МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Республиканское государственное предприятие
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН»
Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии»
(Филиал «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК»)

УДК 504.3.054:621.039.743

Абдигамитов Баглан Абдыгалыкович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ В ВОЗДУХЕ НА ПЛОЩАДКЕ ХРАНЕНИЯ ОЯТ РЕАКТОРА БН - 350

Работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан

(прикладные исследования)

Руководитель: Тимонова Л.В., начальник группы СИ ЛЭИМП ОРСМОС

г. Курчатов, 2020 г.

АВТОР

Абдигамитов Баглан Абдыгалыкович
инженер лаборатории экспериментальных исследований механизмов переноса
Филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП «НЯЦ РК»,
1986 года рождения,
Образование высшее (Семипалатинский государственный университет
имени Шакарима в 2008 г.),
специальность – химия,
квалификация по диплому – химик,

Образование высшее (Восточно – Казахстанский государственный технический
университет имени Серикбаева в 2011 г.),
специальность – горное дело.

работает в филиале «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК» с 2012 г.,
общий стаж работы 7,5 лет.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Инженер лаборатории
экспериментальных исследований

механизмов переноса ОРСМОС_____ _____Б.А. Абдигамитов
подпись, дата

Начальник группы лаборатории
экспериментальных исследований

механизмов переноса ОРСМОС_____ _____Л.В. Тимонова
подпись, дата

АБДИГАМИТОВ Б.А.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ В ВОЗДУХЕ НА ПЛОЩАДКЕ ХРАНЕНИЯ ОЯТ РЕАКТОРА БН - 350

Работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан от Филиала «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК»

071100, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2,
тел. (7-722-51)3-34-13, 2-51
факс(7-722-51)3-28-06
E-mail: abdigamitov@nnc.kz

РЕФЕРАТ

Конкурсная работа содержит 19 страниц, 17 иллюстраций, 2 таблицы, 6 источников.

ОТРАБОТАННОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО (ОЯТ), ДОЛГОВРЕМЕННОЕ ХРАНЕНИЕ, РАДИОАКТИВНЫЕ ГАЗЫ

Объект исследования: радиоактивные газы в воздухе на территории долговременного хранения ОЯТ реактора БН-350.

Цель работы: разработка методологии для определения радиоактивных газов на территории хранения ОЯТ реактора БН-350.

Задачи исследований:

- адаптация и апробация аналитического оборудования для определения радиоактивных газов;
- проведение исследований радиоактивного загрязнения воздуха на территории хранения ОЯТ реактора БН-350.

Методика исследований: сущность заключалась в исследовании радиоактивного загрязнения воздуха на территории долговременного хранения ОЯТ реактора БН-350. В первую очередь проведена адаптация и апробация аналитического оборудования в ходе пусковых работ реактора ИВГ.1М. Далее проведены исследования радиоактивного загрязнения воздушной среды вблизи контейнеров, содержащих ОЯТ реактора БН-350.

Результат работ: при проведении экспериментальных исследований на примере пусков реактора ИВГ1.М получены качественные и количественные данные, характеризующие уровень содержания радиоактивных газов в воздухе. Подтверждена применимость выбранного аналитического оборудования и правильность разработанной методологии исследования радиоактивных газов в воздухе.

Установлено, что объемная активность радионуклидов в воздушной среде на территории хранения ОЯТ реактора БН-350 составила менее предела обнаружения используемого оборудования. В связи с чем, можно говорить о герметичности контейнеров хранения за весь период эксплуатации и отсутствии формирования радиоактивного загрязнения на исследуемой территории.

Актуальность: согласно стандартам МАГАТЭ, хранилище отработанного ядерного топлива (ОЯТ) относится к ядерным установкам. В соответствии с этим, к ним предъявляются достаточно высокие требования безопасности, сравнимые с требованиями, применимыми к АЭС или другим стратегически важным объектам ядерной отрасли [1]. При хранении радиоактивных отходов следует обеспечивать защиту здоровья человека и охрану окружающей среды, как в настоящее время, так и в будущем. Поэтому при долгосрочном хранении следует рассматривать вопрос о сведении к минимуму последствий потенциальных изменений хранящихся радиоактивных отходов [2].

Научная новизна: впервые проведены работы по исследованию радиоактивного загрязнения воздуха вблизи контейнеров на площадке хранения ОЯТ реактора БН-350.

Практическая ценность: по результатам исследований будет разработана методика определения радиоактивных газов в воздухе на площадке хранения ОЯТ реактора БН-350.

Личный вклад автора: непосредственное участие в планировании и проведении полевых и лабораторных работ: отбор проб воздуха коллектором трития для первой и второй задачи, сбор и анализ все полученных результатов, подготовка отчетной документации

Степень завершенности: так как исследования по данной теме выполняются в рамках НТП 2018-2020 гг., работа будет завершена к концу 2020 г. с представлением разработанной методики «Оценка эманации газов на площадке хранения отработанного ядерного топлива реактора БН-350».

Публикации:

1. Тимонова Л.В., Ляхова О.Н., Абдигамитов Б.А., Бабешкин С.С. Определение радиоактивных газов в атмосферном воздухе в процессе обращения с ОЯТ // Ядерная наука и технологии: тез.докл. II Междунар. науч. Форум, 24-27 июня 2019 г. - Алматы, 2019 С. 181.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ

ОЯТ – отработанное ядерное топливо

МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии

АЭС – атомная электростанция

БН-350 – реактор на быстрых нейтронах (электрическая мощность 350 МВт)

ИВГ.1М – исследовательский высокотемпературный газоохлаждаемый реактор

КИР «Байкал-1 – комплекс исследовательского реактора «Байкал-1»

^{41}Ar – аргон

$^{85m, 87,88}Kr$ – криптон

^{135}Xe – ксенон

UO_2 – двуокись урана

^{88}Rb – рубидий

НТО – тритий в виде тритированной воды

НТ – тритий в виде газообразных соединений

^{214}Pb - свинец

^{214}Bi – висмут

^{40}K – калий

^{222}Rn – радон

Бк/м^3 – беккерель на кубометр

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……..……. 6
1. Объект и методология исследований…… 7
1.1. Адаптация и апробация аналитического оборудования..... 7
1.1.1. Отбор проб воздуха…….…… 8
1.1.2. Результаты экспериментальных исследований…… 9
1.2. Экспериментальные исследования на территории долговременного хранения ОЯТ реактора БН- 15
350…….. 15
1.2.1. Отбор проб 16
воздуха……...…….. 18
1.2.2. Результаты экспериментальных 19
исследований……
Заключение…….…….....
Список использованных источников……..……...……..

ВВЕДЕНИЕ

В 1999 г. реактор БН-350 был остановлен и начались работы по его выводу из эксплуатации. Одним из этапов обращения с ОЯТ БН-350 явилось его размещение на долговременное хранение в металобетонных контейнерах двойного назначения, используемых и для транспортировки, и для хранения [3].

В соответствии с принципами нераспространения и сокращения количества «ядерных площадок» в качестве места долговременного хранения ОЯТ реактора БН-350 решением РК был определен комплекс исследовательских реакторов (КИР) «Байкал-1» Института атомной энергии Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр» РК, куда топливо и было перевезено [3].

Контейнерное хранилище было спроектировано с расчётом на 50-ти летний срок безопасной эксплуатации с учетом требований по герметичности; в проекте предусмотрены средства контроля утечек газообразной охлаждающей среды и фильтры, позволяющие при возможном нарушении герметичности контейнеров, ограничивать выход радиоактивных веществ в допустимых пределах, определяемых нормами радиационной безопасности.

Несмотря на эти требования, нельзя исключать вероятность того, что контейнеры с течением времени могут подвергнуться коррозии и разгерметизации от сырости, протечек и подвижек земной коры. В связи с чем, радиоактивные изотопы выйдут наружу, профильтруются в грунтовые воды и окажут негативное воздействие на окружающую среду [4].

В связи с этим, в данной работе предлагается разработать методику определения радиоактивных газов в воздухе на площадке хранения ОЯТ реактора БН-350, на основе которой осуществлять регулярный мониторинг воздушной среде в месте ее расположения.

В процессе выполнения работы будут разработаны методические рекомендации по измерению качественного и количественного состава радиоактивных газов на площадке хранения ОЯТ.

Целью работы является разработка методики для определения радиоактивных газов на территории хранения ОЯТ реактора БН-350 для оценки целостности защитных барьеров хранилища и, при необходимости, выработки мер по их укреплению.

1. Объект и методология исследований

Для исследования радиоактивного загрязнения воздуха на территории долговременного хранения ОЯТ реактора БН-350 в первую очередь проведена адаптация и апробация аналитического оборудования. Затем проведены исследования радиоактивного загрязнения воздушной среды вблизи контейнеров, содержащие ОЯТ реактора БН-350.

Так как топливом для работы реактора БН-350 служила двуокись урана (UO_2), то основными радиоактивными газами для исследования в воздухе являлись короткоживущие благородные газы: продукт активации аргон (^{41}Ar) и продукты деления урана (^{85m}Kr, ^{87}Kr, ^{88}Kr, ^{135}Xe). Дополнительно, для контроля радиоактивности воздушной среды, проведены исследования по содержанию тритированных газообразных продуктов, которые могут быть представлены в воздухе в виде окисленных (HTO) и газообразных (HT) соединений трития.

1.1. Адаптация и апробация аналитического оборудования

Для исследования радиоактивных газов в воздухе выбраны 2 пробоотборных устройства: криогенное устройство для сжижения воздуха «Пурга» (Рисунок 1) и коллектор трития «OS1700» (Рисунок 2).

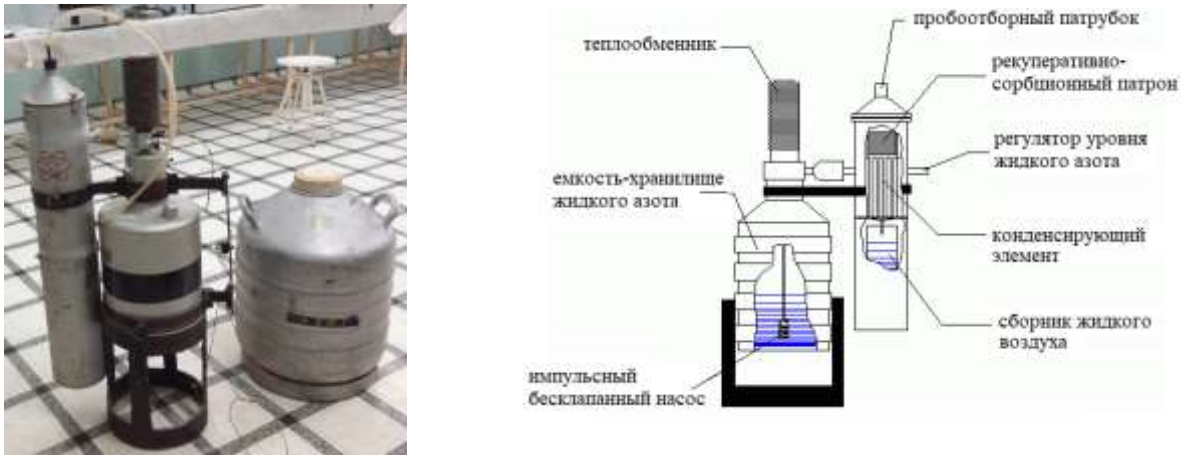


Рисунок 1 – Пробоотборное устройство «Пурга»

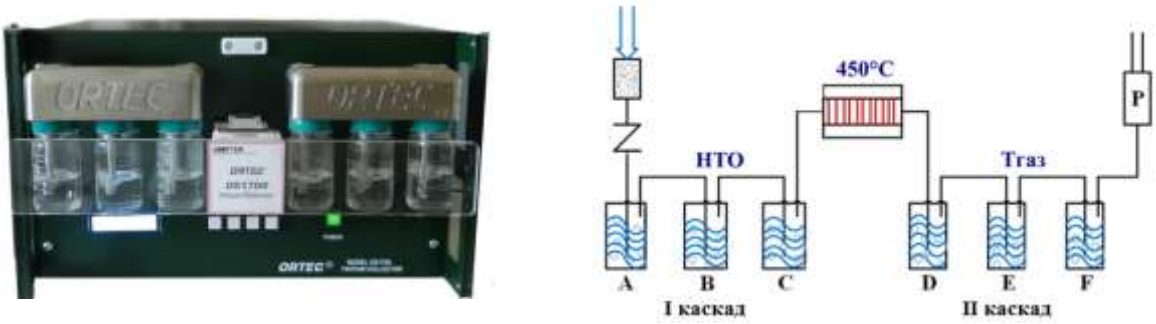


Рисунок 2 – Пробоотборное устройство коллектор трития «OS1700»

Криогенное устройство «Пурга» предназначено для отбора проб газоаэрозольных форм различных радиоактивных и нерадиоактивных примесных фракций, содержащихся в воздухе. Устройство позволяет в процессе пробоотбора получать как совокупную пробу, содержащихся в воздухе газоаэрозольных примесей, так и дифференцированную пробу. В последнем случае, часть компонент примесей в аэрозольной и относительно легкосорбируемой газовой формах задерживается на различных композиционных элементах сорбционно-фильтрующей насадки. При этом благородные и другие

трудносорбируемые газы равномерно распределяются по всему объему сжиженного воздуха. Принцип действия установки основан на способности воздуха сжижаться в том же составе основных компонентов на поверхности, охлаждаемой ниже температуры кипения анализируемого воздуха, имеющего состав: азот (N_2) – 78%, кислород (O_2) - 21% ($T_{кип}$ = - 193°C), но не ниже температуры кристаллизации кислорода [5].

Пробоотборное устройство коллектор трития «OS1700» предназначено для исследования содержания тритированных газообразных продуктов, которые могут быть представлены в воздухе в виде НТО и НТ [6]. Согласно технологической схеме: воздушный поток, поступая в коллектор трития, проходит последовательно через 2 каскада, каждый из которых состоит из 3-х поглотительных емкостей, заполненных поглотительным раствором - водой дистиллированной. На первом каскаде емкостей происходит последовательное очищение воздуха от тритированных паров воды. Далее очищенный поток воздуха проходит через палладиевую спираль, нагретую до 450 °C, где происходит окисление всех газообразных форм трития и их последующее поглощение водой во втором каскаде поглотительных емкостей.

Анализ проб воздуха, отобранных устройством «Пурга», производился на γ-спектрометре GC-1518 фирмы «Canberra». Пробы воздуха, отобранные коллектором трития, анализировались на α-, β- радиометре «SL-300» фирмы «Hidex».

1.1.1. Отбор проб воздуха

Для адаптации и апробации аналитического оборудования проведен ряд экспериментальных исследований на примере реактора ИВГ.1М. Для достижения цели, была обеспечена подача воздуха в пробоотборное оборудование из трубопровода вентиляционной системы В-3 реактора, расположенного в подреакторном помещении (Рисунок 3). Отбор проб воздуха проводился в процессе пусков реактора при мощности 6 МВт.

Рисунок 3 – Отбор проб воздуха из вентиляционной системы реактора ИВГ.1М

Для оценки динамики концентрации радиоактивных газов в процессе проведения пусков, отбор проб воздуха устройством «Пурга» проводился при разных режимах работы

реактора (в начале, в середине и в конце пуска). Отбор проб коллектором трития осуществлялся 1-2 раза за 1 пуск реактора.

1.1.2. Результаты экспериментальных исследований

На рисунках 4-6 представлены результаты первого эксперимента. Отбор проб с трубопровода производился спустя 40 мин после выхода реактора на установленную мощность. На рисунке 4 отображена временная привязка режима отбора проб (временной диапазон проба 1 и проба 2) к режиму работы реактора (красная линия). На рисунках 5 и 6 представлены гамма-спектры измеренных проб.

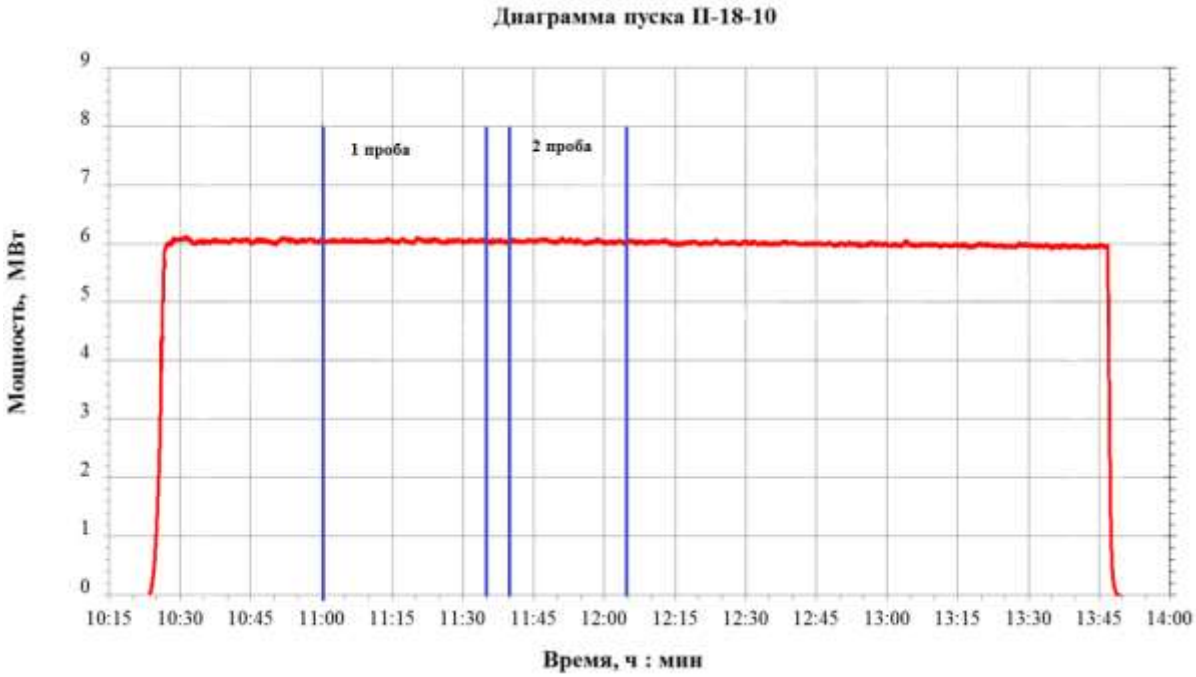


Рисунок 4 – Временная привязка отбора проб к режиму работы реактора

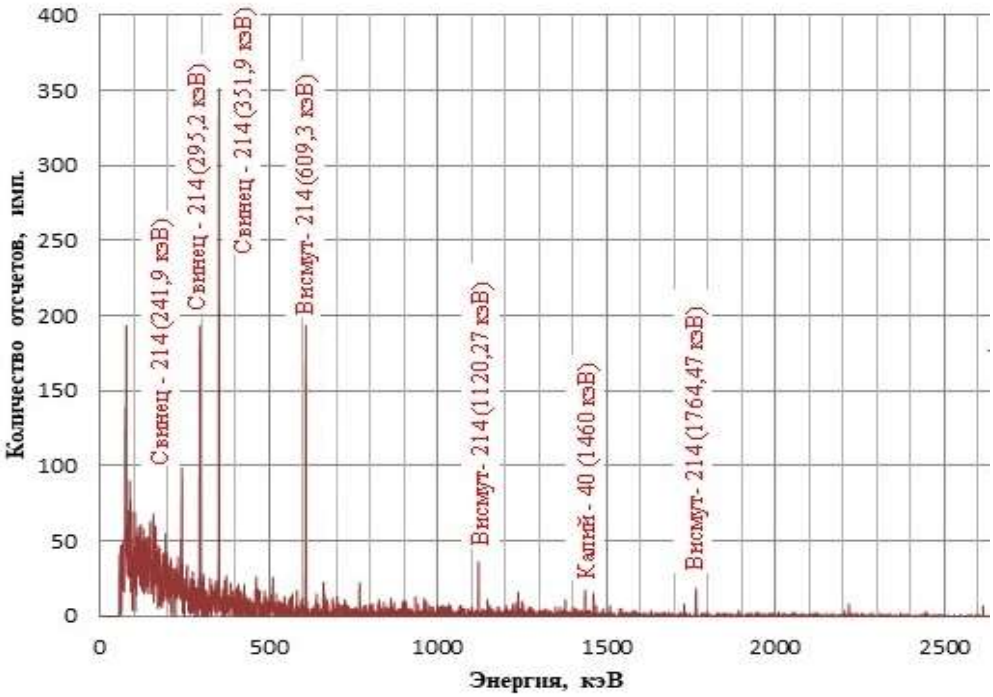


Рисунок 5 – Гамма-спектр пробы №1

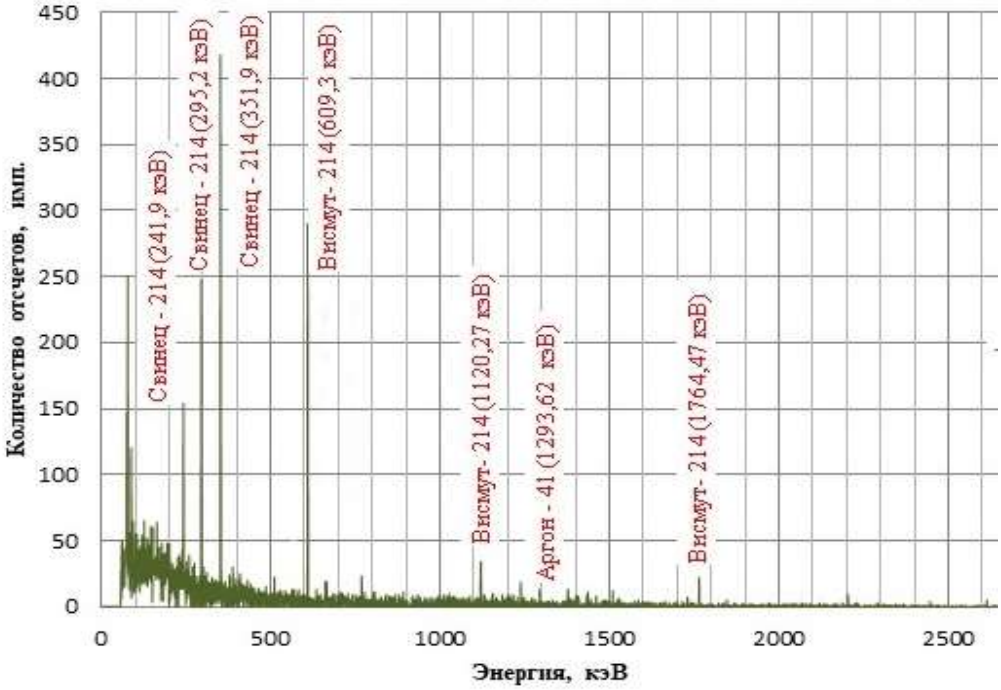


Рисунок 6 – Гамма-спектр пробы №2

Согласно результатам γ-спектрометрических измерений, в пробе №2 обнаружен продукт активации аргона – короткоживущий благородный газ ^{41}Ar, объемная активность которого составила 42 Бк/м^3. Происхождение его объясняется наличием в воздухе изотопов природного ^{40}Ar, который вследствие нейтронной активации преобразуется в ^{41}Ar. Зафиксированные ^{214}Bi и ^{214}Pb являются продуктами распада ^{222}Rn – природного изотопа, относящегося к радиоактивному семейству ^{238}U. Радон является самым тяжелым из благородных газов, в связи с чем, наибольшее его скопление происходит в воздухе подземных коммуникаций. Это объясняет его присутствие в реакторных помещениях, находящихся под землей [5].

В результате проведения β-спектрометрического анализа выявлено присутствие в воздухе газообразных соединений трития НТО и НТ. Объемная активность НТО для первого образца составила 20 Бк/м^3, НТ – 2 Бк/м^3, для второго образца НТО – 15 Бк/м^3, НТ – 3 Бк/м^3. Источником образования трития могла являться нейтронная активация ряда легких элементов, присутствующих в компонентах топлива и других реакторных материалах.

На рисунках 7-9 представлены результаты эксперимента, проведенного в конце пуска реактора: за 40 мин. до снижения мощности и сразу после остановки реактора.

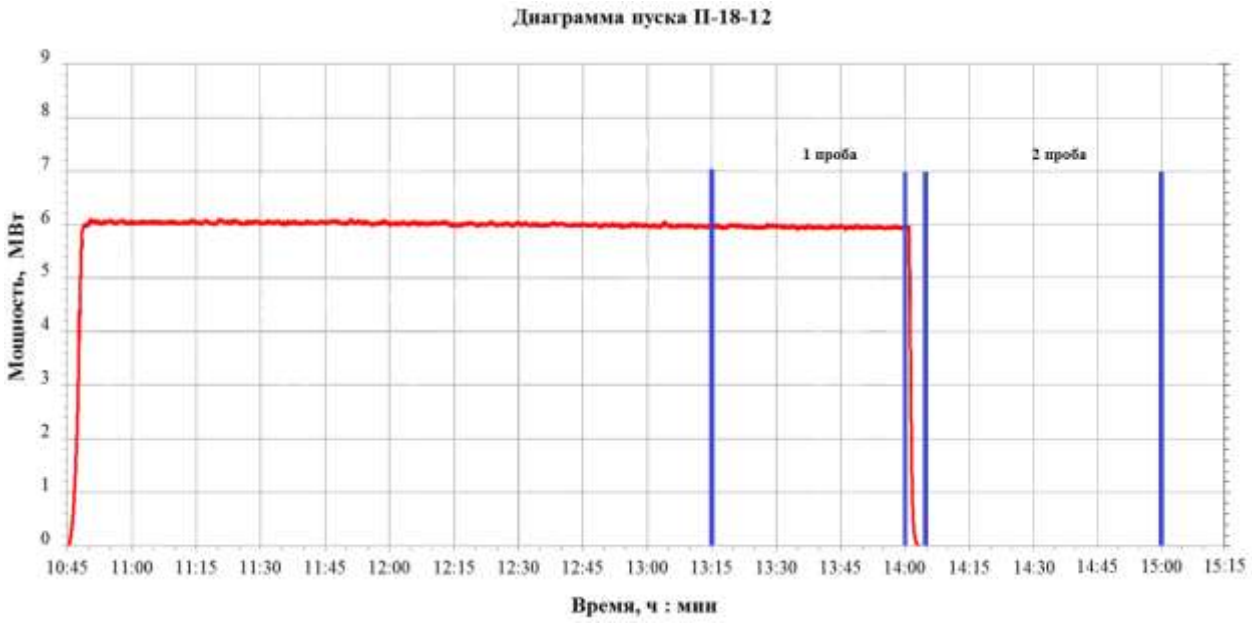


Рисунок 7 – Временная привязка отбора проб к режиму работы реактора

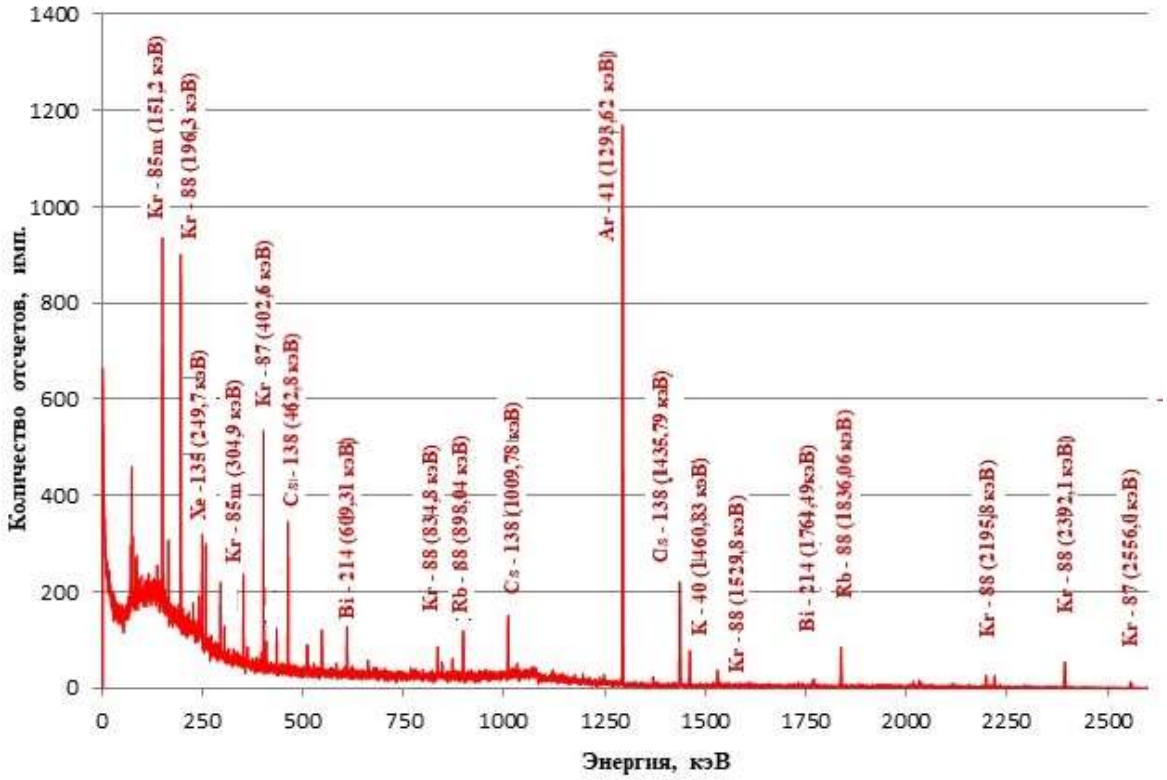


Рисунок 8 – Гамма-спектр пробы №3

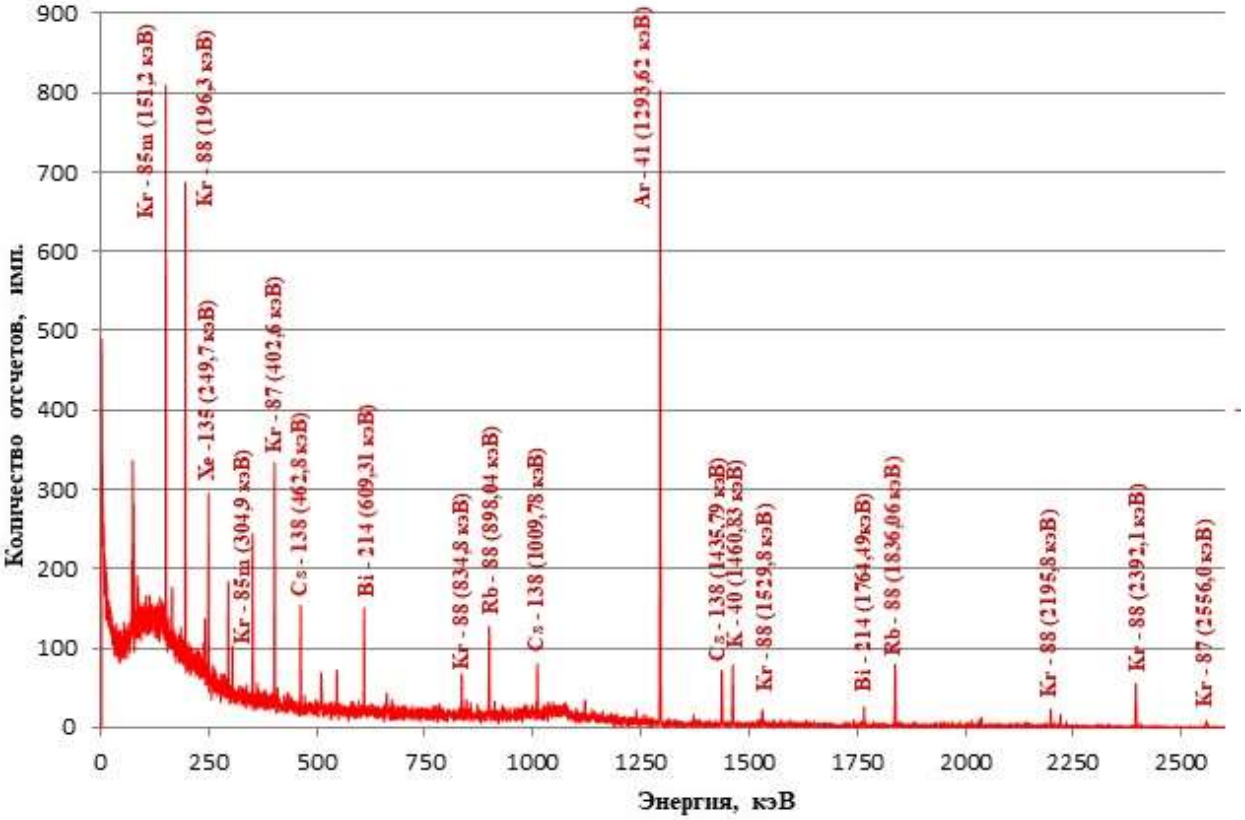


Рисунок 9 – Гамма-спектр пробы №4

По результатам гамма-измерений в отобранных пробах воздуха в конце пуска реактора и после его остановки зафиксированы не только ^{41}Ar, но и другие благородные газы: ^{85m}Kr, ^{87}Kr, ^{88}Kr, ^{135}Xe, которые являются продуктами деления ^{238}U, используемого в качестве реакторного топлива. Первоначально образующейся ^{88}Kr, проникающий через стенки реактора в подреакторное помещение, распадается с образованием ^{88}Rb. В определенный момент времени после начала пуска его содержание начинает увеличиваться до тех пор, пока происходит накопление ^{88}Kr. Далее содержание ^{88}Rb остается постоянным еще некоторое время после завершения пуска, пока ^{88}Kr полностью не распадется. Присутствие ^{138}Cs объясняется наличием Xe, продуктом распада которого он является.

Результаты объемной активности радиоизотопов, зафиксированных в отобранных пробах воздуха №3 и №4 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты объемной активности радиоизотопов, зафиксированных в отобранных пробах воздуха №3 и №4

Изотоп	**Период полураспада, $T_{1/2}$**	**Объемная активность в пробах, кБк/м^3**	
		№3	**№4**
^{41}Ar	1,83 ч	4,20	4,35
^{85m}Kr	4,48 ч	0,25	0,28
^{87}Kr	76,3 мин	0,63	0,72
^{88}Kr	2,84 ч	0,78	0,84
^{88}Rb	17,78 мин	0,26	0,27
^{135}Xe	9,14 ч	0,12	0,13
^{138}Cs	32,2 мин	0,11	0,12
^{214}Bi(продукт распада ^{222}Rn)	19,9 мин	0,29	0,31

Результаты бета-спектрометрического анализа показали, что в отобранных пробах воздуха коллектором трития объемная активность НТО составила порядка 10 Бк/м^3, НТ – 2 Бк/м^3.

Для подтверждения полученных количественных данных экспериментальные исследования были продолжены. В ходе третьего эксперимента отбор проб воздуха производился в конце пуска реактора и в процессе его остановки (Рисунок 10-12).

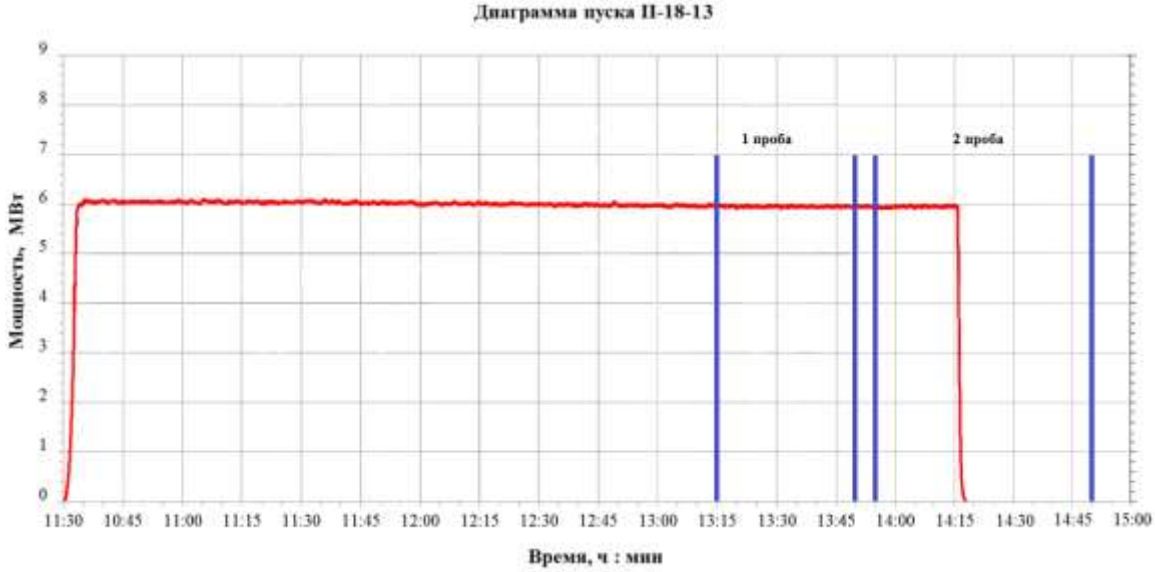


Рисунок 10 – Временная привязка пробоотбора к режиму работы реактора

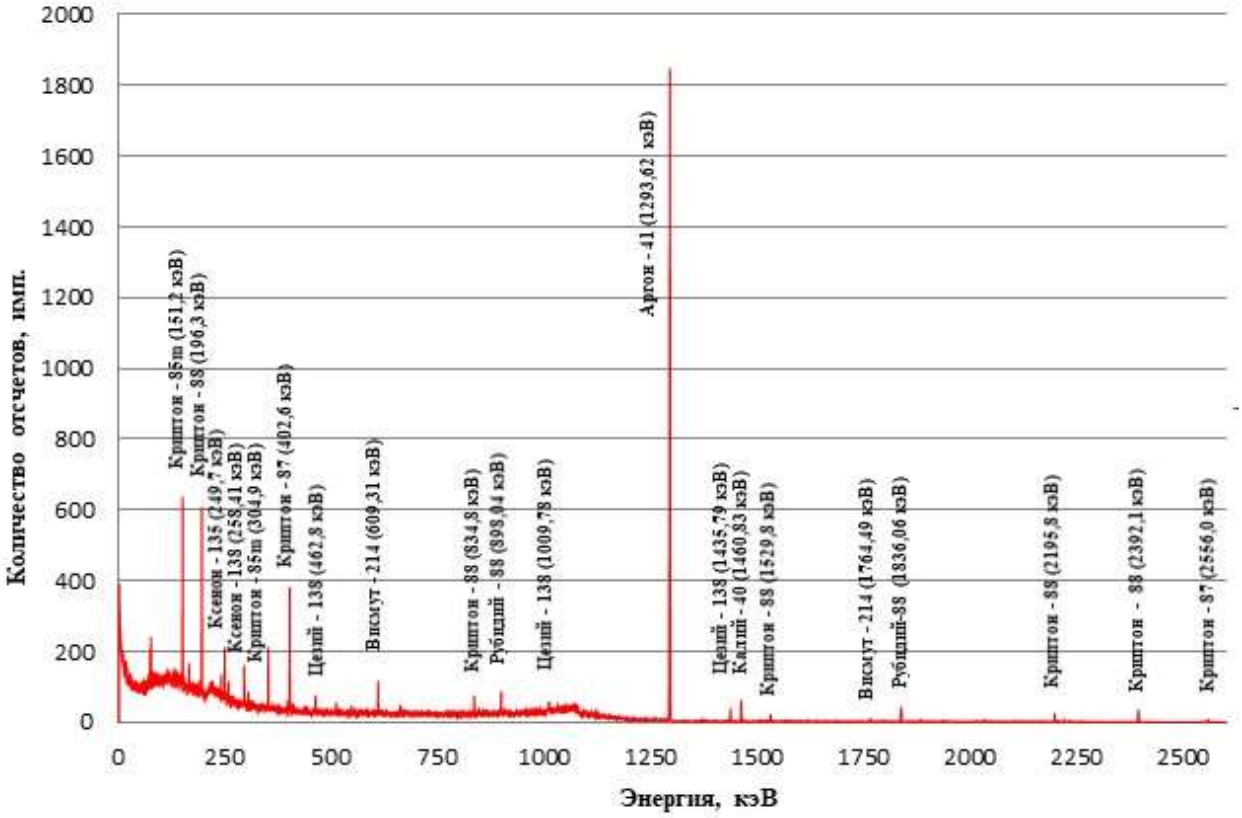


Рисунок 11 – Гамма-спектр пробы №5

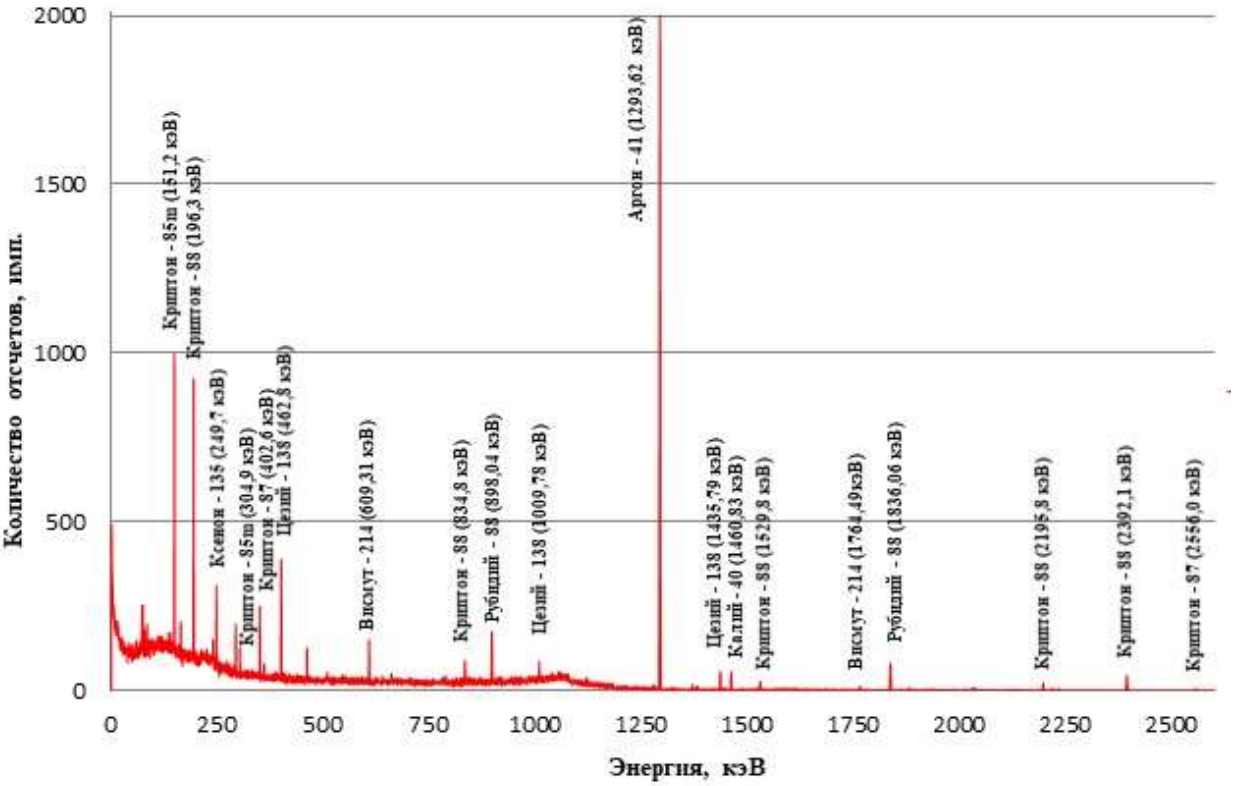


Рисунок 12 – Гамма-спектр пробы №6

Результаты проведенных исследований подтвердили наличие количественных значений радиоактивных газов, которые фиксируются во второй половине пуска реактора, что нельзя сказать об экспериментах, проведенных в начале и середине пусков реактора.

Результаты объемной активности радиоизотопов, зафиксированных в отобранных пробах воздуха №5 и №6 представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты объемной активности радиоизотопов, зафиксированных в отобранных пробах воздуха №5 и №6

Изотоп	**Период полураспада, $T_{1/2}$**	**Объемная активность в пробах, кБк/м^3**	
		№5	**№6**
^{41}Ar	1,83 ч	7,73	9,33
^{85m}Kr	4,48 ч	0,21	0,36
^{87}Kr	76,3 мин	0,67	0,80
^{88}Kr	2,84 ч	0,73	1,32
^{88}Rb	17,78 мин	2,74	6,94
^{135}Xe	9,14 ч	0,06	0,12
^{138}Xe	14,8 мин	0,17	-
^{138}Cs	32,2 мин	0,25	0,56
^{214}Bi(продукт распада ^{222}Rn)	19,9 мин	0,68	0,81

Согласно результатам бета-спектрометрического анализа, объемная активность НТО в отобранных пробах воздуха составила 12 Бк/м^3, НТ – 3 Бк/м^3.

В результате проведения всех экспериментальных исследований на примере реактора ИВГ.1М установлено, что выбранное пробоотборное и спектрометрическое оборудование может быть успешно применено для определения целого ряда радиоактивных газов в воздухе и применимо в качестве аппаратурного обеспечения разрабатываемой методики

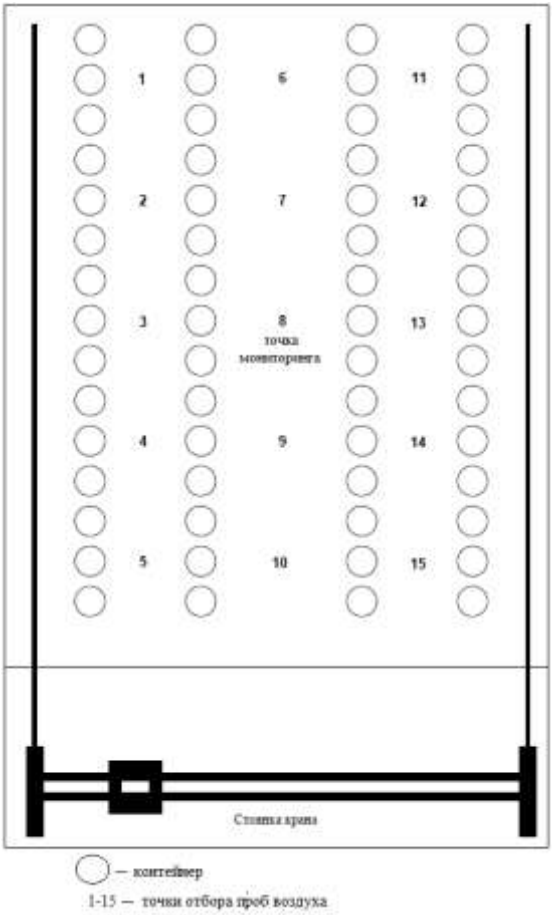
1.2. Экспериментальные исследования на территории долговременного хранения ОЯТ реактора БН-350

Для выявления возможного выхода продуктов деления с контейнеров в окружающую среду проведены исследования радиоактивного загрязнения воздуха на площадке долговременного хранения ОЯТ реактора БН-350.

1.2.1. Отбор проб воздуха

Отбор проб воздуха проводился на исследовательских участках, расположенных между контейнерами, содержащими ОЯТ (Рисунок 13).

Общий вид площадки ДКХОЯТ



Точки отбора проб воздуха

Рисунок 13 – Исследовательские участки на площадке хранения ОЯТ реактора БН-350

Во всех отобранных пробах проведены лабораторные анализы на определение содержания радиоактивных газообразных продуктов. Выбор участков отбора проб основан на схеме расположения контейнеров и расстояния между ними с целью возможности охвата все исследуемой территории. Всего выбрано и исследовано 15 участков. Из них 1 участок (т.8) являлся мониторинговым, на котором отбор проб воздуха производился в ходе пусковых работ реактора ИВГ.1М с целью оценки возможного вклада радионуклидного загрязнения воздуха на территории площадки ДКХОЯТ. На остальных 14-и участках отбор проб производился вне пуска реактора. В связи с конструкцией пробоотборных устройств отбор проб воздуха производился на отметке 0,5 м от бетонного основания площадки.

Перед проведением исследований на территории хранения ОЯТ для оценки вклада фона в помещении расположения γ-спектрометра проведены фоновые измерения во время пуска реактора и в межпусковой период.

1.2.2. Результаты экспериментальных исследований

Результаты γ-спектрометрического анализа показали, что в пробах фона, отобранных в межпусковой период, зафиксированы радионуклиды: ^{212}Pb ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{40}K (Рисунок 14).

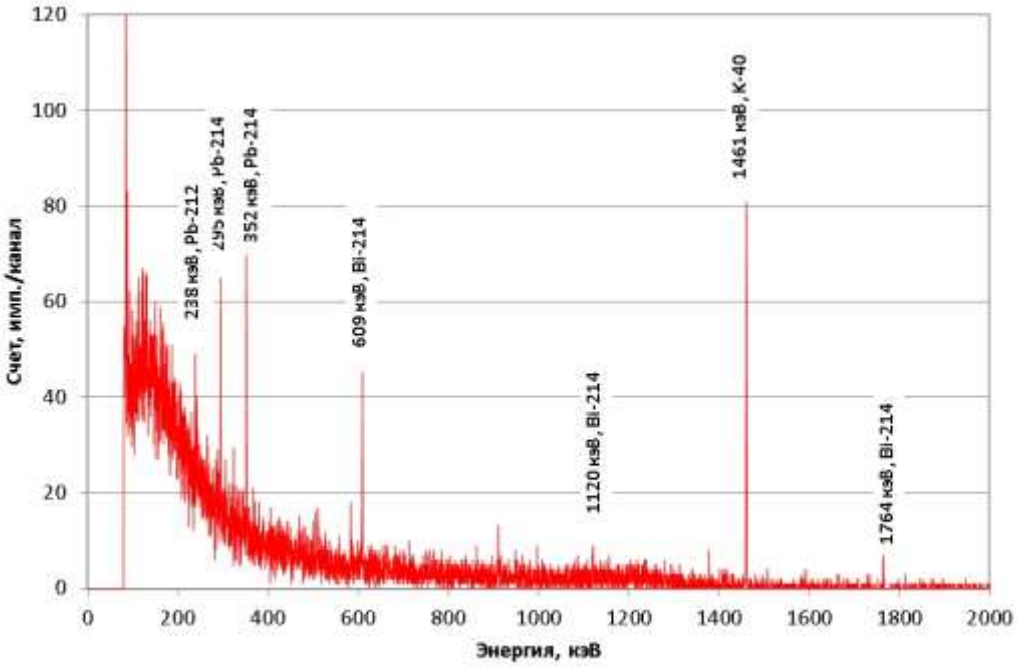


Рисунок 14 – Гамма-спектр измерения фона (межпусковой период)

Радионуклиды ^{214}Pb, ^{214}Bi являются продуктами распада естественного радионуклида ^{222}Rn, содержащегося в воздухе рабочей зоны. Радионуклид ^{40}K входит в состав измерительной стеклянной колбы и в состав стен зданий объекта КИР «Байкал-1».

В ходе изучения фоновых образцов, отобранных в пусковой период, зафиксировано присутствие следов ^{41}Ar (Рисунок 15).

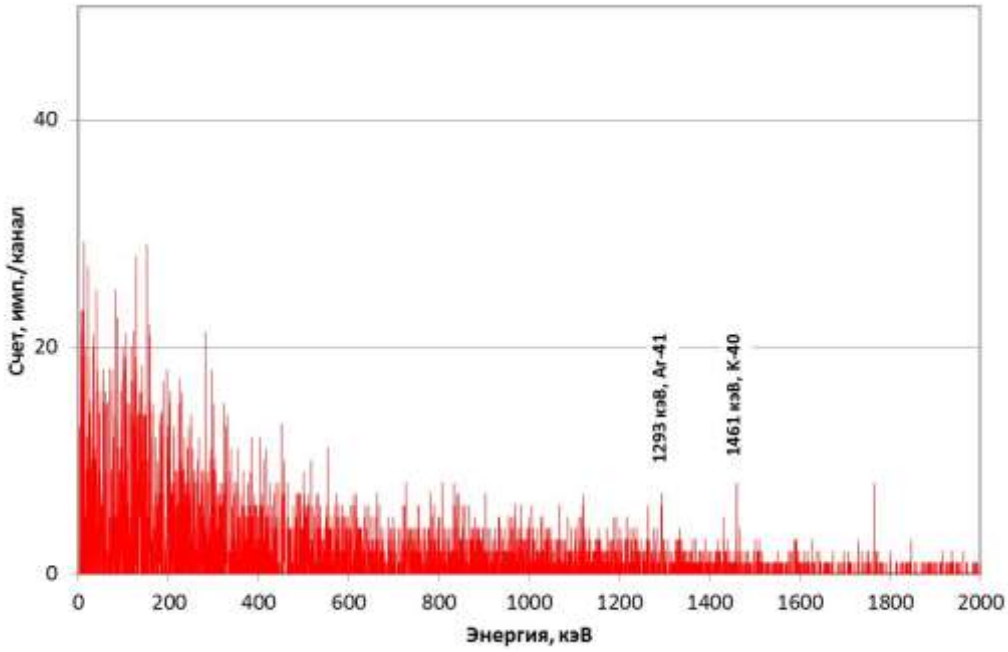


Рисунок 15 – Гамма-спектр измерения фона (пусковой период)

На площадке хранения ОЯТ для исследований радиоактивных газов в воздухе как в ходе пуска, так и вне пуска реактора ИВГ.1М всего отобрано и проанализировано 39 проб

воздуха. Из них отобрано криогенным устройством «Пурга» 20 проб, коллектором трития «OS1700» - 19 проб.

На рисунках 16 и 17 представлен вид гамма-спектров, полученных при измерении проб воздуха, отобранных в межпусковой период и в период пуска реактора.

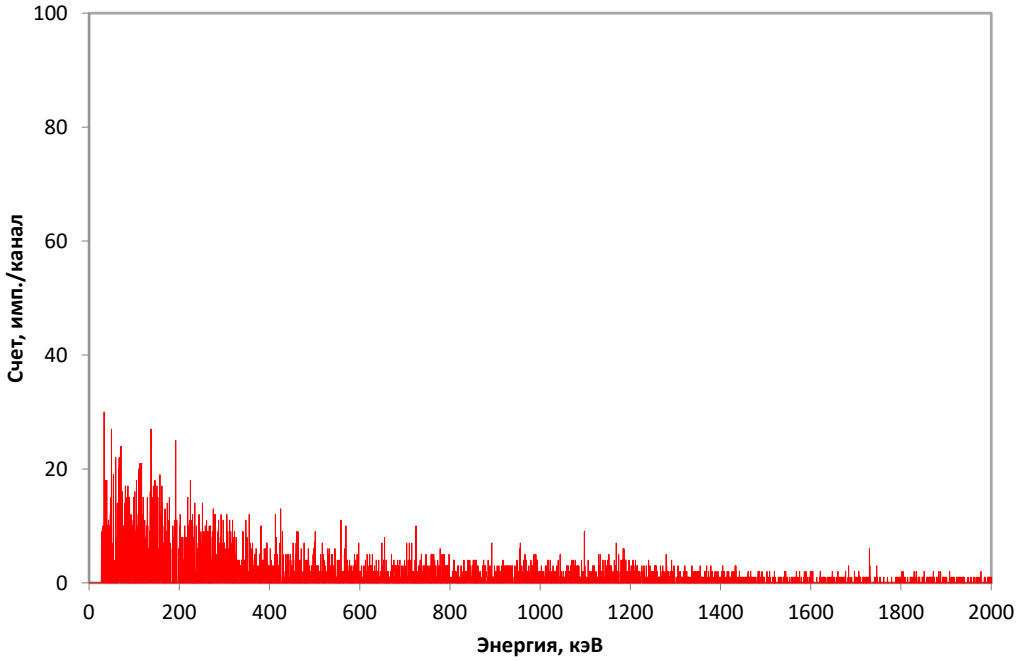


Рисунок 16 – Гамма-спектр пробы воздуха, отобранной в межпусковой период

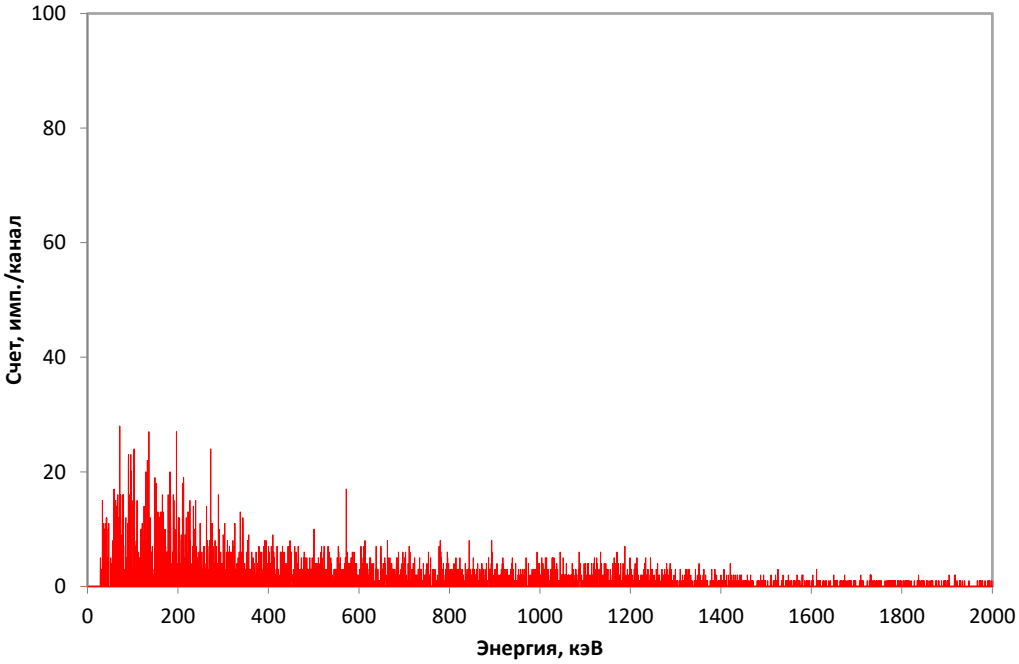


Рисунок 17 – Гамма-спектр пробы воздуха, отобранной в пусковой период

Согласно лабораторным анализам, вблизи контейнеров, содержащих ОЯТ, численных значений объемной активности благородных радиоактивных газов и соединений ^{3}H в воздушной среде не зафиксировано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ на примере реактора ИВГ.1М в ходе пусков зафиксированы количественные значения благородных радиоактивных газов: активационный продукт ^{41}Ar и продукты деления ^{238}U (^{85m}Kr, ^{87}Kr, ^{88}Kr, ^{135}Xe). Так же в ходе исследований зафиксированы газообразные соединения трития в виде НТО и в виде НТ.

Полученные результаты дают основание считать, что данное оборудование применимо для использования при исследовании радиоактивных газов в месте хранения ОЯТ реактора БН- 350.

При исследовании радиоактивного загрязнения в воздухе на территории площадки хранения ОЯТ реактора БН-350 объемная активность радионуклидов в воздушной среде составила менее предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения. Это говорит о том, что радиационное состояние вокруг контейнеров стабильное. Таким образом, на данный момент можно сказать об отсутствии формирования радиоактивного загрязнения на исследуемой территории площадки хранения ОЯТ реактора БН-350 и ненарушенности герметичности контейнеров

Полученные данные позволяют подтвердить качественную применимость аналитического оборудования и правильность разработанной методологии исследования радиоактивных газов в воздухе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Teller M. О современном методе хранения отработавшего ядерного топлива. - 2017. – Режим доступа: https://habr.com/post/400511/.

2 Хранение радиоактивных отходов. Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды. // Руководство по безопасности № WS – G-6.1, Вена, 62 с. – Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1254r_web.pdf.

3 Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по проведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние / Н.А. Назарбаев, В.С. Школьник, Э.Г. Батырбеков и др. – Курчатов, 2016. – Том III, 596 с. (С. 78)

4 Новое решение проблемы безопасного хранения отработавшего ядерного топлива [электронный ресурс] / Самаров В.Н., д.т.н., Хомяков Е.И., к.т.н, Непомнящий В.З., к.т.н. «Лаборатория Новых Технологий»; Левин Б.В., чл-корр. РАН (Дальневосточное отделение); Романовский Н.Н., проф., МГУ, 2006. – Режим доступа: http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=570.

5 Сергеев В.Ю., Сергеев В.Ю., Ляхова О.Н. Применение криогенного пробоотборника «ПУРГА-К» для определения радиоактивных выбросов в атмосферу // Вестник НЯЦ РК. – 2004. – Вып.1. – С. 69 – 74.

6 Тимонова Л.В., Ляхова О.Н., Турченко Д.В. и др. Оптимизация методики определения газообразного трития в воздушной среде // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы: тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф., 24-26 сентября, 2014. - Курчатов, 2014. – С. 94-95. ISBN978-601-7112-85-1.