олигомера и углеводородного остатка фторопласта, при этом родительские радионуклиды встраиваются в образовавшуюся полимерную структуру.

По окончании тестирования эманулирующей способности образца мембраны проводили смывы с внутренней поверхности винипластовой трубы для обдува образцов (рис. 2), которые анализировали на  $\alpha$ - и  $\gamma$ -спектрометре. В спек-

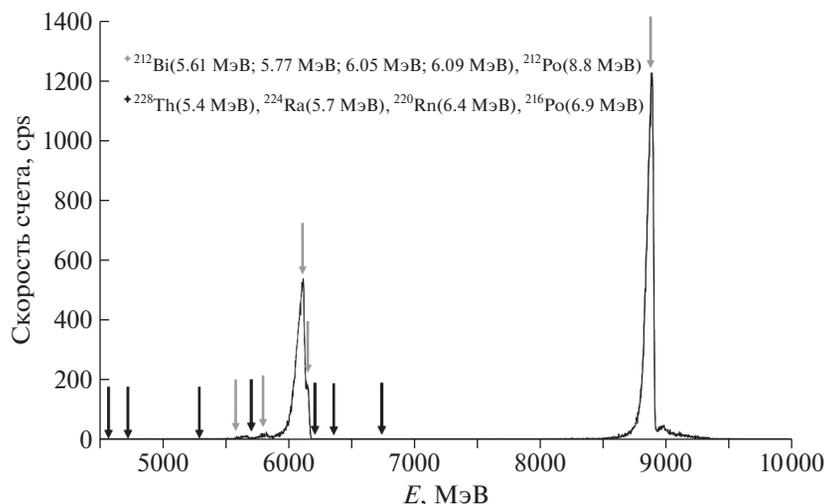


Рис. 3. Спектр  $\alpha$ -излучения пробы смывного раствора.

трах наблюдались только линии, принадлежащие продуктам распада  $^{220}\text{Rn}$ .

После обдува герметично закрытые образцы выдерживали в течение  $\sim 100$  ч для достижения равновесия. Значения активности, полученные на  $\gamma$ -спектрометре, совпадали с равновесным значением активности образца до эксперимента. Из этого следует, что родительские радионуклиды удерживаются в мембране. Тем не менее вполне очевидно, что в процессе работы при длительной эксплуатации в генераторе тонкослойный мембранный носитель  $^{228}\text{Th}$  должен изолироваться защитными мембранами. Установка дополнительных защитных мембран позволит исключить попадание родительских изотопов в поток газаносителя в случае радиолитического разрушения несущей мембраны при длительной эксплуатации.

Рассмотрение проблемы радиолитического разрушения полимерных материалов представляет особую важность. Полимеры из-за своего молекулярного строения под действием радиации подвергаются деструкции, сопровождаемой уменьшением молекулярной массы, прочностными свойствами, повышением растворимости. Существует предел поглощенной дозы, после которой химические и физические свойства полимеров претерпевают существенные изменения. Была предпринята попытка оценить величину поглощенной дозы в мембране – носителе материнского радионуклида для определения рекомендуемого времени ее эксплуатации. Очевидно, что для минимизации этой дозы необходимо непрерывное удаление газообразного  $^{220}\text{Rn}$  от мембраны для предотвращения ее облучения дочерними продуктами распада. Поэтому для оценки следует рассчитать энергию, выделившуюся в мембране от  $\alpha$ - и  $\gamma$ -излучения следующих радионуклидов (табл. 2).

Все перечисленные радионуклиды находятся в равновесии со своими родительскими, поскольку иммобилизованы; тогда поглощенная энергия от  $\alpha$ -излучения за 1 с будет вычисляться по формуле

$$Q = \sum_i A_i \cdot E_i \cdot p_i, \quad (1)$$

где  $A_i$  – активность  $i$ -го радионуклида,  $E_i$  – энергия его  $\alpha$ -частицы,  $p_i$  – коэффициент ветвления. Поскольку активность распределена равномерно по объему мембраны, будем считать, что вся энергия  $\alpha$ -частиц выделяется в материале, чтобы получить верхнюю оценку по мощности дозы. Для указанной выше толщины мембраны ни одна из разновидностей  $\alpha$ -частиц не успевает покинуть ее пределы прежде выделения всей кинетической энергии.

Ввиду отсутствия расчетных формул для дозовых полей внутри фотонного источника тонкий источник можно заменить на сферу с радиусом, равным среднему пробегу фотонов через толщину

Таблица 2. Характеристики радионуклидов

$^{228}\text{Th}$	Энергия $\alpha$ -частицы, МэВ	Ветвление, %
	5.3	100
$^{224}\text{Ra}$	Энергия $\gamma$ -кванта, кэВ	Квантовый выход, %
	84	84
$^{220}\text{Rn}$	Энергия $\alpha$ -частицы, МэВ	Ветвление, %
	5.7	94
	Энергия $\gamma$ -кванта, кэВ	Квантовый выход, %
	240	4.1

мембраны. Для указанной геометрии расчет среднего пробега через мембрану по формуле вычисления среднего значения приводит к величине пробега 532 мкм. Тогда поглощенную энергию  $\gamma$ -излучения находим по формуле

$$E = \sum_k E_k \cdot \eta_k \cdot A_k (1 - e^{-\mu l}) \cdot \frac{1}{2}, \quad (2)$$

где  $A_k$  – активность  $k$ -го радионуклида,  $E_k$  – энергия его  $\gamma$ -частицы,  $\eta_k$  – квантовый выход,  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления,  $l$  – радиус сферы. Коэффициент 0.5 приближенно соответствует доле частиц, которые удаляются во внешнюю сторону от поверхности мембраны. При указанных условиях доза от  $\gamma$ -излучения, как показывают расчеты по формуле (2), на 2 порядка ниже, чем доза от  $\alpha$ -излучения, поэтому далее оно учитываться не будет.

Согласно табл. 2 с основными энергиями  $\alpha$ -частиц, для оценки примем величину наносимой активности  $^{228}\text{Th}$  в 10 МБк. Поверхностная плотность мембраны составляет 8.8 мг/см<sup>2</sup>. При указанной выше геометрии мембраны мощность дозы  $\alpha$ -излучения в мембране при такой активности составляет 0.6 Гр/с, что при пороге дозы в 1–2 МГр дает оценку срока службы мембраны в 40 сут. Однако преимуществом мембранного исполнения источника является возможность уменьшения активности, приходящейся на единицу площади мембраны, что влечет за собой уменьшение дозовой нагрузки на источник. Так, при увеличении диаметра мембраны с 20 до 100 мм мощность дозы в мембране уменьшается в 25 раз, что увеличивает ее срок службы при одной и той же активности до трех лет. Это также является весомым аргументом для рассмотрения тонкого мембранного источника как перспективного для сорбции материнских радионуклидов в лабораторном генераторе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана перспективность использования микрофильтрационных фторопластовых гидрофильных мембран МФФК-3Г в качестве источника эманирования радона, поскольку они отвечают всем

необходимым требованиям: характеризуются высокой эманирующей способностью >90%, обеспечивают надежное удержание материнских радионуклидов  $^{228}\text{Th}$  и  $^{224}\text{Ra}$ , обладают приемлемой радиационной стойкостью. Кроме того, несомненными достоинствами исследуемых мембран являются их доступность и простота проведения технологических операций с возможностью автоматизации. При использовании микрофильтрационных мембран нет ограничений по размеру носителя и по его форме. В процессе изготовления тонкослойного носителя  $^{228}\text{Th}$  не требуется проведения сложных химических синтезов. Для изготовления носителя необходим только раствор нитрата тория, который предлагается к поставке производителями радионуклидов. Процесс нанесения активного раствора и изготовления носителя может быть легко автоматизирован, что немаловажно для снижения дозовой нагрузки на персонал.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kokov K.V., Egorova B.V., German M.N. et al. // Pharmaceutics. 2022. V. 14 (1). P. 189. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14010189>*
2. *Sindre P., Hassfjell S., Per Hoff // Appl. Radiat. Isot. 1994. V. 45 (10). P. 1021. [https://doi.org/10.1016/0969-8043\(94\)90170-8](https://doi.org/10.1016/0969-8043(94)90170-8)*
3. *Hursh J.B., Lovaas A.I. // J. Inorgan. Nucl. Chem. 1967. V. 29. № 3. P. 599. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(67\)80312-9](https://doi.org/10.1016/0022-1902(67)80312-9)*
4. *Hassfjell S. // Appl. Radiat. Isot. 2001. V. 55. № 4. P. 433. [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(00\)00372-9](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(00)00372-9)*
5. *Soyland C., Hassfjell S.P. // Int. J. Radiat. Biol. 2000. V. 76. № 10. P. 1315. <https://doi.org/10.1080/09553000050151583>*
6. *Артюхов А.А., Ивлиев П.Н., Коков К.В. и др. // Журн. физ. химии. 2022. Т. 96. № 8. С. 1211.*
7. *Тюрк Х., Вендель Ф. Вододиспергируемый полиуретан, его применение и косметическое средство. Пат. 2515992С2 (Россия). 2014.*
8. *Бородин С.А., Волков А.В., Казанский Н.Л. // Компьютерная оптика. 2005. Т. 28. С. 70.*
9. *Бекман И.Н. Радиохимия в 2 т. Т. 1. Фундаментальная радиохимия: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт, 2022. 473 с.*