

Л. Тұрсынбек¹, А.К. Мухамедиев¹, Қ.Т. Советов¹, А.Р. Бейбитова¹

¹Институт атомной энергии, НЯЦ РК

Казахстан, Курчатов

(e-mail: Tursynbek@nnc.kz)

**ОБОСНОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВРЕМЕННОМ ХРАНЕНИИ
ОТРАБОТАВШЕГО ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО УРАНОВОГО ТОПЛИВА
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М**

Аннотация. В работе представлено обоснование ядерной безопасности при временном хранении отработавшего высокообогащенного уранового топлива (ВОУ) исследовательского реактора ИВГ.1М. Цель исследования заключалась в оценке уровня критичности в различных сценариях временного хранения и в проверке соответствия условий хранения нормативным требованиям.

На основе нейтронно-физических расчетов методом Монте-Карло с применением кода MCNP5 показано, что предложенная схема хранения обеспечивает достаточную степень защиты от критичности, соответствует требованиям нормативных документов Республики Казахстан и международных стандартов МАГАТЭ. Представлены расчетные параметры, рассмотрены аварийные сценарии, проанализированы полученные значения эффективного коэффициента размножения нейтронов (k_{eff}), которые остаются в пределах ядерной безопасности даже при отклонениях от нормальных условий.

Ключевые слова: ядерная безопасность, отработавшее ядерное топливо, критичность, MCNP5, нейтронно-физическое моделирование, нормативные требования, конверсия топлива.

Tursynbek L.¹, Sovetov K.T.¹, Beybitova A.R.¹, Mukhamediyev A.K.¹

Institute of Atomic Energy, NAC RK

Kazakhstan, Kurchatov

(e-mail: Tursynbek@nnc.kz)

**JUSTIFICATION OF NUCLEAR SAFETY DURING TEMPORARY STORAGE OF SPENT
HIGHLY ENRICHED URANIUM FUEL FROM THE IVG.1M RESEARCH REACTOR**

Abstract. This paper presents the justification of nuclear safety during the temporary storage of spent highly enriched uranium (HEU) fuel from the IVG.1M research reactor. The aim of the study was to assess the level of criticality under various temporary storage scenarios and to verify compliance of storage conditions with regulatory requirements.

Based on neutron-physical calculations using the Monte Carlo method with the MCNP5 code, it is demonstrated that the proposed storage configuration provides a sufficient margin of subcriticality and complies with the regulatory documents of the Republic of Kazakhstan and international IAEA standards. Calculated parameters are presented, emergency scenarios are considered, and the obtained values of the effective neutron multiplication factor (k_{eff}) are analyzed. The results confirm that k_{eff} remains within nuclear safety limits even under deviations from normal conditions.

Keywords: nuclear safety, spent nuclear fuel, criticality, MCNP5, neutron-physical modeling, regulatory requirements, fuel conversion.

Л. Тұрсынбек¹, А.К. Мухамедиев¹, Қ.Т. Советов¹, А.Р. Бейбитова¹

¹ Атом энергиясы институты, НЯЦ РК

Қазақстан, Курчатов

(e-mail: Tursynbek@nnc.kz)

**ИВГ.1М ЗЕРТТЕУ РЕАКТОРЫНЫҢ ЖОҒАРЫ БАЙЫТЫЛҒАН ПАЙДАЛАНЫЛҒАН
УРАН ОТЫНЫНЫҢ УАҚЫТША САҚТАЛУЫ КЕЗІНДЕ ЯДРОЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІКТІ
НЕГІЗДЕУ**

Аңдатпа. Бұл жұмыста ИВГ.1М зерттеу реакторының жоғары байытылған пайдаланылған уран отынын (ЖБУО) уақытша сақтау кезіндегі ядролық қауіпсіздік негізделген. Зерттеудің мақсаты — уақытша сақтау сценарийлерінде критикалық деңгейін бағалау және сақтау жағдайларының нормативтік талаптарға сәйкестігін тексеру.

MCNP5 коды негізінде Монте-Карло әдісімен жүргізілген нейтрон-физикалық есептеулер көрсеткендей, ұсынылған сақтау сызбасы критикалылықтан жеткілікті қорғанысты қамтамасыз етеді және Қазақстан Республикасының нормативтік құжаттарының талаптарына, сондай-ақ МАГАТЭ-нің халықаралық стандарттарына сәйкес келеді. Есептеу параметрлері ұсынылған, апаттық сценарийлер қарастырылған, нейтрондардың тиімді көбею коэффициентінің (k_{eff}) алынған мәндері талданған, олар қалыпты жағдайлардан ауытқу кезінде де ядролық қауіпсіздік шегінде қалады.

Түйінді сөздер: ядролық қауіпсіздік, пайдаланылған ядролық отын, критикалылық, MCNP5, нейтрон-физикалық модельдеу, нормативтік талаптар, отынды конверсиялау.

Введение. Безопасное обращение с отработавшим высокообогащённым топливом исследовательских реакторов активно исследуется в рамках международной и национальной практики. В документах МАГАТЭ представлены основные принципы хранения ОЯТ, включая требования к критичности и радиационной защите. Подобные исследования проводились и в рамках программы RERTR, реализуемой в сотрудничестве с Argonne National Laboratory [1], где использовались расчётные методы с применением кода MCNP. В ряде работ, выполненных российскими и казахстанскими специалистами [3, 4], рассматривались условия безопасного хранения ВОО, аналогичные тем, что реализованы на объекте КИР «Байкал-1».

Топливо, использовавшееся в исследовательском реакторе ИВГ.1М до начала программы конверсии, представляло собой тепловыделяющие сборки с металлическим ураном, сплавленным с цирконием (U-Zr), обогащённым до 90%. Такое высокообогащённое топливо применялось в исследовательских целях ввиду высокой плотности урана и способности обеспечить высокую тепловыделяющую мощность в компактных активных зонах.

Одна из основных задач при эксплуатации исследовательских ядерных реакторов — обеспечение безопасного обращения с отработавшим ядерным топливом. Это особенно важно в случае высокообогащённого урана, который ранее применялся в исследовательском реакторе ИВГ.1М в Казахстане. До начала программы конверсии в

марте 2010 года в реакторе использовалось топливо с уровнем обогащения до 90%, что представляло значительный риск как с точки зрения радиационной, так и ядерной безопасности. В рамках конверсии высокообогащённое топливо было заменено на топливо с уровнем обогащения до 20%, а отработанные сборки переведены на временное хранение. Проведение этих мероприятий требует всестороннего обоснования ядерной безопасности, с учётом возможных аварийных сценариев — таких как затопление, утрата герметичности контейнеров и другие потенциальные инциденты.

Материалы и методы. Для оценки безопасности были выполнены нейтронно-физические расчёты с использованием программного комплекса MCNP5, разработанного в Лос-Аламосской национальной лаборатории (США). Метод Монте-Карло позволяет проводить прецизионное моделирование переноса нейтронов в сложных геометрических структурах. При проведении расчётов использована библиотека ядерных данных ENDF/B-VI.1, а замедление нейтронов моделировалось с учётом таблиц $S(\alpha, \beta)$ для воды. Расчётная модель при моделировании геометрии шахты хранилища (1600×4000×1550 мм), параметры пеналов из стали 12X18H10T, заполненных обрезанными ТВЭлами из сплава U-Zr. Всего рассматривались два режима загрузки (11 и 104 чехла) и три условия: нормальные, затопление без повреждений и с повреждением пеналов. Внешний вид хранилища представлен на рисунке 1.

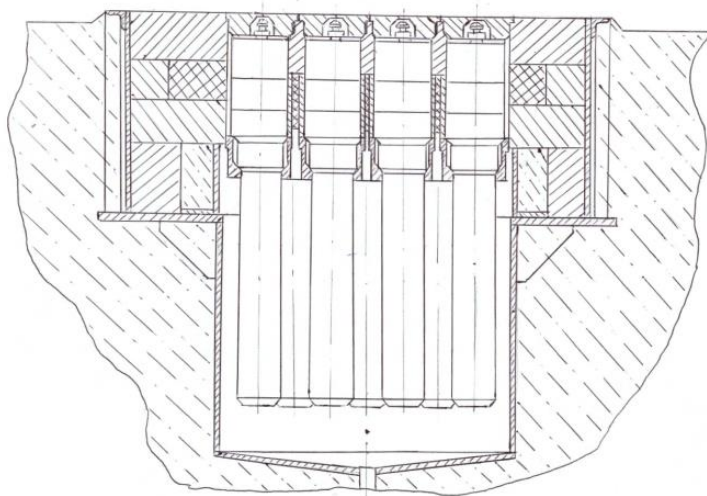


Рисунок 1. – Внешний вид заглубленной ниши для хранения ОЯТ исследовательского реактора ИВГ.1М в хранилище

Примечание – составлено автором

Хранилище представляет собой заглубленную конструкцию из армированного бетона, предназначенную для временного хранения отработавших ТВС в условиях пассивной безопасности. Толстые бетонные стены обеспечивают как радиационную защиту, так и температурную инерционность, сохраняя устойчивость к внешним воздействиям.

Результаты и их обсуждение. План размещения ОЯТ. В рамках расчета рассматривается размещение всего 11 ячеек хранения. Это количество обусловлено тем, что к перемещению планируется 30 отработавших тепловыделяющих сборок (ТВС) и 2 дополнительные ТВС, точное назначение которых в данной работе не рассматривается, что соответствует размещению в 11 чехлах по 3 ТВС каждый, согласно конструкторской документации. Таким образом, требуется использование только 11 ячеек из общего числа доступных (104).

Размещение чехлов хранения осуществляется в центральной части заглубленной ниши, что объясняется следующими соображениями:

- минимизация асимметрии распределения источников нейтронов и, как следствие, повышение достоверности расчетной модели;
- удаление активных зон от стенок

хранилища снижает вероятность локальных эффектов отражения нейтронов, что делает расчет более консервативным;

- размещение по центру способствует упрощению и унификации процедур укладки и извлечения ТВС, а также повышает удобство инспекционного и визуального контроля.

Дополнительно были рассмотрены **расчетные сценарии полной загрузки всех 104 ячеек**. Несмотря на то, что подобная загрузка **не предполагается в рамках текущей кампании**, ее анализ важен по следующим причинам:

- проверка **предельного, наиболее консервативного** сценария с максимальным количеством делящегося материала;
- демонстрация **запаса ядерной безопасности** даже в случае потенциального расширения объема хранения в будущем;
- учет **возможных отклонений от нормальной эксплуатации**, включая ошибочную или аварийную загрузку дополнительных ТВС.

Нормальное состояние. Упаковка ОЯТ в ячейки хранилища осуществляется следующим образом:

- Каждая ТВС (в количестве 32 штук: 30 основных и 2 дополнительных) предварительно размещается в

двухцелевой трёхместный чехол, изготовленный из коррозионно-стойкой стали марки 12Х18Н10Т. Один чехол вмещает три ТВС.

- Таким образом, формируется **11 комплектов**, каждый из которых включает один чехол с тремя ТВС.
- Чехлы транспортируются в хранилище и размещаются **в ячейках, предусмотренных в заглубленной нише**, без затопления и без повреждения оболочек пеналов.
- На этапе хранения предполагается **отсутствие воды в нише**, и расчет ведется на сухую систему (в нормальных условиях), что соответствует наиболее вероятной эксплуатационной ситуации.

Все операции выполняются с использованием стандартных процедур перемещения и укладки, утвержденных в рамках «Решения об организации работ по перемещению ВОУ-топлива ИР ИВГ.1М».

Эффективный коэффициент размножения составляет:

- для 11 ячеек
- для 104 ячеек

Аварийные условия. 1. **Затопление водой** — предполагается поступление воды в зону хранения в результате внешних или внутренних факторов (например, аварий в системе водоснабжения, нарушений герметичности конструкции или дренажа). Вода, как замедлитель нейтронов,

существенно изменяет нейтронно-физическую картину, способствуя увеличению k_{eff} .

1. **Разрушение пеналов** — рассматривается ситуация механического повреждения чехлов, в которых размещено топливо. В таком случае возможно сближение тепловыделяющих сборок, изменение их ориентации, а также непосредственный контакт с замедлителем (водой), что является наиболее консервативным вариантом.

Рассмотрение этих сценариев необходимо, поскольку:

- соответствует нормативным требованиям по ядерной безопасности;
- позволяет оценить поведение системы в условиях потенциальных отказов или человеческого фактора;
- демонстрирует запас безопасности конструкции хранилища в экстремальных ситуациях;
- служит инструментом анализа рисков и предотвращения нежелательных последствий.

Даже в условиях полного затопления и разрушения пеналов значения k_{eff} остаются ниже критического предела (0,98), что подтверждает **безопасность хранения ОЯТ при аварийных воздействиях**.

Результаты расчетов эффективного коэффициента размножения (k_{eff}) для всех конфигураций хранения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов

Варианты загрузки ячеек	Варианты расчетных конфигураций	Эффективный коэффициент размножения, $k_{eff} \pm \sigma$
11 ячеек	Нормальные условия хранения	0,02377±0,00005
	Аварийная ситуация без нарушения целостности пеналов	0,24407±0,00020
	Аварийная ситуация с нарушением целостности пеналов	0,33638±0,00021
104 ячейки	Нормальные условия хранения	0,06290±0,00007
	Аварийная ситуация без нарушения целостности пеналов	0,25346±0,00019
	Аварийная ситуация с нарушением целостности пеналов	0,34298±0,00026

Примечание – составлено автором

Когда в хранилище загружено только 11 ячеек, и всё находится в нормальном состоянии, активность системы очень низкая — коэффициент k_{eff} всего 0,02377. Это значит, что никаких условий для начала цепной реакции нет.

Если представить, что хранилище окажется затопленным, но контейнеры при этом останутся целыми, активность повышается — до 0,24407. А если вода попадёт внутрь контейнеров (при нарушении герметичности), то значение уже поднимается до

0,33638.

При полной загрузке топливом поведение похожее: в обычных условиях — безопасный уровень 0,06290, при затоплении — около 0,25, и почти 0,34 — если вода попадёт внутрь.

В любом случае значения остаются ниже предела 0,95, установленного национальными стандартами и рекомендациями МАГАТЭ. Эти результаты подтверждают безопасность выбранной схемы хранения даже при аварийных условиях.

Расчеты выполнены для следующих картограмм загрузки ячеек хранения:

- 1) с 11 заполненными ячейками в соответствии с картограммой размещения, приведенной на рисунке 2;
- 2) 11 ячеек были выбраны для расчётов как репрезентативная часть общей конфигурации. Расчеты в данной конфигурации

позволяют подтвердить допустимость выбранной схемы хранения и оценить поведение системы при частичной загрузке. Такой подход типичен для анализа критичности и обоснования безопасности при различных условиях эксплуатации.

3) полностью заполненными ячейками (104 ячейки).

4) Полностью заполненные 104 ячейки отражают проектную максимальную загрузку хранилища, используемую для оценки критичных сценариев безопасности. Конфигурация предполагает равномерное заполнение ячеек, однако для уточнения методов размещения и возможных ограничений рекомендуется обсудить детали с эксплуатационными службами или проектной организацией.

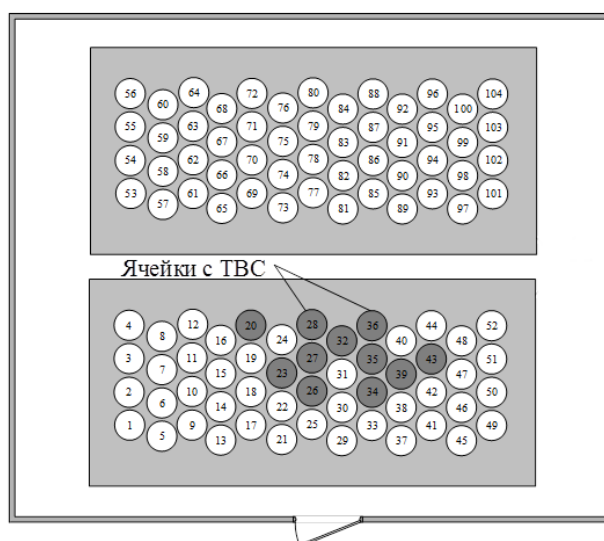


Рисунок 2 . Расчетная картограмма размещения ОЯТ в помещении хранилища КИР «Байкал-1»

Примечание – составлено автором

Результаты и их обсуждение. Значения k_{eff} в условиях нормальной эксплуатации как для частичной (11 ячеек), так и для полной загрузки (104 ячейки) составляют 0,02377 и 0,06290 соответственно, что на порядок ниже допустимого предельного уровня 0,95. Это свидетельствует о значительном запасе по критичности, заложенном в проект хранения. Даже при рассмотрении наиболее неблагоприятного сценария — полном затоплении хранилища с

повреждением пеналов — значения коэффициента размножения остаются существенно ниже критического порога ($k_{eff} = 0,33638$ для 11 ячеек и 0,34298 для полной загрузки). Такие показатели подтверждают высокую устойчивость системы к внешним воздействиям и аварийным ситуациям.

Важно отметить, что наибольшее увеличение k_{eff} наблюдается именно при затоплении с нарушением герметичности пеналов, что обусловлено возможным

сближением активного материала и увеличением плотности замедляющей среды (воды), эффективно термализующей нейтроны. Тем не менее, расчёты показывают, что даже в этом случае условия остаются в пределах нормативных требований.

Выбор временного хранения в чехах в защитной нише объясняется как технической реализуемостью, так и соответствием международной практике. Конструкция хранилища, основанная на пассивных принципах безопасности (рассеивание, дистанцирование, геометрическое самозащищённое размещение), обеспечивает отсутствие условий для возникновения цепной реакции при любых реалистичных сценариях.

Для получения более точной информации о конструкции чехлов и технологических особенностях хранения рекомендуется дополнительно проконсультироваться с техническими специалистами, участвовавшими в разработке и эксплуатации системы.

Кроме того, представленные данные подчеркивают необходимость строгого соблюдения проектных параметров при эксплуатации и последующем контроле состояния хранилища. Применение метода Монте-Карло и кода MCNP5 с актуальными ядерными библиотеками позволило достичь высокой точности расчетов и адекватно учесть сложную геометрию объекта и физические свойства материалов.

Заключение. Результаты нейтронно-физического моделирования, представленные в данной работе, подтверждают ядерную безопасность системы временного хранения отработавшего высокообогащённого уранового топлива (ВОУ) исследовательского реактора ИВГ.1М на объекте КИР «Байкал-1».

Расчёты эффективного коэффициента размножения нейтронов (k_{eff}) для различных вариантов загрузки и возможных аварийных ситуаций показали, что во всех рассмотренных сценариях значения k_{eff} остаются значительно ниже предельно допустимого уровня, установленного нормативными требованиями.

Таким образом, можно сделать

вывод, что временное хранение отработавшего ВОУ топлива в чехах на объекте КИР «Байкал-1» является безопасным с точки зрения предотвращения самопроизвольной цепной реакции.

Использование программного комплекса MCNP5 позволило с высокой точностью воспроизвести физические процессы в системе и подтвердить обоснованность принятых технических решений. Полученные результаты могут быть применены при разработке нормативной документации, модернизации существующих систем хранения и развитии ядерных технологий в Республике Казахстан.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Travelli A. The RERTR Program: Status and Plans. — Argonne National Laboratory, 2000. <https://www.osti.gov/biblio/761202>
2. IAEA. Storage of Spent Nuclear Fuel: Safety Guide SSG-15. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016. <https://www.iaea.org/publications/10500/storage-of-spent-nuclear-fuel>
3. Шаталов А.Н., Бурдуков С.А., Лисовский В.Н. Обоснование условий безопасного хранения БОУ в исследовательских реакторах России // Ядерная и радиационная безопасность. — 2018. — № 2 (90). — С. 15–24. <https://www.atomic-energy.ru/articles/2018/05/14/86591>
4. Есимов А.А., Жансеитова Г.Б. Нейтронно-физические расчёты при хранении отработанного топлива исследовательского реактора ИВГ.1М // Вестник НЯЦ РК. — 2021. — № 4. — С. 55–61. через библиотеку Национального ядерного центра Республики Казахстан или eLIBRARY.RU
5. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. LA-UR-03-1987.
6. IAEA Safety Standards: Storage of Spent Nuclear Fuel. Vienna: IAEA, 2016.
7. Закон РК «Об использовании атомной энергии», № 442-V ЗРК, 2016.
8. Санитарные правила РК «О радиационной безопасности», 2020.

References

1. Travelli, A. *The RERTR Program: Status and Plans*. Argonne National Laboratory, 2000. Available at: <https://www.osti.gov/biblio/761202>
2. International Atomic Energy Agency (IAEA). *Storage of Spent Nuclear Fuel: Safety Guide SSG-15*. Vienna: IAEA, 2016. Available at: <https://www.iaea.org/publications/10500/storage-of-spent-nuclear-fuel>
3. Shatalov, A.N., Burdukov, S.A., Lisovsky, V.N. *Justification of Conditions for Safe Storage of HEU in Research Reactors in Russia*. Nuclear and Radiation Safety, 2018, No. 2 (90), pp. 15–24. Available at: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2018/05/14/86591>
4. Yesimov, A.A., Zhanseitova, G.B. *Neutronic Calculations for Spent Fuel Storage of the IVG.1M Research Reactor*. Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, 2021, No. 4, pp. 55–61. Available through the library of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan or via eLIBRARY.RU
5. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. LA-UR-03-1987.
6. International Atomic Energy Agency (IAEA). *IAEA Safety Standards: Storage of Spent Nuclear Fuel*. Vienna: IAEA, 2016.
7. *Law of the Republic of Kazakhstan “On the Use of Atomic Energy”*, No. 442-V ZRK, 2016.
8. *Sanitary Rules of the Republic of Kazakhstan “On Radiation Safety”*, 2020.

Авторлар туралы мәлімет/Сведения об авторах/Information about the author

Тұрсынбек Лаура

Лауазымы: техникалық физика мамандығы бойынша бакалавр, инженер

Атом энергиясы институты, НЯЦ РК

Пошталық мекен-жайы: 071100, Қазақстан, Курчатов қ., Бейбіт Атом көшесі, 10

Ұялы. Тел +7 708 768 1900

E-mail: Tursynbek@nnc.kz

Тұрсынбек Лаура

Должность: бакалавр по специальности «техническая физика», инженер

Институт атомной энергии НЯЦ РК

Почтовый адрес: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбит Атом, 10

Сот. тел: +7 708 768 1900

E-mail: Tursynbek@nnc.kz

Tursynbek Laura

Education: Bachelor in Technical Physics, Engineer

Institute of Atomic Energy, NAC RK

Address: 071100, Kazakhstan, Kurchatov, 10 Beybit Atom St.

Mob.phone: +7 708 768 1900

E-mail: Tursynbek@nnc.kz

Советов Қуанышбек Тұрсынбекұлы

Лауазымы: техникалық физика мамандығы бойынша бакалавр, инженер

Атом энергиясы институты, НЯЦ РК

Пошталық мекен-жайы: 071100, Қазақстан, Курчатов қ., Бейбіт Атом көшесі, 10

Ұялы. Тел +7 705 281 6911

E-mail: Sovetov_K@nnc.kz

Советов Қуанышбек Тұрсынбекұлы

Должность: бакалавр по специальности «техническая физика», инженер

Институт атомной энергии НЯЦ РК

Почтовый адрес: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбит Атом, 10

Сот. тел: +7 705 281 6911

E-mail: Sovetov_K@nnc.kz

Sovetov Kuanyshbek Tursynbekuly

Education: Bachelor in Technical Physics, Engineer

Institute of Atomic Energy, NAC RK

Address: 071100, Kazakhstan, Kurchatov, 10 Beybit Atom St.

Mob.phone: +7 705 281 6911

E-mail: Sovetov_K@nnc.kz

Бейбитова Айсана Ракатовна

Лауазымы: техникалық физика мамандығы бойынша бакалавр, инженер

Атом энергиясы институты, НЯЦ РК

Пошталық мекен-жайы: 071100, Қазақстан, Курчатов қ., Бейбіт Атом көшесі, 10

Ұялы. Тел +7 705 211 6451

E-mail: beibitova@nnc.kz

Бейбитова Айсана Ракатовна

Должность: бакалавр по специальности «техническая физика», инженер

Институт атомной энергии НЯЦ РК

Почтовый адрес: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбит Атом, 10

Сот. тел: +7 705 211 6451

E-mail: beibitova@nnc.kz

Beybitova Aisana Rakatovna

Education: Bachelor in Technical Physics, Engineer

Institute of Atomic Energy, NAC RK

Address: 071100, Kazakhstan, Kurchatov, 10 Beybit Atom St.

Mob.phone: +7 705 211 6451

E-mail: beibitova@nnc.kz

Мухамедиев Асхат Кспекович

Лауазымы: ядролық физика мамандығы бойынша табиғаттану бакалавр, инженер

Атом энергиясы институты, НЯЦ РК

Пошталық мекен-жайы: 071100, Қазақстан, Курчатов қ., Бейбіт Атом көшесі, 10

Ұялы. Тел +7 722-517 4340

E-mail: mukhamediev@nnc.kz

Мухамедиев Асхат Кспекович

Должность: бакалавр естествознания по специальности «ядерная физика», инженер

Институт атомной энергии НЯЦ РК

Почтовый адрес: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбит Атом, 10

Сот. тел: +7 722-517 4340

E-mail: mukhamediev@nnc.kz

Mukhamediyev Askhat Kspekovich

Education: Bachelor of Natural Sciences in Nuclear Physics, Engineer

Institute of Atomic Energy, NAC RK

Address: 071100, Kazakhstan, Kurchatov, 10 Beybit Atom St.

Mob.phone: +7 722-517 4340

E-mail: mukhamediev@nnc.kz