Лаура Нұрланқызы Сеймуханова – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1438-6568.
Диас Рустемұлы Мулдаш – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: muldashevdias@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2883-261X.
Шыңғысхан Темірханұлы Султахан – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: Shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.
Мұрат Тоқтар – PhD, қауымдастырылған профессор, оқытушы, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: m.toktar@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0953-7491.

Information about the authors
Ulan Yerzhanuly Zhantikeyev* – Master of Technical Sciences, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.
Laura Nurlanovna Seimukhanova – Master of Technical Sciences, Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: lauraseimuhanova@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1438-6568.
Dias Rustemuly Muldash – Master of Technical Sciences, Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: muldashevdias@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2883-261X.
Shynggyskhan Temirkhanuly Sultakhan – Master of Technical Sciences, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: Shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2195-755X.
Murat Toktar – PhD, Associate Professor, Lecturer, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: m.toktar@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0953-7491.

Поступила в редакцию 02.06.2026
Поступила после доработки 04.09.2026
Принята к публикации 11.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-94

МРНТИ: 58.91.41; 29.36.21

CC BY 4.0
Check for updates

Ю.Ю. Бакланова*, В.В. Яковлев, О.С. Букина, В.В. Бакланов
Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК
180010, Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт Атом, 10
*e-mail: basalai@nnc.kz

ИММОБИЛИЗАЦИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В БИТУМНОЙ МАТРИЦЕ

Аннотация: *В статье представлен комплексный аналитический обзор современных научно-технических подходов к кондиционированию и иммобилизации жидких радиоактивных отходов (ЖРО) низкого и среднего уровней активности методом битумирования. Авторами подробно описаны служебные преимущества и макрокинетические ограничения использования гетерогенных углеводородных матриц, а также сформулированы строгие нормативные требования к физико-химическим свойствам компаундов и солевому составу фиксируемых технологических флюидов. Проведен детальный сопоставительный анализ фракционного состава различных марок промышленных битумов, включая продукцию ТОО «Павлодарский нефтехимический завод». В работе систематизированы параметры периодического и непрерывного экструзионного процессов. Проанализированы ключевые внутренние факторы, определяющие предел соленаполнения, динамическую вязкость смесей, их радиационную стойкость, термостабильность и долговременную гидрофобность в условиях контакта с подземными водами. Показана необходимость предварительного исследования фазового состава ЖРО и оценки их совместимости с битумом для предотвращения экзотермических реакций. Рассмотрены требования к условиям безопасного промежуточного хранения и последующего*

©Ю.Ю. Бакланова, В.В. Яковлев, О.С. Букина, В.В. Бакланов, 2026

обращения с битумированными отходами. Отмечено, что при выборе оптимальной технологии отверждения необходимо учитывать пожароопасность матрицы, радиационно-индуцированные изменения ее свойств (эффекты радиолиза) и риски долгосрочной биодеградации. Научная ценность работы заключается в формировании обоснованных рекомендаций по ограниченному применению метода битумирования в рамках реализации программы развития атомной энергетики в Республике Казахстан.

Ключевые слова: *жидкие радиоактивные отходы, битумирование, иммобилизация, битумная матрица, соленаполнение, радиационная стойкость, радиолиз, кондиционирование РАО.*

Введение

Битумирование относится к методам кондиционирования преимущественно жидких и влажных высокосолевых радиоактивных отходов. Метод основан на включении сухого остатка отходов в битум — высокомолекулярную смесь углеводородов, получаемую главным образом после удаления легких фракций из нефти. Отверждение ЖРО низкого и среднего уровней активности осуществляют путем смешения отходов с расплавленным битумом и термического обезвоживания полученной смеси.

Промышленное применение метода началось в 1960-х годах: первая полномасштабная установка была введена в эксплуатацию в Бельгии в 1964 году. В дальнейшем битумирование применялось в ряде европейских стран и в Советском Союзе.

К преимуществам метода относят сравнительно простое аппаратурное оформление, доступность матричного материала, относительно невысокую температуру процесса, совместимость битума с отходами различного состава и возможность значительного включения растворимых солей. Битумированные продукты характеризуются водостойкостью, а объем конечного продукта в определенных режимах может не превышать объем исходных ЖРО. Вместе с тем горючесть битума, вероятность экзотермического взаимодействия с отдельными компонентами отходов и изменение свойств матрицы со временем ограничивают область применения технологии.

Цель работы – систематизация условий и технологических факторов, определяющих возможность иммобилизации ЖРО в битумной матрице, а также рассмотрение ограничений метода с точки зрения безопасного хранения и дальнейшего обращения с битумированными отходами.

Материалы и методы анализа

Рассмотрение технологии основано на анализе физико-химических характеристик битумов, требований к составу ЖРО и описанных в литературе особенностей битумирования. В исходном материале приведены сравнительные характеристики марок БНК-2, БН-1, БНД 60/90, БНД 40/60, БН-3 и БН-4, включая фракционный состав, температуру размягчения и вспышки, пенетрацию и потерю массы при нагревании. Отмечено, что указанным характеристикам соответствует битум марки БНД 60/90 производства ТОО «Павлодарский нефтехимический завод».

При выборе марки битума и технологического режима учитывают совместимость отходов с матричным материалом, допустимую степень включения сухого остатка, вязкость смеси, условия обезвоживания, удержание радионуклидов и свойства продукта, необходимые для транспортирования, хранения и возможного захоронения.

В качестве основных факторов рассматриваются радиационная стойкость битума; температура процесса и вязкость; содержание и природа солевого наполнителя; кислотность и химический состав отходов; возможное газообразование, пенообразование и протекание экзотермических реакций; влияние добавок на свойства компаунда. В исходном тексте не приведены составы конкретных экспериментальных партий, количество испытаний, примененные измерительные методики и индивидуальные протоколы измерений, поэтому эти параметры в статье не конкретизируются.

Основная часть

Основные характеристики и ограничения метода битумирования

Битумирование представляет собой процесс включения преимущественно жидких или «влажных» высокосолевых радиоактивных отходов (РАО) в битумные материалы, представляющие собой высокомолекулярные смеси углеводородов, получаемые главным образом после отгонки легких фракций из природной нефти. Отверждение ЖРО низкого и среднего уровней активности проводят путем их смешения с расплавленным битумом и термического обезвоживания полученной смеси [1].

Первая полномасштабная установка битумирования была введена в эксплуатацию в Бельгии в 1964 году. В дальнейшем технология получила широкое применение во Франции, Германии, Финляндии, Советском Союзе, Чехословакии и других странах.

К достоинствам битумирования относятся простота аппаратурного оформления, относительная доступность матричного материала, невысокая температура процесса, совместимость битума с отходами различного состава и возможность сокращения объема конечного продукта переработки. Существенными преимуществами являются высокая водостойкость и значительная степень включения растворимых солей (до 50 % масс.). Кроме того, при определенных режимах битумирования объем отвержденных отходов может не увеличиваться по сравнению с объемом исходных ЖРО. Основные ограничения метода связаны с горючестью матричного материала, возможностью его экзотермического взаимодействия с отдельными компонентами отходов при повышенной температуре, а также изменением свойств битума с течением времени.

При битумировании РАО важными характеристиками битума являются фракционный состав, пенетрация, температура размягчения и вспышки, вязкость, плотность, потеря массы при нагревании, адгезия и радиационная стойкость [2].

При включении РАО в битум матрица должна сохранять требуемые свойства в составе конечного продукта, что ограничивает допустимое количество отходов на единицу объема получаемого компаунда. Ограничения относятся прежде всего к общему содержанию твердых веществ, содержанию нитратов, удельной активности, тепловыделению и выщелачиванию радионуклидов. Существенное значение имеют радиационные эффекты, обусловленные присутствующими радионуклидами, поскольку битум представляет собой высокомолекулярную смесь углеводородов, способную подвергаться радиолизу. При облучении протекают радиолиз углеводородов с образованием продуктов разложения, химические реакции компонентов битума и содержащихся в нем веществ с радикалами, образующимися при облучении, а также процессы окисления битума. Различные виды битума характеризуются неодинаковой радиационной стойкостью.

Установлено, что с увеличением степени окисления битума скорость образования радиолитических продуктов снижается. Одновременно с образованием газообразных радиолитических продуктов происходят окисление и частичная полимеризация. Интенсивность этих процессов возрастает с увеличением содержания ненасыщенных углеводородов в битуме. Битум можно безопасно использовать до тех пор, пока общая доза за время захоронения не превысит 10^7 Гр. При дозе 10^8 Гр и выше существенно изменяются структура материала и соотношение С/Н, а также образуются газовые пузырьки, что может привести к увеличению объема матрицы на 14-30%. При использовании герметичных упаковок и накоплении газов (водорода и метана) возможно повышение давления внутри упаковок с битумированными РАО. Это, в свою очередь, потенциально может привести к деформации или разрушению упаковок, утечке радионуклидов в окружающую среду и пожару, создавая риск нарушения долговременной целостности хранилища [3].

Для иммобилизации РАО, в том числе жидких, используются марки битумов, приведенные в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, указанным требованиям соответствует битум марки БНД 60/90, производимый ТОО «Павлодарский нефтехимический завод».

Для получения качественной битумной матрицы выбирают подходящую марку битума. Перед отверждением жидких радиоактивных отходов проводят лабораторные исследования физико-химического состава РАО и их взаимодействия с битумом для определения:

- совместимости отходов с битумным материалом;
- оптимальных границ включения отходов;
- технологических параметров процесса битумирования;
- конечных свойств получаемого компаунда с учетом условий его хранения, транспортирования и возможности окончательного захоронения.

При сложном составе битума и РАО между их компонентами могут протекать различные взаимодействия, влияющие на состав смеси в процессе перемешивания и свойства конечного продукта. Например, нитрат натрия связывается с битумом слабыми сорбционными взаимодействиями, тогда как нитраты тяжелых металлов могут вступать с битумом в химическое взаимодействие окислительного характера. В отдельных случаях

такое взаимодействие может сопровождаться экзотермическим эффектом, пенообразованием, газовыделением и воспламенением смеси. Связь битума с соединениями многовалентных металлов может также иметь адсорбционный характер, причем такая связь прочнее, чем у соединений щелочных элементов.

Таблица 1 – Физико-химические и структурные характеристики промышленных марок битумов

Наименование контролируемого показателя	БНК-2	БН-1	БНД 60/90	БНД 40/60	БН-3	БН-4
1. Фракционный состав, масс. %:						
– масляная фракция (суммарно)	67,6	55,2	59,8	56,4	55,0	49,0
в т.ч. парафино-нафтеновые углеводороды	22,5	22,6	23,8	28,6	–	15,8
в т.ч. моноциклические ароматические	7,0	5,0	13,6	8,6	–	8,3
в т.ч. полициклические ароматические	38,1	24,6	21,6	19,2	–	24,9
– смолы нефтяные	21,5	21,3	22,2	23,4	26,0	20,1
– асфальтены	10,6	20,7	19,0	19,2	16,0	27,9
2. Температура размягчения (КиШ), °С	38,0	44,0	47,0	53,0	49,0	67,5
3. Температура вспышки в открытом тигле, °С	240,0	180,0	200,0	200,0	200,0	230,0
4. Глубина проникания иглы (пенетрация) при 25 °С, 0,1 мм	183,0	130,0	66,0	42,0	54,0	23,0
5. Потеря массы при нагреве до 160 °С за 5 ч, масс. %	1,0	1,0	–	–	1,0	1,0
2. Температура размягчения (КиШ), °С	38,0	44,0	47,0	53,0	49,0	67,5

К процессу битумирования РАО предъявляются следующие требования, которые необходимо учитывать при выборе технологического режима:

– включение ЖРО целесообразно проводить при температуре, обеспечивающей практически полное обезвоживание при минимальном улетучивании радионуклидов и масляных компонентов битума;

– вязкость битума должна обеспечивать эффективное смешение с компонентами отходов и полное удаление конечной смеси из аппарата;

– конечный продукт должен содержать максимально возможное количество сухого остатка отходов (соленаполнение) и одновременно обладать свойствами, обеспечивающими эффективное удержание отходов и стойкость к выщелачиванию.

Для обеспечения безопасного долговременного хранения и возможности захоронения битумированных РАО необходимо учитывать следующие граничные условия.

Радиационная стойкость. Для снижения радиационных повреждений битумной матрицы общая доза ее облучения не должна превышать 10^7 Гр. Поэтому для битумирования пригодны РАО низкого и среднего уровней активности после таких предварительных процессов, как фильтрование, осаждение, ионный обмен, сжигание и упаривание, а именно шламы, зола, отработавшие ионообменные смолы, пульпы и концентраты.

Температура процесса и вязкость. Для обеспечения обезвоживания смеси температура технологического процесса не должна быть ниже температуры кипения раствора. Например, при включении в битум нитрата натрия температура должна быть не ниже 120 °С. Для эффективного смешения с наполнителем (РАО) и возможности слива битумной массы из аппарата необходимо поддерживать оптимальное значение вязкости. Для битумов обычно оптимальная температура процесса битумирования составляет 130-140 °С, когда битум находится в жидком состоянии.

Вязкость и соленаполнение. Вязкость в значительной степени изменяется при увеличении доли наполнителя (РАО) и ограничивает количество включаемого сухого остатка отходов. Конечный продукт с достаточно высокой степенью закрепления радионуклидов (скорость выщелачивания радионуклидов при хранении в контакте с водой 10^{-4}-10^{-5} г/(см²·сут)) может быть получен при включении в битум не более 40-50 % обезвоженных солей. Предельные величины включения зависят от состава отходов.

Степень включения в битум гигроскопических соединений ограничивается: для ионообменных смол – не более 20-30%, для кристаллогидратов (например, тетрабората натрия) – не более 20%. Фильтрующие материалы типа перлита и датолита при включении в битум в количестве более 10 % приводят к его структурированию (затвердеванию). Однако

общую степень включения в битум можно увеличить до 70% введением в смесь солевого наполнителя, например нитрата или сульфата натрия. При этом введение нитрата натрия в количестве более 20% приводит к заметному увеличению вязкости и температуры размягчения.

Не рекомендуется подвергать битумированию кислые растворы с высоким содержанием нитратов железа и алюминия, которые могут окислять битум и изменять его термопластические свойства. При битумировании сильнощелочных растворов со значением pH > 12 может происходить омыление органических соединений, входящих в состав битума, что снижает его водоустойчивость. Наиболее благоприятным является битумирование нейтральных и щелочных отходов с pH < 12. При битумировании отходов со значением pH около 11 увеличиваются биоцидные свойства битумированных отходов, что важно для предупреждения микробиологических повреждений при некоторых вариантах захоронения отходов.

Применение добавок широко используется при битумировании отходов для увеличения степени их включения в битумный компаунд, оптимизации технологического процесса, повышения качества отвержденного продукта и, соответственно, надежности долговременного захоронения. Например, прочное удержание трибутилфосфата (ТБФ) достигается с использованием добавок глины или ПВА; добавление таких компонентов снижает выщелачивание цезия на 2-3 порядка [4].

Технология реализации

Технологический процесс битумирования ЖРО может быть периодическим или непрерывным. В периодическом процессе в аппарат с внутренними или внешними электронагревателями подают порцию битума, затем в горячий битум (температура не выше 220°С) при постоянном перемешивании подают порцию ЖРО в виде кубовых остатков, пульп или шламов.

В аппарате-битуматоре происходит испарение воды из ЖРО, а твердый остаток распределяется в битумной массе. После достижения заданной степени наполнения РАО битумно-солевой компаунд подают в узел расфасовки и затем сливают в упаковки. В качестве упаковок, пригодных для транспортирования и хранения, используют стальные бочки и контейнеры; при необходимости для захоронения упаковки помещают в невозвратные железобетонные контейнеры. В схему технологического процесса может быть включена стадия предварительной подготовки ЖРО, позволяющая увеличить производительность аппарата битумирования. Установка битумирования оснащается системой очистки конденсата, выделяющихся газов и аэрозолей (рис. 1).

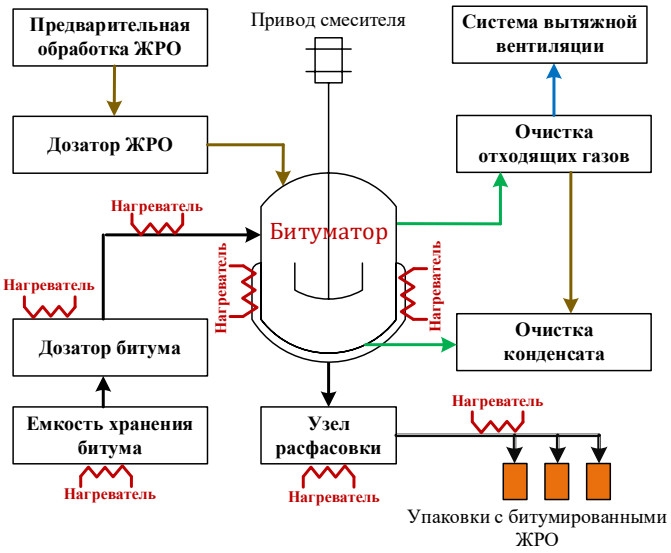


Рисунок 1 – Схема периодического процесса битумирования

При непрерывном процессе подача битума и ЖРО осуществляется в экструдер, где происходят перемешивание, обезвоживание и дегазация с последующей подачей битумированных ЖРО в узел расфасовки.

Обсуждение результатов

Приведенные сведения показывают, что битумирование нельзя рассматривать как универсальный способ обращения со всеми видами ЖРО. Возможность его применения определяется не только уровнем активности отходов, но и их солевым, химическим и радионуклидным составом, а также характеристиками выбранной марки битума [5].

Особое внимание следует уделять радиационным и пожарным рискам. Радиолиз может приводить к образованию газов и изменению структуры матрицы, а реакции отдельных компонентов отходов с битумом – к тепловыделению и газообразованию. Эти процессы имеют значение для целостности упаковок и долговременной безопасности хранения. В статье также отмечена возможность микробиологического воздействия на битум после снижения уровня излучения; радиационно измененные органические фрагменты могут становиться более доступными для микроорганизмов.

С технологической точки зрения компромисс между высоким соленаполнением и приемлемой вязкостью является одним из ключевых условий процесса. Повышение содержания отходов может уменьшать количество матричного материала, но одновременно ухудшать смешение, выгрузку и свойства конечного продукта [8-10]. Поэтому предельные значения наполнения следует рассматривать с учетом конкретного состава ЖРО, а не как универсальные нормативы.

Опыт применения битумирования, изложенный в исходной статье, свидетельствует о постепенном сокращении его использования на ряде новых объектов в пользу других методов, в частности цементирования с предварительной селективной сорбцией и глубоким упариванием. При этом битумирование может сохранять практическую значимость на объектах с действующими установками или при необходимости перевода накопленных жидких отходов в твердое состояние для промежуточного хранения, если альтернативные технологии еще не внедрены либо недоступны.

Заключение

Метод битумирования жидких радиоактивных отходов имеет ограниченную область применения и может использоваться для кондиционирования низко- и среднеактивных РАО (НАО и САО), содержащих продукты деления с относительно короткими и средними периодами полураспада. К основным изотопам-маркерам относятся ^{137}Cs и ^{90}Sr.

Применение технологии направлено на удержание радионуклидов в течение расчетного периода стабильности углеводородной матрицы (до 30-50 лет), за который интегральная активность отходов снижается до безопасных пределов. По истечении данного периода битумированные компаунды, согласно изложенному в исходном материале подходу, подлежат извлечению и повторному кондиционированию (переконсервации).

В ходе долгосрочного хранения возможно радиационно-индуцированное микробиологическое воздействие на битумную матрицу. В начальный период высокая мощность поглощенной дозы бета- и гамма-излучения обеспечивает выраженный стерилизующий эффект, ингибируя жизнедеятельность микрофлоры на поверхности компаунда. Со временем радиолиз может приводить к деструкции высокомолекулярных цепей битума с образованием газов и низкомолекулярных органических кислот. При снижении удельной активности РАО ниже критического порога выживания микроорганизмов естественная микрофлора хранилищ может колонизировать матрицу, а радиационно измененные фрагменты могут служить более доступными субстратами, что потенциально ускоряет деструкцию защитного барьера.

Несмотря на масштабное внедрение технологии в 1970-1980-х годах, современные международные тенденции характеризуются сокращением применения битумирования в пользу методов низкотемпературного цементирования, сопряженного с предварительной селективной сорбцией цезия/стронция и глубоким упариванием кубовых остатков. Одной из причин такого подхода являются требования к пожаровзрывобезопасности объектов хранения и захоронения.

Опыт зарубежных стран позволяет сделать вывод, что в условиях модернизации радиохимического производства в Республике Казахстан битумирование может быть ограниченно использовано при обязательном проведении предварительных лабораторных исследований совместимости отходов с битумами. Такой подход может быть рассмотрен в случаях, когда на конкретном ядерном объекте уже функционирует промышленная установка битумирования, текущие объемы накопления ЖРО требуют их иммобилизации для

обеспечения промежуточной безопасности либо современные технологии (включение в геополимеры, полиэфирные смолы или витрификация) еще не внедрены в промышленную эксплуатацию или экономически недоступны на текущем этапе.

Список литературы

1. Милютин В.В. Современные методы переработки жидких радиоактивных отходов / В.В. Милютин, П.В. Козлов, Н.А. Некрасова. – 2-е изд. – Озерск; Москва: Озерский технологический институт – филиал НИЯУ «МИФИ», 2021. – 172 с.
2. Захарова К.П. Битумирование жидких радиоактивных отходов: оценка безопасности и опыт эксплуатации / К.П. Захарова, О.Л. Масанов // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89, вып. 2. – С. 112-119.
3. Radiolysis of bituminized radioactive waste: a comprehensive review / L. Millot et al // EPJ Nuclear Sci. Technol. – 2024. – Vol. 10, Art. 4. https://doi.org/10.1051/epjn/2024004.
4. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами. – Вена: Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), 2005. – 114 с. – (IAEA-TCS-27).
5. Извлечение твердых радиоактивных отходов из хранилищ при их консервации способом битумирования: монография / Н.В. Чегонов и др. – Москва: Радиохимия-издат, 2023. – 156 с.
6. Анализ радиационной и биологической стойкости матричных материалов, применяемых при кондиционировании низко- и среднеактивных отходов / Е.Т. Коянбаев и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2023. – № 2. – С. 45-52. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-45-52.
7. Оценка гидрофобных и структурных изменений битумированных компаундов при длительном промежуточном хранении / В.В. Бакланов и др. // Комплексное использование минерального сырья. – 2024. – № 4(331). – С. 18-25. https://doi.org/10.31643/2024/6445.42.
8. IAEA. Option Assessment for Decommissioning and Legacy Waste Management of Bitumen-Containing Disposal Facilities / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 2025. – 88 p. – (IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.30).
9. Stefanovsky S.V. Long-term performance and radiation stability of polymeric and bituminous matrices for intermediate-level waste immobilization / S.V. Stefanovsky, O.I. Stefanovsky // Journal of Nuclear Materials. – 2024. – Vol. 588, Art. 154802. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154802.
10. Ju F. Comparative study on the leaching kinetics of cesium and strontium from cementitious and asphaltic waste forms / F. Ju, M.T. Ngulimi, J. Wang // Progress in Nuclear Energy. – 2025. – Vol. 179, Art. 105411. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105411.

References

1. Milyutin V.V. Sovremennye metody pererabotki zhidkikh radioaktivnykh otkhodov / V.V. Milyutin, P.V. Kozlov, N.A. Nekrasova. – 2-e izd. – Ozersk; Moskva: Ozerskii tekhnologicheskii institut – filial NIYAU «MIFI», 2021. – 172 s. (in Russian).
2. Zakharova K.P. Bitumirovanie zhidkikh radioaktivnykh otkhodov: otsenka bezopasnosti i opyt ehkspluatatsii / K.P. Zakharova, O.L. Masanov // Atomnaya ehnergiya. – 2000. – T. 89, vyp. 2. – S. 112-119. (in Russian).
3. Radiolysis of bituminized radioactive waste: a comprehensive review / L. Millot et al // EPJ Nuclear Sci. Technol. – 2024. – Vol. 10, Art. 4. https://doi.org/10.1051/epjn/2024004. (in English).
4. Tekhnologicheskie i organizatsionnye aspekty obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami. – Vena: Mezhdunarodnoe agentstvo po atomnoi ehnergii (MAGATEh), 2005. – 114 s. – (IAEA-TCS-27). (in Russian).
5. Izvlechenie tverdykh radioaktivnykh otkhodov iz khranilishch pri ikh konservatsii sposobom bitumirovaniya: monografiya / N.V. Chegonov i dr. – Moskva: Radiokhimiya-izdat, 2023. – 156 s. (in Russian).
6. Analiz radiatsionnoi i biologicheskoi stoikosti matrichnykh materialov, primenyaemykh pri konditsionirovanii nizko- i sredneaktivnykh otkhodov / E.T. Koyanbaev i dr. // Vestnik NYATs RK. – 2023. – № 2. – S. 45-52. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-45-52. (in Russian).
7. Otsenka gidrofobnykh i strukturnykh izmenenii bitumirovannykh kompaundov pri dlitel'nom promezhutochnom khranenii / V.V. Baklanov i dr. // Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya. – 2024. – № 4(331). – S. 18-25. https://doi.org/10.31643/2024/6445.42. (in Russian).

8. IAEA. Option Assessment for Decommissioning and Legacy Waste Management of Bitumen-Containing Disposal Facilities / International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 2025. – 88 p. – (IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.30). (in English).
9. Stefanovsky S.V. Long-term performance and radiation stability of polymeric and bituminous matrices for intermediate-level waste immobilization / S.V. Stefanovsky, O.I. Stefanovsky // Journal of Nuclear Materials. – 2024. – Vol. 588, Art. 154802. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154802. (in English).
10. Ju F. Comparative study on the leaching kinetics of cesium and strontium from cementitious and asphaltic waste forms / F. Ju, M.T. Ngulimi, J. Wang // Progress in Nuclear Energy. – 2025. – Vol. 179, Art. 105411. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105411. (in English).

Финансирование

Работа проводилась при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках ИРН BR24993140 «НИР по обоснованию выбора и реализации технологии переработки жидких радиоактивных отходов».

Ю.Ю. Бакланова*, В.В. Яковлев, О.С. Букина, В.В. Бакланов
ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы,
180010, Қазақстан Республикасы, Курчатов қ., Бейбіт Атом көш., 10
*e-mail: basalai@nnc.kz

СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ БИТУМ МАТРИЦАСЫНДА ИММОБИЛИЗАЦИЯЛАУ

Мақалада битумдау әдісімен төмен және орташа деңгейдегі сұйық радиоактивті қалдықтарды (СРҚ) кондициялау мен иммобилизациялаудың заманауи ғылыми-техникалық тәсілдеріне кешенді талдау шолуы берілген. Авторлар гетерогенді көмірсутекті байланыстырғыш матрицаларды пайдаланудың пайдалану артықшылықтары мен макрокинетикалық шектеулерін егжей-тегжейлі сипаттаған, сондай-ақ қосылыстардың физика-химиялық қасиеттеріне және бекітілетін технологиялық флюидтердің тұз құрамына қойылатын қатаң нормативтік талаптарды тұжырымдаған. Өнеркәсіптік битумдардың әртүрлі маркаларының, соның ішінде «Павлодар мұнай-химия зауыты» ЖШС өнімдерінің фракциялық құрамына егжей-тегжейлі салыстырмалы талдау жүргізілді. Жұмыста мерзімді және үздіксіз экструзиялық процестердің параметрлері жүйеленген. Тұзбен толтырылу шегін, қоспалардың динамикалық тұтқырлығын, олардың радиациялық төзімділігін, термотұрақтылығын және жер асты суларымен жанасу жағдайында ұзақ мерзімді гидрофобтылығын анықтайтын негізгі ішкі факторлар талданды. Экзотермиялық реакциялардың алдын алу үшін СРҚ фазалық құрамын алдын ала зерттеу және олардың битуммен үйлесімділігін бағалау қажеттілігі көрсетілген. Битумдалған қалдықтарды қауіпсіз аралық сақтау және кейіннен өңдеу жағдайларына қойылатын талаптар қарастырылған. Оңтайлы қатыру технологиясын таңдау кезінде матрицаның өрт қауіптілігін, оның қасиеттерінің радиация әсерінен өзгеруін (радиолиз әсерлері) және ұзақ мерзімді биодеградация тәуекелдерін ескеру қажеттігі атап өтілген. Жұмыстың ғылыми құндылығы Қазақстан Республикасында атом энергетикасын дамыту бағдарламасын іске асыру шеңберінде битумдау әдісін шектеулі қолдану бойынша негізделген ұсынымдарды қалыптастыруда болып табылады.

Түйін сөздер: *сұйық радиоактивті қалдықтар, битумдау, иммобилизациялау, битум матрицасы, тұзбен толтырылу, радиациялық төзімділік, радиолиз, радиоактивті қалдықтарды кондиционерлеу.*

Yu.Yu. Baklanova*, V.V. Yakovlev, O.S. Bukina, V.V. Baklanov
Branch «Institute of Atomic Energy» of the RSE «National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan»,
10, Beibit Atom Str., 180010, Kurchatov, Republic of Kazakhstan
*e-mail: basalai@nnc.kz

IMMOBILIZATION OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE IN A BITUMEN MATRIX

He article presents a comprehensive analytical review of contemporary scientific and technical approaches to the conditioning and immobilization of low- and intermediate-level liquid radioactive waste (LRW) using the bituminization method. The authors describe the performance advantages and macrokinetic limitations of utilizing heterogeneous hydrocarbon matrices in detail, and formulate strict regulatory requirements for the physicochemical properties of compounds and the salt composition of fixed process fluids.

A detailed comparative analysis of the fractional composition of various industrial bitumen grades, including products from «Pavlodar Oil Chemistry Refinery» LLP, was carried out. The parameters of batch and continuous extrusion processes are systematized. The key internal factors determining the limit of salt loading, dynamic viscosity of mixtures, their radiation resistance, thermal stability, and long-term hydrophobicity under contact with groundwater are analyzed. The necessity of preliminary characterization of LRW phase composition and assessment of its compatibility with bitumen to prevent exothermic reactions is demonstrated. The conditions required for safe intermediate storage and subsequent management of bituminized waste are considered. It is noted that when selecting the optimal solidification technology, it is essential to take into account the fire hazard of the matrix, radiation-induced changes in its properties (radiolysis effects), and the risks of long-term biodegradation. The scientific value of this work lies in forming well-founded recommendations for the limited application of the bituminization method within the framework of the nuclear energy development program in the Republic of Kazakhstan.

Key words: *liquid radioactive waste, bituminization, immobilization, bitumen matrix, salt loading, radiation resistance, radiolysis, radioactive waste conditioning.*

Сведения об авторах

Юлия Юрьевна Бакланова* – начальник отдела материаловедческих испытаний, «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID:https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159.

Виталий Викторович Яковлев – главный специалист по инженерно- техническому сопровождению; «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: Yakovlev@nnc.kz.

Ольга Сергеевна Букина – сотрудник «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: bukina@nnc.kz . ORCID: .https://orcid.org/0000-0001-8759-9199.

Виктор Владимирович Бакланов – PhD, ассоциированный профессор, Директор филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Республика Казахстан; e-mail: baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Авторлар туралы мәліметтер

Юлия Юрьевна Бакланова* – ҚР ҰЯО РМК "Атом энергиясы институты" материалтану сынақтары бөлімінің бастығы, Қазақстан Республикасы; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159

Виталий Викторович Яковлев – ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» инженерлік-техникалық сүйемелдеу жөніндегі бас маман, Қазақстан Республикасы; e-mail: Yakovlev@nnc.kz.

Ольга Сергеевна Букина – ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» қызметкері, Қазақстан Республикасы; e-mail: bukina@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8759-9199.

Виктор Владимирович Бакланов – PhD, қауымдастырылған профессор, ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалының директоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Information about the authors

Yuliya Baklanova* – Head of the Department of Materials Science Testing, «Institute of Atomic Energy» RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; e-mail: basalai@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3310-4159.

Vitaliy Yakovlev – Chief Specialist in Engineering and Technical Support, «Institute of Atomic Energy» RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; e-mail: Yakovlev@nnc.kz.

Olga Bukina – employee of the «Institute of Atomic Energy» RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; e-mail:bukina@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8759-9199.

Viktor Baklanov – PhD, associate professor, Director of the branch «Institute of Atomic Energy» of the RSE NNC RK, Republic of Kazakhstan; baklanov@nnc.kz. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7627-8752.

Поступила в редакцию 20.06.2026
Поступила после доработки 30.08.2026
Принята к публикации 10.09.2026