



ЧАСТНОЕ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
**ПРАВОСЛАВНАЯ ГИМНАЗИЯ
ПРЕПОДОБНОГО ИЛИИ МУРОМЦА**

Владимирская область, округ Муром

Исследовательская работа

**РАЗРАБОТКА СТЁКОЛДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ
ОТХОДОВ**

Автор Захарова Дарья

ученица 10 класса

ЧОУ «Муромская православная гимназия»

Научный руководитель Леонова Элеонора Сергеевна

учитель биологии и географии

2025 год

Оглавление

1. Введение.....	3
2. Обзор литературы.....	4
3. Методы исследования.....	6
4. Результаты исследования и обсуждение.....	7
5. Выводы	13
6. Заключение.....	14
7. Список использованной литературы.....	15

1. Введение

Стекло — ключевой материал современной цивилизации, применяющийся от строительства до высоких технологий. Особую значимость приобретает процесс остекловывания радиоактивных отходов, обеспечивающий:

- Безопасное хранение РАО в минимальном объёме
- Надёжную изоляцию радионуклидов стекломатрицей
- Снижение экологической нагрузки через многоуровневую систему защиты

Мой проект позволяет исследовать характеристики стёкол различного состава, используемых в таких технологиях, и выявить особенности каждого образца для создания материалов с заданными свойствами.

Цель работы: *изготовить стекло, подходящее по свойствам и характеристикам для утилизации и захоронения радиоактивных отходов.*

Задачи:

1. Анализ литературы по данному вопросу
2. Синтез стекол с разными составами с добавками Fe_2O_3 , CaO , Nd_2O_3 , Co_3O_4 .
3. Изучение свойств полученных образцов: растворимость, теплоёмкость, плотность.
4. Выбор оптимального состава.
5. Остекловывание с использованием имитатора радиоактивных отходов (CeO_2).

2. Обзор литературы.

Вопрос захоронения радиоактивных отходов – это не просто техническая проблема, а краеугольный камень экологической безопасности XXI века. От того, насколько эффективно и безопасно мы решаем эту задачу, напрямую зависит здоровье будущих поколений и благополучие планеты в целом.

Радиоактивные отходы, образующиеся в результате работы атомных электростанций, промышленных предприятий содержат радиоактивные изотопы с периодами полураспада от нескольких лет до десятков тысяч лет. Это означает, что они представляют собой потенциальную угрозу для окружающей среды и здоровья человека на протяжении многих поколений. Проникновение радионуклидов в почву, воду, воздух и пищевые цепи может привести к серьезным последствиям, включая генетические мутации, онкологические заболевания и общее ухудшение здоровья населения.

Один из методов – глубокое геологическое захоронение. Он предполагает размещение отходов в устойчивых геологических формациях, таких как залежи соли, гранит или глина, на глубине сотен метров. Естественные барьеры, такие как непроницаемые горные породы, в сочетании с инженерными барьерами, такими как специальные контейнеры, обеспечивают многоуровневую защиту от проникновения радиоактивных веществ в биосферу.

Но не все так гладко. Во время подобного хранения подземные воды подмывают контейнеры с РАО, и часть веществ попадает в эти воды, тем самым отравляя экосистему планеты.

В некоторых странах рассматривается возможность трансмутации – превращения долгоживущих радиоактивных изотопов в более короткоживущие или стабильные. Однако этот метод находится на стадии разработки и требует значительных инвестиций.

В связи с этим остекловывание, как инновационная технология, востребовано для решения этой экологической проблемы.

Но что же это такое?

Остекловывание радиоактивных отходов представляет собой передовую технологию, направленную на безопасное и долгосрочное захоронение высокоактивных отходов, образующихся в результате работы атомных электростанций и переработки отработавшего ядерного топлива. Суть процесса заключается во включении радиоактивных изотопов в матрицу стекла, что обеспечивает их стабильную и устойчивую к выщелачиванию форму.

Первым этапом является подготовка радиоактивных отходов, включающая их концентрирование и гомогенизацию. Затем отходы смешиваются с фриттой – смесью оксидов кремния, бора и других элементов, формирующих стекло. Полученная смесь подвергается высокотемпературной обработке в

специальных печах, где происходит плавление и образование однородного расплава.

Расплавленная стекломасса заливается в прочные контейнеры из нержавеющей стали, где происходит ее постепенное охлаждение и затвердевание. В результате формируется стеклообразный продукт, обладающий высокой химической стойкостью, радиационной устойчивостью и механической прочностью. Радиоактивные изотопы надежно зафиксированы в структуре стекла, что предотвращает их миграцию в окружающую среду.

Остеклованные отходы помещаются в хранилища, расположенные на значительной глубине под землей, в геологически стабильных формациях. Многобарьерная система защиты, включающая стеклообразную матрицу, контейнер и геологическую среду, обеспечивает надежную изоляцию отходов на тысячи лет, минимизируя риск их воздействия на окружающую среду и здоровье человека. Остекловывание является ключевым элементом стратегии обращения с радиоактивными отходами, обеспечивающим их безопасное и долгосрочное захоронение.

3. Методы исследований

В своей работе использовала следующие методики:

1. Дроп калориметрия.

Технология калориметрии: поместить образец в пробирку, нагреть на водяной бане до температуры кипения воды и оставить на 5-7 минут, предварительно включить калориметр и подключить его к омметру, начать фиксировать график; сбросить образец в прибор и закрыть крышкой, дождаться установления линейного участка на графике.

Так как калориметр в связке с омметром регистрирует сопротивление, то в итоге получается зависимость сопротивления от времени. Для дальнейших исследований нужно использовать зависимость температуры от времени.

2. ДСК.

Дифференциально-сканирующая калориметрия или просто ДСК один из самых точных способов определения теплоемкости вещества. Его действие заключается в сравнении показаний датчиков от исследуемых образцов и эталона. Прибор нагревает образцы и в случае происхождения изменений (фазовый переход) датчик фиксирует это, и прибор строит график разницы между образцом и эталоном. Далее идет охлаждение.

В моем эксперименте эталоном выступил пустой тигель. В другие два тигля я поочередно закладывала стекла с различным составом.

3. Расчет плотности стекол.

Для расчета плотности стекол была использована такая методика:

- Взвесить 10 мл ацетона
- Взвесить образец
- Добавить к образцу ацетон
- Вакуумировать
- Добавить ацетон так, чтобы суммарный объем был равен 10 мл
- Взвесить смесь
- Рассчитать плотность

4. Результаты исследования и обсуждения

Проанализировав литературу, приступили к практической части проекта. Подобрали материалы для производства стекол разного состава.

Основной силикатообразователь моего стекла — SiO_2 . Но если использовать его на 100%, температура плавления у стекла будет слишком высокой (около 1700°C). Также чистое кварцевое стекло хуже поддается формованию. В большую часть составов стекол для понижения температуры плавления и уменьшения вязкости добавляют Na_2O (вместо оксида натрия я использовала оксалат). Однако Na_2O имеет существенный минус: контактируя с водой, оксид натрия превращается в гидроксид натрия, который диссоциирует в воде. То есть стекло становится более растворимым в воде. Это серьезный недостаток для многих видов стекол, тем более — для остекловывания. Для понижения растворимости я добавила в шихту модификаторы: CaO , Nd_2O_3 , Co_3O_4 , Fe_2O_3 . Для каждого из синтезированных стекол я измерила некоторые термодинамические и механические свойства, чтобы выбрать лучший вариант для остекловывания. Вместо оксида натрия я использовала оксалат.

4.1 Синтез стекла

Первое, что необходимо сделать — рассчитать состав шихты для каждого из стекол. По фазовой диаграмме SiO_2 - Na_2O я решила, что оптимальный вариант — 77% SiO_2 , 33% Na_2O + 3% от массы стекла модификатора. Мольный состав моих стекол: $2\text{SiO}_2 * \text{Na}_2\text{O}$; $24\text{SiO}_2 * 15\text{Na}_2\text{O} * \text{CaO}$; $107\text{SiO}_2 * 67\text{Na}_2\text{O} * \text{Co}_3\text{O}_4$; $68\text{SiO}_2 * 42\text{Na}_2\text{O} * \text{Fe}_2\text{O}_3$; $143\text{SiO}_2 * 89\text{Na}_2\text{O} * \text{Nd}_2\text{O}_3$

Вместо оксида натрия я использовала оксалат натрия. Оксиды тщательно перемешала в ступках, разбавив их этиловым спиртом. После поместили их в холодную печь, разогревающуюся до 1100°C на 2 часа. В печи под воздействием температуры оксалат натрия разлагается на оксид натрия и улетучивающиеся углекислый и угарный газы. Происходит силикатообразование: силикаты плавятся и, растворяясь друг в друге, образуют непрозрачный расплав, содержащий значительное количество газов и частицы компонентов шихты. А затем стеклообразование, когда образуется относительно однородная стекломасса. После варки я достала тигли и остудила их на открытом воздухе. Во время остывания стекло издавало звенящие звуки, которые возникали из-за неравномерного охлаждения и обилия газовых включений, по причине которых в стекле было много механических напряжений, провоцирующих микротрещины.

Тигли я разбила и очистила крупницы стекла от керамики. Крупные кусочки стекла я решила использовать для измерения растворимости и теплоемкости методом дропа, а оставшуюся часть я тщательно измельчила до порошка, чтобы измерить плотность стекла и теплоемкость по ДСК. Для достоверности измерений я приготовила 2 партии стекол и экспериментировала с наиболее

4.2 Проведение дропкалориметрии.

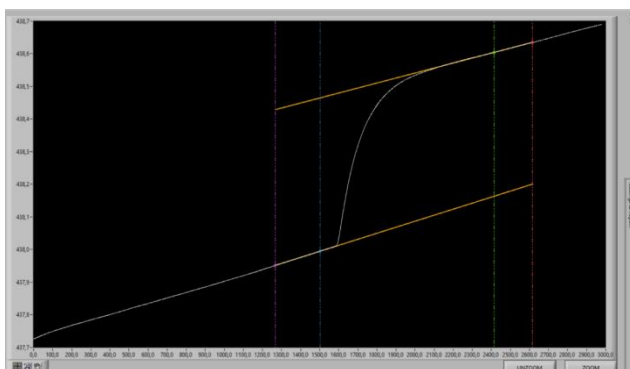


Для этого я провела калибровку термометра, то есть получила уравнение перевода сопротивления в температуру.

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$$

$$T = \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}{B} + 1/T_0}$$

Из него я получила коэффициент $B=4122\text{K}$, используемый в программе CalCor. Данная программа преобразует массив данных в график температуры от времени.



Далее я построила две линии тренда, и по ним программа сделала коррекцию и рассчитала необходимую мне дельта T для расчета теплоемкости по формулам.

$$C_p = \frac{\Delta H}{(373 - T_1) \times m}$$

$$C_{\text{sys}} = \frac{-\Delta H_{Zn}}{\Delta T_{\text{cor Zn}}}$$

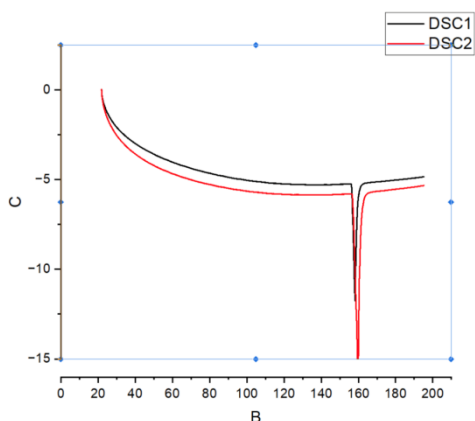
Я провела 6 подобных исследований: калибровка прибора с помощью стандарта Zn (вычисление теплоемкости калориметра через известную теплоемкость цинка)+ 5 исследований со стеклами.

4.3 Проведение ДСК.

В моем эксперименте эталоном выступил пустой тигель. В другие два тигля я поочередно закладывала стекла с различным составом.

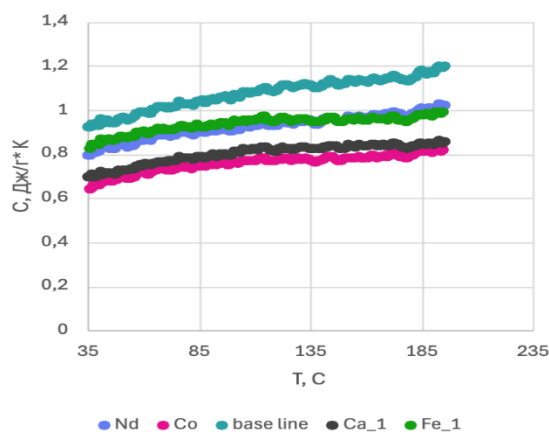


Но как и любой прибор ДСК требует калибровки. Для этого я использовала индий. Дело все в том, что каждый датчик в приборе индивидуален и у него есть погрешность в измерении. Для определения этой погрешности я расплавила индий в ДСК, получила график зафиксировала разницу между фактическими и эталонными данными.



Теперь все измерения прибора требуют коррекции на эту разницу.

В результате математических преобразований в программах OriginPRO и Excel. Я получила четыре графика теплоемкости стекол различного состава.



4.4 Расчет плотности стекол.



В качестве образца использовался порошок из стекла

Расчет плотности производился по формулам

$$\rho_{C_3H_6O} = \frac{m_{C_3H_6O}}{10 \text{ мл}}$$

$$V_{C_3H_6O} = \frac{m_{C_3H_6O}}{\rho_{C_3H_6O}}$$

$$\rho_{\text{glass}} = \frac{m_{\text{glass}}}{V_{C_3H_6O_{10\text{мл}}} - V_{C_3H_6O}}$$

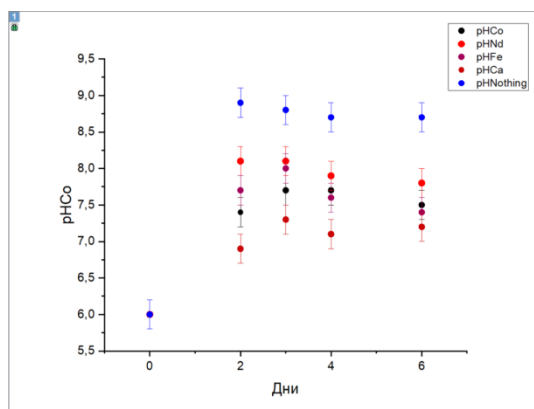
В результате я получила следующие значения плотностей стекол

Стекла	Co ₃ O ₄	CaO	Fe ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Nothing
Плотность (г/см ³)	2,67	2,55	2,64	2,63	2,7

4.5 Растворимость.

При взаимодействии с водой, как я уже говорила, оксид натрия вымывается из стекла. Я буду измерять растворимость косвенным методом — через рН (водородный показатель, мера кислотности/щелочности водного раствора). Итак, при реакции Na_2O с водой выделяется NaOH , который полностью диссоциирует. Дополнительные гидроксид-ионы принимают протоны от ионов водорода, уменьшая их концентрацию и, следовательно, повышают рН.

Я брала кусочки с примерно одинаковой площадью поверхности, чтобы эксперименты были более близкими. По графику видно, в первые дни рН возрастает, а потом слегка падает. Частично это связано с погрешностью рН-метра (она равна 0,2), а частично — с взаимодействием воды с CO_2 из воздуха, который диффундирует с водой, делает ее более кислотной.



Масса всех стекол после взаимодействия с водой изменилась незначительно.

4.6 Выбор оптимального состава

Чем более растворимо стекло, тем менее оно безопасно и пригодно для остекловывания, поэтому низкая растворимость — основной фактор выбора конечного состава стекла для остекловывания. В результате теста на растворимость мы выбрали *натриево-кальциево-силикатное стекло* — прочное, прозрачное, дешевое, слабо растворимое в воде.

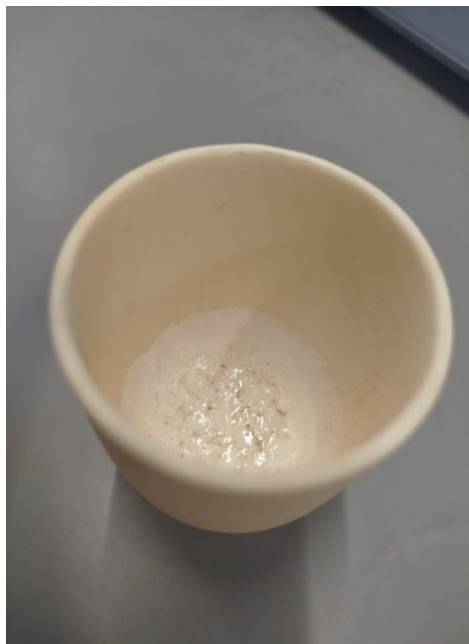
4.7 Остекловывание

Для проведения модельного эксперимента был выбран оксид церия, так как он очень схож по своим химическим и физическим свойствам на оксид урана, который в свою очередь является основным компонентом топлива. Но что важно церий не является радиоактивным элементом, а это значит, что его использование безопасно.

Методика остекловывания:

- К оксиду церия добавить стекло в массовом соотношении 1:3
- Растереть в ступке до однородной массы
- Поставить спекаться в печь

В результате я получила твердую, однородную массу.



5. Выводы

Мы ознакомились с литературными данными по изучаемой проблематике. Изучили и овладели методами калориметрии, ДСК, методиками измерения плотности и растворимости стекол. Из анализа литературы я пришла к выводу, что технология остекловывания является одним из перспективных направлений современной экологии.

Провели синтез стекол с разными составами с добавками Fe_2O_3 , CaO , Nd_2O_3 , Co_3O_4 .

Провели исследования образцов по выбранным методикам. Результаты исследования плотности, растворимости и теплоемкости образцов показали, что лучшими качествами обладает натриево-кальциево-силикатное стекло.

Я изготовила стекло, подходящее по свойствам и характеристикам для утилизации и захоронения радиоактивных отходов. Модельный эксперимент по остекловыванию имитатора радиоактивных отходов оксида церия прошел успешно.

6. Заключение

Остекловывание является ключевым элементом стратегии обращения с радиоактивными отходами, обеспечивающим их безопасное и долгосрочное захоронение. Этот способ известен в научном мире, но мало используется. Так захоранивают отходы только Франция.

Метод остекловывания экономически выгоден и очень эффективен. Таким образом, его можно рекомендовать для более глубокого изучения ведомствам, курирующим безопасное захоронение радиоактивных отходов в РФ.

На данном этапе наше исследование продолжается. Полученные образцы стекол были переданы в РАН для продолжения экспериментов по изучению прочности и износостойкости смесей.

Список литературы

- Андреев, П. С. Остекловывание радиоактивных отходов / П. С. Андреев, В. В. Петров. – Москва : Изд-во Атомтех, 2018. – 240 с.
- Баранов, С. И. Безопасность захоронения радиоактивных отходов : монография / С. И. Баранов. – Санкт-Петербург : Наука, 2015. – 312 с.
- Васильев, А. А. Геологические аспекты захоронения радиоактивных отходов / А. А. Васильев. – Москва : Геоинформ, 2010. – 180 с.
- Иванов, И. И. Проблемы обращения с радиоактивными отходами / И. И. Иванов // Атомная энергия. – 2017. – Т. 123, № 4. – С. 215-220.
- Козлов, В. К. Методы переработки радиоактивных отходов / В. К. Козлов, П. Д. Сидоров. – Екатеринбург : УГТУ, 2005. – 168 с.
- Соколов, М. Ю. Оценка долговременной безопасности захоронения радиоактивных отходов / М. Ю. Соколов. – Москва : ИБРАЭ, 2016. – 224