



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Направление подготовки: 14.06.01 «Ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика и сопутствующие технологии»  
профиль: 05.17.02 «Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов»  
Инженерная школа ядерных технологий  
Отделение ядерно-топливного цикла

**Научный доклад об основных результатах подготовленной  
научно-квалификационной работы**

Тема научного доклада
Исследование и определение оптимальных режимов работы индукционного плавителя с холодным тиглем в процессе остекловывания высокоактивных радиоактивных отходов

УДК 621.039.7:621.365.3-046.65

Аспирант

Группа	ФИО	Подпись	Дата
A5-81	Тихонов Максим Александрович		

Руководителя профиля подготовки

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Жерин Иван Игнатьевич	д.х.н., профессор		

Руководитель отделения

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЯТЦ	Горюнов Алексей Германович	д.т.н., доцент		

Научный руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Карелин Владимир Александрович	д.т.н., профессор		

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** С развитием атомной энергетики неуклонно возрастает объем радиоактивных отходов, образующихся при переработке облученного ядерного топлива. В настоящее время для перевода высокоактивных отходов в форму, обеспечивающую безопасное их хранение, применяют процесс остекловывания. В промышленном масштабе для остекловывания высокоактивных отходов (ВАО) применяют керамические плавители. Эти аппараты имеют ряд существенных недостатков, не позволяющих длительное время остекловывать ВАО. Поэтому разработка нового способа индукционного плавления в холодном тигле, обеспечивающего возможность замены тигля и нагревание глубинных слоев расплава стекла становится актуальной.

**Цель аттестационной работы** – выбор состава стеклофритты, обеспечивающего возможность получения остеклованных отходов с высокой концентрацией радиоактивных компонентов, оценка технологических параметров процесса индукционного плавления шихты в холодном тигле, состав компонентов которой должен соответствовать составу ВАО направляемых на переработку; изучение их физико-химических характеристик со свойствами материалов, синтезированных по применяемой в настоящее время технологии.

**Во введении** определена тема работы, обоснована актуальность, выбраны цель и область выполняемых исследований, обоснована новизна технологического процесса и перспективы его применения, представлены выносимые на защиту наиболее значимые результаты, представлены достигнутые автором основные результаты работы.

**В первой главе** описаны современные методы переработки ВАО в США, Великобритании и Франции. Проанализирована современная литература по используемым в настоящее время технологиям плавления ВАО. Представлены составы стекол и особенности применения железо-фосфатных стекол для остекловывания ВАО с высоким содержанием оксида хрома. Описаны процессы плавки и термообработки стекла, охлаждения расплава в печи, результаты рентгено-спектрального анализа образцов, выполнены исследования их химической стойкости и поведения образцов в парах воды. Показаны преимущества и

недостатки этих процессов. Хотя описанные процессы отработаны в течение длительного времени и широко распространены на практике их экономические показатели еще далеки от оптимальных значений.

**Во второй главе** описан процесс остекловывания ВАО на стендовой установке с индукционным плавителем с холодным тиглем (ИПХТ). Конструкция установки позволяет повысить объем перерабатываемых ВАО, исключить контакт расплава как с корпусом тигля, так и с системами подачи ВЧ-импульсов и охлаждения, что положительно сказывается на сроке эксплуатации оборудования. Небольшие размеры ИПХТ относительно печей прямого нагрева позволяют минимизировать количество операций по обслуживанию оборудования и увеличить продолжительность работы всей установки.

При иммобилизации модельных ВАО стекловидную матрицу на стендовой установке с ИПХТ улучшаются основные технологические параметры процесса: объем перерабатываемой стеклофритты с кальцинатом возрастает в 2,5 раза и уменьшается продолжительность стартового нагрева исходных компонентов. Производительность установки с ИПХТ по остеклованным модельным ВАО в 6 раз выше аналогичную характеристику для плавителя прямого нагрева. Несмотря на то, что в процессе использовались исходные материалы, влажность которых составляла несколько процентов, в процессе ВЧ-нагрева не происходило интенсивного выделения газообразных продуктов. Поэтому унос твердых продуктов в виде аэрозолей при использовании ИПХТ меньше, чем в существующей технологии. В остеклованном продукте содержится до 15 % об. магнитных материалов на основе оксидов железа, однако данные включения не оказывают влияние на химическую стойкость полученных стеклянных матриц.

**Третья глава** посвящена исследованию процесса остекловывания имитатора ВАО установке индукционного нагрева увеличенной производительности. На практике реализован процесс остекловывания радиоактивных материалов и модельных отходов высокой активности. В ИПХТ промышленных размеров проведены исследования по остекловыванию шламов с увеличенным до 50 % мас. содержанием оксидов отходов в стекле. Обоснованы условия проведения процесса индукционного плавления радиоактивных отходов, содержащих значительные

количества оксидов трехвалентного железа и осуществление процесса концентрирования оксидных форм отходов в исходном материале. Энергозатраты составили примерно 10 кВт·ч на 1 кг получаемого продукта. Коррозионное воздействие перерабатываемых отходов на конструкционные материалы установки с ИПХТ минимально.

**В четвертой главе** исследован процесс остекловывания имитатора отходов с высокими концентрациями Fe и Al на экспериментальной установке ИПХТ и установке ИПХТ с повышенной производительностью. После определения условий проведения процесса остекловывания железосодержащих ВАО методом ИПХТ необходимо изучить возможность остекловывания имитатора более сложного состава – с высоким содержанием Fe и Al. Для этого использовали стендовую и промышленную установки остекловывания ВАО с ИПХТ. Показана возможность остекловывания в ИПХТ отходов с содержанием до 29 % мас. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и до 26 % мас. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с высокой общей концентрацией отходов в стекле и относительно малых значениях энергозатрат на исследуемых установках.

**В пятой главе** обсуждаются конструкции ИПХТ, применяемых в процессе индукционной плавки. Существующие конструкции ИПХТ имеют недостатки: необходимость перемещения тигля относительно индуктора при плавке слитка и низкая производительность при плавке со сливом стекломассы. В предлагаемой конструкции тигля устранены эти недостатки. ИПХТ имеет конструкцию секционного типа. На установке с таким ИПХТ получено боросиликатное и алюминий-фосфатное стекла для иммобилизации ВАО.

Скорость выщелачивания <sup>137</sup>Cs из стекол, полученных с использованием предложенной конструкции ИПХТ, ниже, а их прочность на сжатие – выше, чем у материалов того же состава, полученных в керамических плавителях.

По теме НКР опубликованы 3 статьи в Российских реферируемых и Международных научно-технических журналах, 5 тезисов докладов в сборниках российских и международных конференций.