

Областное государственное автономное общеобразовательное
учреждение «Лицей ядерных технологий» при НИЯУ МИФИ»

Индивидуальный итоговый проект

Тема «Иммобилизация отработавших ионообменных смол»

Работу выполнила: ученица 9Б класса

Нурмухаметова Дарина Олеговна,

Руководитель: учитель старших классов ОГАОУ «Лицей ядерных
технологий» при НИЯУ МИФИ»

Лаврушина Елена Евгеньевна,

г. Димитровград

2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	3
2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	5
2.1 Общая характеристика ионитов	5
2.2 Виды ИОС	5
2.2.1 По заряду иона	5
2.2.2 По структуре матрицы	5
2.2.3 По типу матрицы	6
2.2.4 По размеру частиц	6
2.3 Переработка ионообменных смол	7
2.3.1 Сжигание	7
2.3.2 Пиролиз	8
2.3.3 Горячее прессование	8
2.3.4 Включение ИОС в матричные материалы	9
3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	10
3.1 Материалы и методы	10
3.1.1 Используемые реактивы	10
3.1.2 Используемое оборудование	10
3.2 Методика подготовки смолы к эксперименту	10
3.3 Методика приготовления цемента	11
3.4 Методика проверки прочности цементного компаунда	12
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА	13
4.1 Приготовление цементных матриц	13
4.2 Испытание цемента на прочность	14
5. ВЫВОДЫ	16
6. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	17

1. ВВЕДЕНИЕ

Отработавшие ионообменные смолы (ОИОС) представляют собой один из наиболее массовых видов органических радиоактивных отходов, образующихся на предприятиях атомной энергетики, в исследовательских реакторах и радиохимических лабораториях.

Ионообменные смолы (иониты) применяются в основном для очистки воды и технологических водных сред[1]. Они способны улавливать и удерживать из жидкостей определенные ионы, "обменивая" их на другие. Так, к примеру, вода в активной зоне реактора, которая охлаждает топливо, загрязняется продуктами коррозии оборудования и радионуклидами, такими как цезий-137, кобальт-60. Смолы позволяют очищать воду от нуклидов и примесей, что позволяет повторно использовать или сбрасывать воду в соответствии с нормами безопасности.

Согласно требованиям федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, ОИОС должны быть переработаны и кондиционированы, а кондиционированные смолы должны безопасно храниться и захораниваться.

Отработанные ионообменные смолы, образующиеся в процессе очистки малоактивных сточных и промывных вод на атомных станциях, утилизируют. Выбор метода зависит от степени загрязнения смолы, её химического состава, объёма отходов и требований природоохранного законодательства. Основным методом переработки ионитов – их включение в матричный материал.

Актуальность: в настоящее время ОИОС не подвергаются какой-либо промышленной переработке и в виде пульпы собираются на хранение в металлические емкости – хранилища жидких радиоактивных отходов. В связи с возрастающими объемами накопленных ОИОС проблема их кондиционирования весьма

актуальна.

Проблема: суммарный объем пульп отработанных ионообменных смол, накопленных на российских атомных электростанциях, составляет около 30 000 метров кубических. Разработка новых методов кондиционирования ионитов позволяет сократить объем хранимых радиоактивных отходов.

Гипотеза проекта заключается в том, что термообработка смолы, как метод ее трансформирования, позволит ионообменной смоле деструктурироваться и не поглощать влагу. В результате станет возможным включение смолы в цементную матрицу, пригодную для длительного хранения или захоронения.

Цель проекта: разработать способ переработки (иммобилизации) ионообменных смол, направленный на получение стабильной, компактной и пригодной для захоронения формы твердых отходов.

Объект исследования: катионообменная и анионообменная смолы.

Предмет исследования: процесс включения трансформированной смолы в матричный материал.

Для решения поставленной цели сформулированы следующие **задачи:**

1. Провести анализ научно-технической литературы по существующим методам переработки отработанных ионообменных смол.
2. Провести трансформацию смолы в форму пригодную для включения в матрицу.
3. Разработать состав матричного материала, пригодного для включения ионообменной смолы.
4. Произвести включение трансформированной смолы в цементную матрицу с различным процентным содержанием смолы.

5. Испытать цементную матрицу на прочность в соответствии с требованиями безопасности НП-019-15.

6. Провести анализ полученных данных и сделать выводы.

Практическая значимость: разработка безопасного метода обращения с радиоактивными отходами предотвращает попадание радионуклидов в грунтовые воды и атмосферу при захоронении.

Новизна проекта: новизна проекта заключается в разработке метода трансформирования смолы, в результате чего станет возможным эффективное включение смолы в матричный материал.

Продукт проекта: деструктированная смола, заключенная в цементную матрицу.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Общая характеристика ионитов

Ионообменные смолы (иониты) – это твердые зернистые материалы, практически нерастворимые в воде и обычных растворителях, содержащие активные (ионогенные) группы кислотного или основного характера с подвижными ионами [2].

Ионообменные смолы используются в котельных, теплоэлектростанциях, атомных станциях, пищевой промышленности (при производстве сахара, алкогольных, слабоалкогольных и других напитков, бутилированной воды), фармацевтической промышленности и других отраслях, а также для хозяйственно-питьевого водоснабжения [3].

Обмен ионами позволяет изменять ионный состав обрабатываемой жидкости, не изменяя суммарного числа зарядов, находившихся в этой жидкости до процесса обмена.

2.2 Виды ИОС

2.2.1 По заряду иона

Катиониты – иониты с положительно заряженными ионами (Na^+ , H^+ и др.). По степени ионизации (способность к ионному обмену) катиониты делят на сильно- и слабокислотные.

Сильнокислотные катиониты в качестве функциональной (ионогенной) группы содержат сульфогруппы или фосфорнокислые группы, слабокислотные – карбоксильные и фенольные группы.

Аниониты – иониты с отрицательно заряженными ионами (OH^- , Cl^- и др.). Аниониты делят на сильноосновные и слабоосновные. Сильноосновные аниониты в качестве функциональной группы содержат четвертичные аммониевые основания, слабоосновные – первичные и вторичные аминогруппы.

2.2.2 По структуре матрицы

Гелевая структура

ИОС с гелевой структурой лишены истинных пор и способны обмениваться ионами только в набухшем (гелеобразном) состоянии. Для достижения данного состояния смолу помещают на некоторое время в воду. Размер пор в таком типе смол составляет 1 нм.

Пористая (макропористая) структура

Данная структура называется так потому, что на поверхности ионита (ионообменной смолы) находится большое количество пор, которые способствуют ионообменному процессу. Размер пор в смоле с макропористой структурой составляет 100 нм.

Промежуточная структура

Среднее по свойствам между гелевой и пористой структурами. Отличительной особенностью ионообменных смол с различной структурой является то, что иониты с гелевой структурой обладают большей обменной емкостью, чем смолы с макропористой структурой. В свою очередь ионообменные смолы с пористой структурой превосходят гелевые по осмотической стабильности, химической и термической стойкости, т.е. они могут задерживать большее количество примесей практически при любой температуре воды [4].

2.2.3 По типу матрицы

Промышленные ионообменные материалы (ионообменные смолы), которые применяют для очистки воды, относятся к типу полимерных синтетических смол, отличающихся размерами и структурой их молекул.

Приблизительно 90% товарных синтетических ионообменных смол получено на основе сополимеризации либо полистирола, либо полиакрилата и дивинилбензола.

Таким образом, различают ионообменные смолы полистирольной или с полиакриловой матрицей.

2.2.4 По размеру частиц

Форма и размер частиц ионита должны обеспечить эффективный контакт с обрабатываемой водой при отсутствии избыточного перепада давления.

Различают полидисперсные гранулы (размер частиц колеблется в диапазоне 0,3 – 1,2 мм) и монодисперсные гранулы (размер частиц, как правило, составляет 0,5 – 0,6 мм ± 0,05 мм).

В настоящее время на рынке ИОС представлено большое число производителей ионитов. Основными марками являются такие смолы, как Lewatit (Германия), Purolite (Англия), Dowex (США), Tulsion (Индия), Granion (Китай), а также некоторые другие смолы российского производства.

2.3 Переработка ионообменных смол

Методы переработки ИОС можно разделить на две группы: деструктивные и недеструктивные (включение в матрицу). Как правило, перед переработкой ИОС подвергают предварительной обработке, цель которой:

- перевод в форму, необходимую для последующей переработки или кондиционирования,
- повышение эффективности последующей обработки,
- повышение безопасности.

Возможные методы предварительной обработки ИОС включают:

- удаление свободной жидкости,
- сушку и нагрев,
- измельчение,
- приготовление «пен»,
- дезактивацию.

Удаление свободной жидкости проводят перед включением в различные связующие. Это приводит к повышению коэффициента сокращения объема и совместимости с отверждающим агентом.

Измельчение ИОС улучшает последующую деструктивную переработку (сжигание, пиролиз, мокрое окисление и биodeградацию) и включение в матрицу. Для измельчения применяют различную технику, в т.ч. криогенную.

2.3.1 Сжигание

Отработавшие ИОС можно сжигать совместно с другими горючими отходами или отдельно, в зависимости от цели процесса. Сжигание отработавших смол в насыщенной кислородом атмосфере приводит к окислению исходного загружаемого материала и дает сокращение объема в 30 – 100 раз [5].

Печи сжигания, предназначенные для обработки ИОС, более сложные, чем печи, используемые для обычных отходов, из-за проблем, связанных со сжиганием ИОС и обработкой отходящих газов. При загрузке в печь смолы имеют тенденцию образовывать большие кластеры в результате плавления перед горением, тем самым вызывая проблемы с огнеупорным материалом печи, а также проблемы, связанные с неполным сгоранием. Также, поскольку ИОС содержат значительные количества серы и азота, отходящие газы печи содержат большие количества вредных газов, поэтому необходима эффективная система газоочистки. Кроме того, некоторые активные элементы, например, цезий и рутений летучи при температуре выше 800 °С, что еще больше усложняет очистку отходящих газов.

2.3.2 Пиролиз

Пиролиз является процессом, который проводят в диапазоне температур от 500°С до 700°С. Во время пиролиза смолы разрушаются в инертной атмосфере, полимерные цепочки материала смолы обрываются и образуют твердый остаток (1/3 веса смолы) и газопаровую фракцию (2/3 веса смолы) [6].

2.3.3 Горячее прессование

Этот метод промышленно используется на атомной станции в Германии. В данном процессе ИОС сушат до влажности от 12 до 50 % в обогреваемом аппарате с мешалкой и нагревают до температуры, необходимой для горячего прессования. Заполняют смолой

специальный металлический сосуд, закрывают крышкой и немедленно направляют на прессование в суперкомпактор. Из него спрессованные «блины» переносят в контейнер и после выходного дозиметрического контроля направляют на хранение. Коэффициент сокращения объема составляет порядка 6 [7].

Среди других термических методов, которые используются для переработки ИОС, следует выделить:

- остекловывание,
- плазменную обработку,
- кислотное разложение,
- окисление в расплаве солей.

Перечисленные методы не нашли широкого промышленного применения для переработки ИОС.

Среди других методов переработки ИОС, которые находятся на различных стадиях проработки, следует отметить:

- микроволновую сушку с последующей плазменной переработкой,
- биodeградацию.

Биodeградация ИОС широко изучается в Финляндии. Анаэробное разложение позволяет уменьшить объем ИОС в 10 – 20 раз, но время процесса составляет от нескольких дней до нескольких недель. Поэтому этот процесс пока не используется [8].

2.3.4 Включение ИОС в матричные материалы

Перед включением в матричные материалы ИОС обычно подвергают предварительной обработке. Иногда такая обработка включает только удаление транспортной воды. В качестве матричных материалов используют цемент, битум и некоторые полимеры [9].

В зависимости от объема перерабатываемых ИОС и их удельной активности используют различные варианты цементирования: в бочке

(контейнере) с мешалкой, вращающейся бочке, в объемном смесителе. Иногда ИОС цементируют совместно с другими жидкими радиоактивными отходами [10].

1. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Материалы и методы

3.1.1 Используемые реактивы

Оксид кальция, ч, ГОСТ 8677-76;

Кремний окись, чда, ГОСТ 9428-73;

Окись алюминия, ч, ГОСТ 30558-2017;

Железо окись, чда, ТУ 6-09-5346-87;

Магний окись, ч, ГОСТ 4526-75;

Оксид цинка, ч, ГОСТ 10262-73;

Силикат натрия, ГОСТ 50418-92;

Ионообменная смола КУ-2-8-Н⁺ производитель ООО ПО "ТОКЕМ" г.Кемерово, ГОСТ 20298-74;

Ионообменная смола АВ-17-8-Cl⁻ производитель ООО ПО "ТОКЕМ" г.Кемерово, ГОСТ 20301-74;

3.1.2 Используемое оборудование

Тигель – 2 шт, ГОСТ 19908-90;

Лабораторная электропечь SNOL 6,7/1300;

Пипетки Пастера 1 мл. – 10 шт, ТУ 32.50.50-028-29508133-2019;

Лабораторные весы Ohaus Traveler;

Микроскоп БИОМЕД-4 СВ бинокляр;

Стаканы лабораторные 500 мл. – 3 шт, ГОСТ 25336-82;

Автоматический испытательный пресс ТП-1-1500;

3.2 Методика подготовки смолы к эксперименту

Для подготовки смолы к эксперименту выбрали методику термической обработки смолы. При 300 - 320°C выдержали смолу в электропечи в течение 5 часов. Получились черные шарики, по форме схожие с исходной смолой. Вид термообработанной смолы показан на рисунке 1. Вид термообработанной смолы под микроскопом показан на рисунке 2.



Рисунок 1 – Ионообменная смола после термической обработки

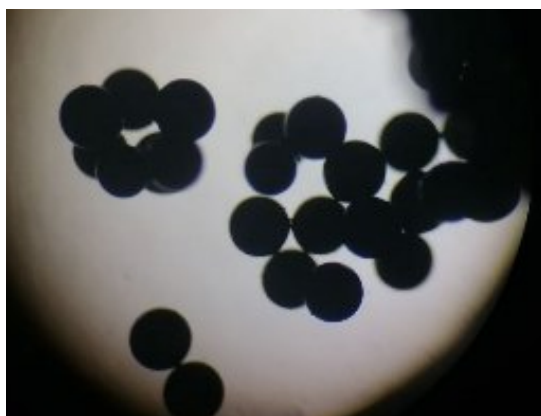


Рисунок 2 – Вид термообработанной смолы под микроскопом

3.3 Методика приготовления цемента

Исходными компонентами для приготовления цемента служили оксид кальция (CaO), диоксид кремния (SiO_2), оксид алюминия (Al_2O_3), оксид железа (Fe_2O_3), оксид магния (MgO), оксид цинка (ZnO). В качестве связующего использовали как воду, так и водный раствор силиката натрия в соотношении связующего к массе цемента, как 1:1.

Компоненты дозировались по массе в определенном соотношении, соответствующем классическому составу портландцемента и глиноземистого цемента, как показано в таблице 1.

Для обеспечения однородности механическим путем перемешивали оксиды, добавляя термообработанную смолу в

массовых пропорциях 15%, 30%, 45% от массы всего цементного компаунда. Влажную смесь формировали в виде таблеток в силиконовой форме диаметром 38 мм.

Таблица 1 – Состав цемента

СОСТАВ, %	ТИП ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ		
	Портландцемент на водной основе	Портландцемент на силикатной основе	Глиноземистый цемент
CaO	65	65	35
SiO ₂	22	–	10
Al ₂ O ₃	6	10	45
Fe ₂ O ₃	3	10	6
MgO	3	10	3
ZnO	1	5	1
Водный раствор силиката натрия	–	100	–
Вода	100	–	100

3.4 Методика проверки прочности цементного компаунда

Перед испытанием образцов проводили выдержку цементных компаундов в течении 28 суток для достижения высокой прочности. Образец не должен иметь видимых трещин, сколов на гранях, которые будут контактировать с плитами пресса. Рассчитывается площадь рабочего сечения (фактическая площадь опоры) по формуле:

$$S = \pi \cdot R^2$$

Установили образец на центр нижней опорной плиты пресса, так чтобы оси образца были совмещены с осью приложения нагрузки пресса. Наблюдали за увеличением нагрузки на индикаторе. Нагружение велось до момента полного разрушения образца.

Прочность на сжатие рассчитывалась автоматически и полученное значение высвечивалось на мониторе испытательного пресса, для этого в программу задавался лишь диаметр образца.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

4.1 Приготовление цементных матриц

В соответствии с методикой по приготовлению цемента осуществили замешивание цементных компаундов с различным процентным содержанием ионообменных смол. Из расчета массы компаунда, равной 7,5 г и учитывая массу замешиваемой смолы, вычислили массу всех составляющих компонентов. Данные занесли в таблицу 2.

Таблица 2 – Состав цемента

Состав, г	Глиноземистый цемент			Портландцемент на водной основе			Портландцемент на силикатной основе		
	15% ИОС	30% ИОС	45% ИОС	15% ИОС	30% ИОС	45% ИОС	15% ИОС	30% ИОС	45% ИОС
CaO	2,23	1,84	1,44	4,14	3,41	2,68	4,14	3,41	2,68
SiO ₂	0,64	0,52	0,41	1,40	1,15	0,90	–	–	–
Al ₂ O ₃	2,87	2,36	1,86	0,38	0,32	0,25	0,64	0,52	0,41
Fe ₂ O ₃	0,38	0,32	0,25	0,19	0,16	0,12	0,64	0,52	0,41
MgO	0,19	0,16	0,12	0,19	0,16	0,12	0,64	0,52	0,41
ZnO	0,06	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,32	0,26	0,20
Силика т натрия	–	–	–	–	–	–	6,38	5,25	4,13
Вода	6,38	5,25	4,13	6,38	5,25	4,13	–	–	–

Для каждого вида цемента замешивали, как катионообменную, так и анионообменную смолу, как показано на рисунке 3.



Рисунок 3 – Процесс приготовления цементных матриц

После выдержки образцов в течении предусмотренного периода цементная матрица стала прочной и твердой, что показано на рисунке 4.



Рисунок 4 – Цементные компаунды после выдержки в течении 28 дней

4.2 Испытание цемента на прочность

Согласно требованиям НП-019-15 прочность цементного компаунда должна быть не менее 5 МПа. Для проверки цемента на прочность использовался автоматический испытательный пресс ТП-1-1500, который уже сразу выдавал результаты на монитор, как показано на рисунке 5.



Рисунок 5 – Испытание цемента на прочность

В результате проведения испытаний на прочность, занесли данные исходных образцов (без включения смолы) в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний исходных образцов

Тип цемента	Глиноземистый	Портландцемент на водной основе	Портландцемент на силикатной основе
Прочность, МПа	0,8	0,5	1,5

После проверили на прочность цементные матрицы с различным содержанием термообработанной смолы и данные занесли в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний цементных компаундов

Прочность, МПа	Глиноземистый цемент			Портландцемент на водной основе			Портландцемент на силикатной основе		
	15% ИОС	30% ИОС	45% ИОС	15% ИОС	30% ИОС	45% ИОС	15% ИОС	30% ИОС	45% ИОС
Катионит	5,0	7,1	5,8	4,3	5,1	2,4	6,2	8,4	7,8
Анионит	5,4	7,8	5,3	1,8	2,8	2,2	6,7	8,9	8,7

2. ВЫВОДЫ

В результате выполнения проекта была экспериментально проверена технология переработки ионообменных смол путём их включения в цементную матрицу. Было установлено, что термическая обработка смолы является эффективным методом трансформации ионообменных смол (ИОС) в форму, пригодную для включения в матричные материалы. В результате обработки смола теряет способность к набуханию и влагопоглощению, что необходимо для дальнейшего заключения в матричный материал.

В качестве матричной основы исследовали три типа цементных систем: глиноземистый цемент, портландцемент на водной основе и портландцемент с силикатным связующим (на основе раствора силиката натрия).

Прочность цементных компаундов зависит от типа цемента и процентного содержания смолы. Так, наибольшую прочность показали образцы на основе портландцемента на силикатной основе с содержанием смолы 30 –45% (прочность до 8,9 МПа). Образцы на основе глиноземистого цемента также соответствуют требованиям НП-019-15 (прочность не менее 5 МПа). Портландцемент на водной основе показал наименьшую прочность, особенно при использовании анионита, что связано с неравномерным перемешиванием цементного компаунда при его приготовлении.

Оптимальное содержание смолы в цементной матрице составляет 30% для всех типов цемента. Испытания на автоматическом прессе ТП-1-1500 подтвердили свою эффективность для определения прочности цементных образцов. Практическая значимость работы подтверждена: предложенный метод позволяет сократить объём радиоактивных отходов и перевести их в стабильную форму, пригодную для длительного хранения или захоронения.

3. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смолы ионообменные | Смолы ООО. – URL: <https://smoly.ru/catalog/smoly-ionoobmennye/> (дата обращения: 20.10.2025).
2. Ионообменные смолы | Химические системы. – URL: <https://chemsystem.ru/catalog/579> (дата обращения: 25.10.2025).
3. Ионообменные смолы – Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ионообменные_смолы (дата обращения: 27.10.2025).
4. Классификация ионитов. – URL: <https://studfile.net/preview/16567478/page:3/> (дата обращения: 29.10.2025).
5. Особенности обращения с радиоактивными отходами. – URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=818710> (дата обращения: 11.11.2025).
6. Методы утилизации ионообменной смолы. – URL: <https://smoly.ru/утилизация-ионообменной-смолы/> (дата обращения: 19.11.2025).
7. Савкин, А. Е. Переработка радиоактивных отходов с селективным извлечением радионуклидов и кондиционирование отработавших сорбентов : автореф. дис. доктор технич. наук/ Савкин Александр Евгеньевич. – М. : ФГУП «Радон», 2023. – 309 с.
8. Первушина, А. Р. Методы утилизации отработанных ионообменных смол [Электронный ресурс] / А. Р. Первушина, С. И. Ильина // Научный журнал E-Scio – 2022. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-utilizatsii-otrabotannyh-ionoobmennyyh-smol/viewer> (дата обращения: 07.12.2025).
9. Требования к локализации концентратов ЖРО – Студопедия. – URL: https://studopedia.ru/11_57137_trebovaniya-k-lokalizatsii-kontsentrato-zhro.html (дата обращения: 19.12.2025).
10. Глубокое упаривание, цементирование – Обращение с радиоактивными отходами. – URL: <https://vuzdoc.ru/134948/tehnika/glubokoe-uparivanie> (дата обращения: 21.12.2025).

