DOI: 10.25283/2587-9707-2025-2-45-59 УДК 621.039.736

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЭВАКУИРУЕМОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ПЛАВИТЕЛЯ ПРЯМОГО ДЖОУЛЕВОГО НАГРЕВА ДИЗАЙНА ФГУП «ПО «МАЯК»

Ю. А. Горский[1], Д. С. Евстратов[1], Н. В. Мельникова[1], Г. И. Никитин[1], Н. К. Ефимов-Сойни[1], А. И. Боровков[1], П. В. Козлов[2], С. М. Шайдуллин[2], Е. В. Поляков[2], Е. И. Понькин[2]

[1]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург

[2]ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская область

Статья поступила в редакцию 27 марта 2025 г.

В статье рассматриваются ключевые особенности процесса разработки цифрового двойника (ЦД) малогабаритного плавителя прямого джоулевого нагрева дизайна ФГУП «ПО «Маяк», включающие в себя описание комплекса математических моделей в составе ЦД, отражающие их взаимосвязь и порядок создания. Для формирования ЦД приведены основные технологические особенности рассматриваемого плавителя. Установки остекловывания являются сложными высокотехнологичными промышленными изделиями, включающими множество взаимосвязанных физических процессов. Статья затрагивает преимущества применения цифровых платформ в контексте автоматизации сбора и обмена данными между компьютерными моделями. В качестве используемой цифровой платформы рассмотрена ЦП CML-Bench®, разработанная в СПбПУ.

Ключевые слова: *цифровой двойник, цифровая платформа, валидация, малогабаритный удаляемый плавитель, сливное устройство, джоулев нагрев, индукционный нагрев, боросиликатное стекло, остекловывание, высокоактивные отходы, радиоактивные отходы.*

Введение

В процессе эксплуатации ядерных энергетических установок образуются отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) и радиоактивные отходы (РАО). Их перевод в форму, пригодную для транспортировки, хранения и захоронения, является важной задачей современных науки и технологий.

Для переработки жидких высокоактивных РАО (ВАО) обычно используются методы их остекловывания или преобразования в стеклоподобную форму, обладающую устойчивостью в конечном виде. Остекловывание ВАО, образующихся при переработке ОЯТ, производится в промышленном масштабе на предприятии ФГУП «ПО «Маяк» с 1987 года в специальных печах прямого электрического нагрева большой производительности [1]. С целью развития этой технологии проектируется новая установка остекловывания — малогабаритный эвакуируемый плавитель, представляющий собой вертикальную стекловаренную печь цилиндрически-конической формы электрического («джоулева») нагрева

с индукционно обогреваемым донным сливным устройством [2], [3]. Создаваемая конструкция обладает рядом важных преимуществ по сравнению с эксплуатируемыми в настоящее время.

Схематическое изображение прототипа удаляемого малогабаритного плавителя приведено на рис. 1.

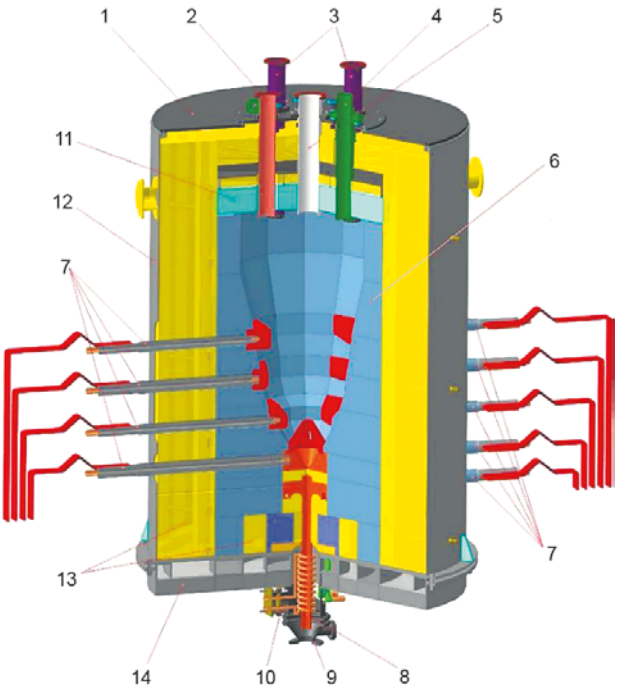

Рис. 1. Схематическое изображение конструкции прототипа удаляемого малогабаритного плавителя дизайна «ПО «Маяк»:

1 — крышка, 2 — патрубок термопары, 3 — узлы подачи стеклофритты, 4 — газоход, 5 — узел подачи раствора, 6 — варочная ванна из керамического огнеупора, 7 — токоподводы с электродами, 8 — фильера, 9 — корпус индуктора, 10 — индуктор, 11 — свод, 12 — корпус, 13 — теплоизоляция, 14 — основание

Ввиду сложности физико-механических и физико-химических процессов проектирование установок остекловывания сопряжено с высокими ресурсными затратами на перепроектирование по итогам натурных испытаний, поэтому, чтобы обоснованно сократить их долю, создают комплексы и программы цифровых (виртуальных) экспериментальных исследований, обеспечивающих возможность проведения связанных и мультифизических расчетов с высоким уровнем точности по ключевым характеристикам.

Госкорпорация «Росатом» активно внедряет цифровые технологии в процессы вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии и обращения с РАО в целях повышения безопасности при оптимизации сроков и стоимости проводимых работ. В частности, они рассматриваются как инструмент сохранения знаний и информационной поддержки принятия решений по развитию Единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами [4].

Сложные изделия, состоящие из большого количества систем и узлов, связанных между собой и оказывающих влияние друг на друга, в литературе часто именуются системами систем (SoS — System of Systems). Для проектирования и эксплуатации сложных технических систем активно применяются методы моделе-ориентированного системного инжиниринга и технология цифровых двойников изделий [5]—[10]. В основе данной концепции лежит идея перехода от проектирования с помощью отдельных независимых моделей подсистем и компонентов к формированию единой цифровой модели, объединяющей все их характеристики и свойства. Национальный стандарт «Цифровые двойники изделий» [11], разработанный под руководством А. И. Боровкова специалистами из СПбПУ и РФЯЦ ВНИИЭФ, определяет общие положения создания ЦД как для вновь разрабатываемых изделий, так и для ранее спроектированных или уже эксплуатируемых. В соответствии со стандартом, необходимо создание системы (семейства) мультидисциплинарных математических и компьютерных моделей (КМ), описывающих поведение сложного устройства в различных условиях эксплуатации. Также, очевидно, должен быть обеспечен обмен информацией между его элементами, например с помощью цифровой платформы разработки и применения ЦД CML-Bench®, предназначенной для решения таких задач [12]—[16].

Цифровая платформа CML-Bench®

Создание единой цифровой модели, описывающей поведение реального промышленного объекта, требует программно-технологического решения, в котором вычислительные аппаратные средства интегрируются с результатами компьютерного проектирования, моделирования и инжиниринга, системами генерации, сбора, обработки и передачи данных, а также визуализации.

В СПбПУ для создания и использования ЦД применяется продукт собственной разработки — Цифровая платформа (ЦП) по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench®, которая представляет собой клиент-серверное веб-приложение, состоящее из пользовательского интерфейса, серверной части, системы управления базами данных и сервиса-решателя.

Основными функциями ЦП являются:

- хранение и управление расчетными данными (математические и компьютерные модели, результаты их верификации и валидации, итоги

решения многодисциплинарных задач, результаты математического, компьютерного и суперкомпьютерного моделирования, многовариантных цифровых испытаний, включая исследования на специализированных виртуальных стендах и полигонах, решения оптимизационных задач);
- формирование и балансировка матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений, например, технологических и производственных;
- автоматизированный запуск и контроль за ходом выполнения процессов цифровых испытаний, а также обработки их результатов (постпроцессинг);
- управление вычислительными ресурсами, как сетью компьютеров, так и суперкомпьютерными ресурсами;
- управление лицензиями инженерного программного обеспечения (передовых отечественных и зарубежных CAE-систем, CAE — Computer-Aided Engineering).

На рис. 2 представлена структура ЦП с точки зрения использования в части организации цифровых (виртуальных) испытаний изделий.

Основными инструментами их проведения на платформе являются:
- средства формирования расчетных моделей, подготовки входных данных и установления начальных условий;
- вычислительное ПО для решения задач моделирования многодисциплинарных (мультифизических) процессов;
- инструменты сбора, обработки и визуализации данных, полученных по результатам моделирования;
- инструменты автоматизации передачи информации между компонентами одной или несколькими КМ.

Обоснованный выбор инженерного программного обеспечения (ПО) компьютерного моделирования включает анализ требований к каждой из КМ, анализ возможностей программных компонентов, реализующих компьютерное моделирование, формирование интеграционных связей между различным ПО и их программными модулями для обеспечения корректной передачи данных между смежными моделями. Важным этапом в этом процессе является четкое понимание архитектуры системы КМ, которая учитывает специфику и особенности работы промышленного оборудования.

При выборе ПО должны приниматься во внимание следующие характеристики: гибкость настроек с учетом сложности моделируемых физико-механических и физико-химических процессов, поддержка параллельных вычислений, возможность запуска программных модулей без использования графического интерфейса, наличие средств автоматизации, в первую очередь

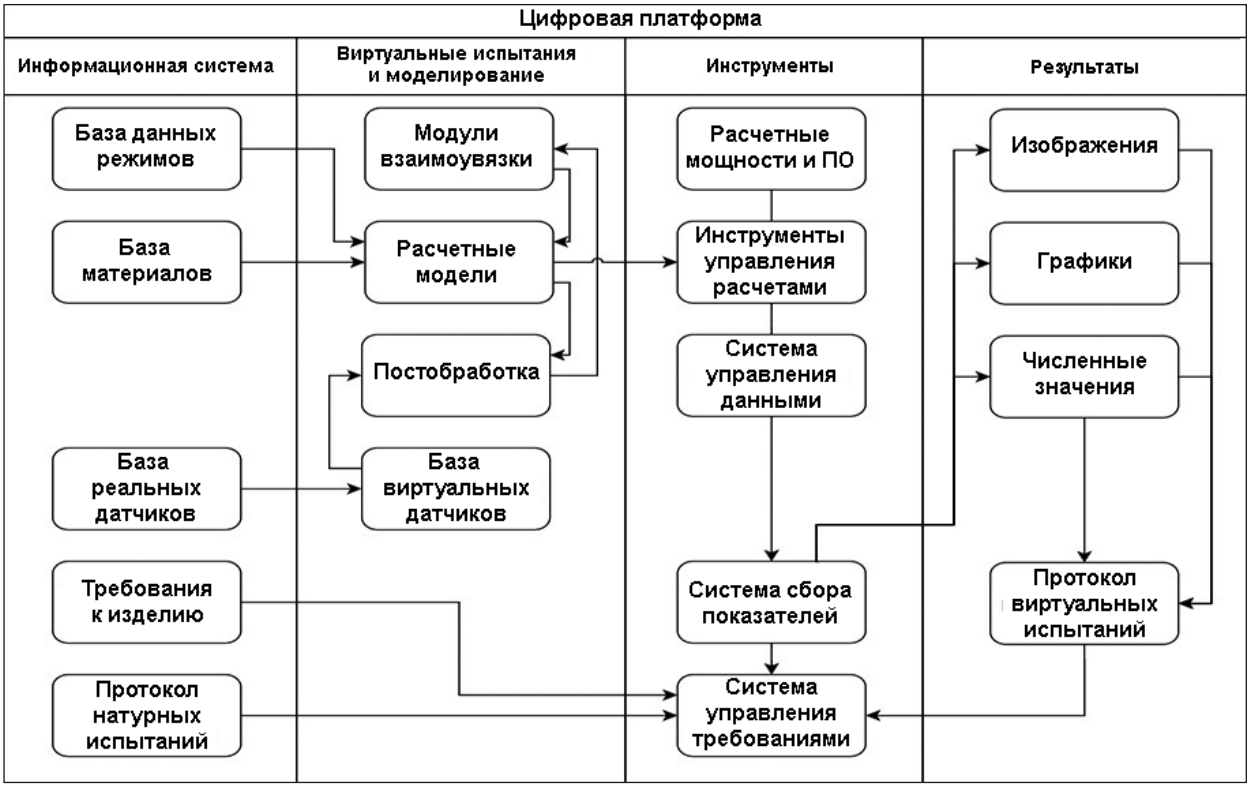

Рис. 2. Структура цифровой платформы

для формирования автоматизированных расчетных цепочек, что зачастую требует создания специализированных интерфейсов. Одним из основных требований, предъявляемых к вычислительному ПО, является возможность решения многодисциплинарных (мультифизических) задач. Единственное ограничение, определяющее способность интеграции разных CAE-систем на цифровой платформе CML-Bench®, — реализуемость запуска ПО КМ в режиме командной строки.

Использование ЦП позволяет создать единую и прозрачную систему хранения и управления данными, моделями и результатами компьютерного моделирования, организовать связи между КМ в части хранения и обмена данными, а также проводить их валидацию по результатам, полученным в ходе экспериментальных исследований и натурных испытаний.

Архитектура цифровой модели

Для определения характеристик и свойств системы необходимо произвести ее детальную декомпозицию на подсистемы, выделить основные происходящие физико-механические процессы, а также ее целевые (единичные) показатели. Таким путем формируются требования к потенциальным функциональным блокам ЦД, которые представлены математическими и компьютерными моделями. Далее, в соответствии с типом решаемых задач (моделирование процессов гидродинамики, тепломассообмена, электродинамики, механики деформируемого твердого тела и прочности), их сложностью и размерностью задачи, шагом дискретизации по пространству и времени должен быть сформирован набор математических и компьютерных моделей.

Совместно со специалистами «ПО «Маяк» выделены основные узлы, функциональные характеристики которых должны быть описаны с помощью математических и компьютерных моделей:

- дозирующее устройство;
- корпус;
- тигель (зона расплава);
- основные электроды;
- система охлаждения;
- узел слива;
- установка индукционного нагрева;
- датчики.

Также они должны определять назначение и поведение изделия на следующих основных режимах работы печи:

- запуск с использованием стартовых нагревателей;
- дозирование и нагрев;
- выдержка;
- аварийные случаи (выдержка без подвода тока);
- режимы слива: инициация и останов.

В процессе декомпозиции формируется перечень отслеживаемых ключевых характеристик узлов, а также параметров технической системы, используемых для валидации КМ, которая включает в себя сравнение результатов, полученных в ходе цифровых (виртуальных) испытаний, с целевыми показателями, определяемыми в соответствии с требованиями к исследуемому узлу.

Результаты декомпозиции системы представлены в виде дерева отношений на рис. 3, где зеленой рамкой выделены ключевые параметры

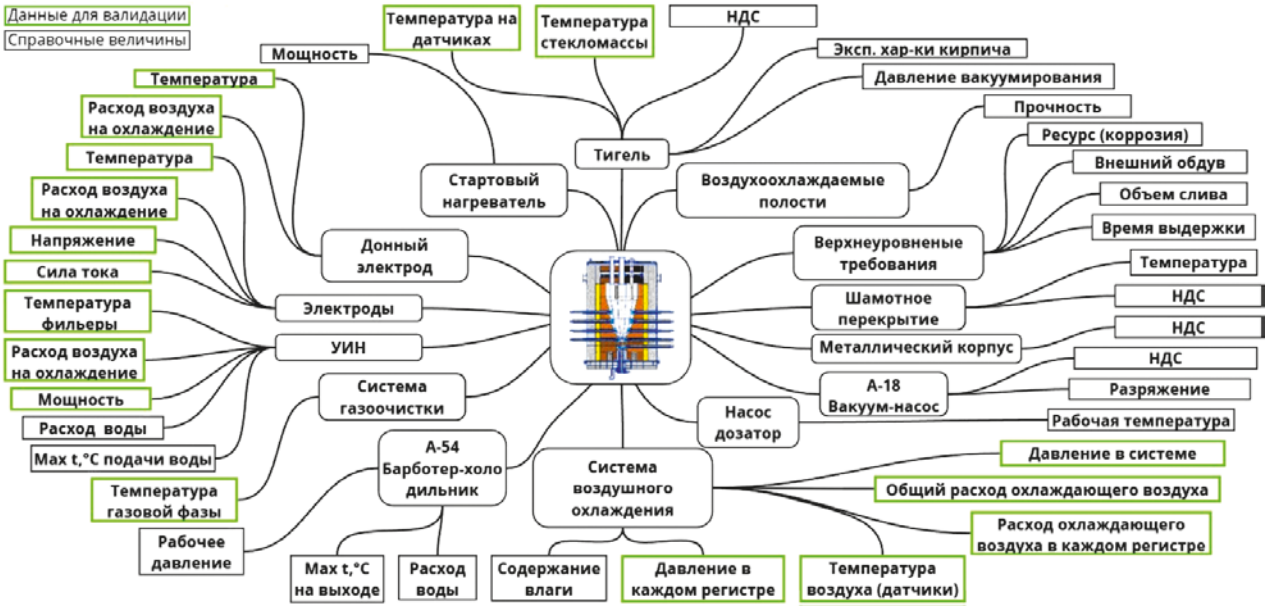

Рис. 3. Характеристики и параметры технической системы для валидации компьютерных моделей

технической системы, используемые для валидации моделей.

В процессе разработки математических и компьютерных моделей высокотемпературных промышленных установок особое внимание уделяется температурным зависимостям физических свойств материалов, таких как электрическая проводимость, плотность, вязкость, теплопроводность и теплоемкость, поскольку они влияют на процессы, происходящие в тигле. Например, вследствие нагрева расплава увеличивается электрическая проводимость стекла [17], а изменение его плотности от температуры приводит к появлению процессов естественной конвекции (перемешиванию стекла). Вязкость его расплавов имеет нелинейную зависимость от температуры [18], что оказывает существенное влияние как на конвективные процессы в заполненном тигле, так и на организацию управляемого удаления расплава через индукционно обогреваемое сливное устройство [19]. В случае, если теплофизические свойства материалов не всегда известны или определены в ограниченном диапазоне температур, необходимо применять различные методы аппроксимаций при обработке имеющихся экспериментальных данных [20].

Помимо поиска и определения физико-механических свойств материалов, необходимо проанализировать и учесть в математическом и компьютерном моделировании все физические процессы, протекающие в печи. Например, кроме нагрева стекла электрическим током (джоулев нагрев), нужно учитывать и гидродинамические процессы, протекающие в расплаве. При варке стекла необходимо также учитывать и тепловое излучение с поверхности расплава, а также процессы в парогазовой фазе. В случае моделирования индукционных процессов следует принимать во внимание влияние скин-эффекта [21], который проявляется в скоплении плотности тока на поверхности проводника при воздействии на него переменного тока высокой частоты.

Цифровая модель (ЦМ) плавителя — это система взаимоувязанных математических и компьютерных моделей:

- тигля;
- системы охлаждения;
- установки индукционного нагрева;
- узла слива;
- прочности и оценки ресурса.

Структурная схема взаимодействия между компьютерными моделями представлена на рис. 4. В зависимости от наилучшего доступного ПО КМ, уровня детализации и степени учета физико-механических процессов архитектура ЦМ и алгоритмы координации между ними могут видоизменяться. Схема построена в нотации IDEF0: каждый блок представляет собой КМ (или их комплекс), стрелки между ними показывают потоки данных, управляющая информация — стрелки сверху, а ресурсы и характеристики — снизу.

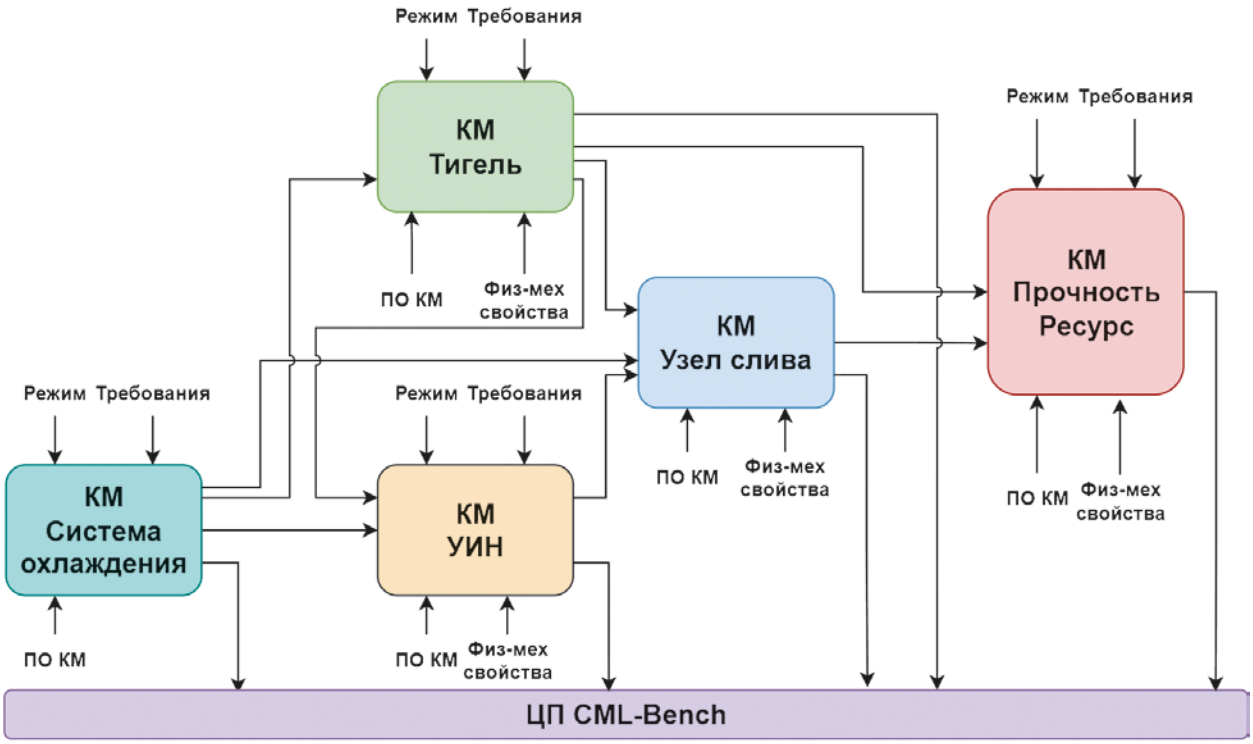

Рис. 4. Схема взаимодействия компьютерных моделей

Управляющей информацией для всех КМ является карта режимов, представляющая детальное описание режимов работы изделия в формализованном виде.

При создании взаимосвязей между компьютерными моделями может возникнуть сложность с передачей данных, поскольку различные КМ зачастую созданы для использования разного инженерного ПО. Решением этой проблемы является формирование автоматизированных расчетных цепочек (фактически скриптов), которые позволяют обрабатывать выходные данные из одной КМ, выполненной в определенной программной системе, и передавать их в другую, реализованную в иной программной системе, как входную информацию в виде граничных условий. Интеграционные связи на рис. 4 изображены стрелками.

Одна из ключевых задач плавителя — эффективное формирование нестационарного пространственного температурного поля, соответствующего технологической фазе:

- на режиме выдержки, длительность которого составляет от 8 до 12 часов, необходимо обеспечить гомогенизацию расплава, не допустив прогрева донной части до температуры, вызывающей слив стекломассы;
- для режима слива характерны несколько коротких интервалов, в течение которых нужно организовать прогрев донной части путем изменения коммутации электродов и подключения установки индукционного нагрева, с последующим отключением и охлаждением донной части до температуры остановки слива.

Существенную роль в этих процессах играет система охлаждения. Она должна эффективно управлять тепловыми потоками и обеспечивать поддержание необходимой температуры, ее цифровые (виртуальные) испытания позволяют оценить эффективность, т. е. достаточность мощности теплоотвода для достижения необходимых технологических параметров.

ЦМ системы охлаждения является совокупностью математических и компьютерных моделей ее составных частей и узлов, таких как периферийное охлаждение корпуса, полостей донного электрода, крышки и фильеры, контуров основания, а также токоподводов и присоединяемых воздушных линий. Ее основные узлы, используемые для формирования КМ, представлены на рис. 5.

В ЦМ плавителя технологический процесс описывается последовательностью квазистационарных состояний. Цифровые (виртуальные) испытания, выполненные для набора таких условий, соответствующих реальной процедуре, позволяют создать массив данных, который

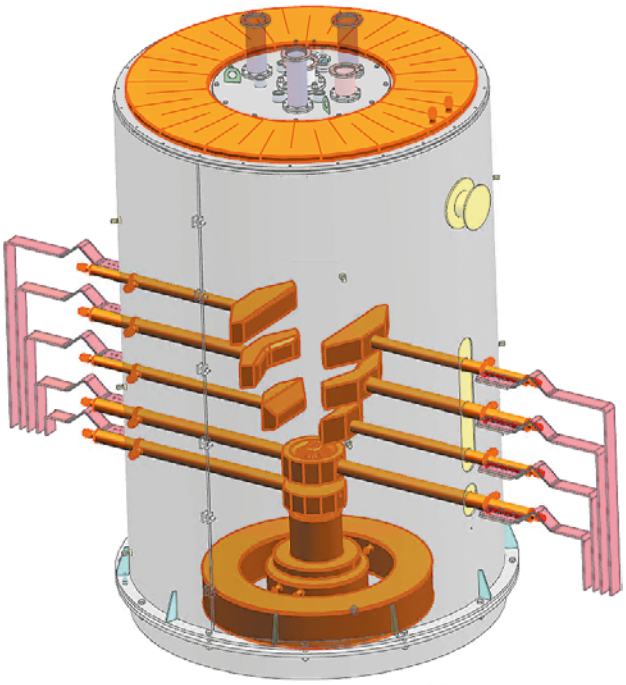

Рис. 5. Основные узлы системы охлаждения плавителя

используется для оценки теплового состояния и содержит зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи от температуры и давления воздуха для каждого из элементов системы.

Результаты цифровых испытаний элементов можно представить в виде трехмерных диаграмм. На рис. 6 показан подобный пример для одного из охлаждаемых электродов.

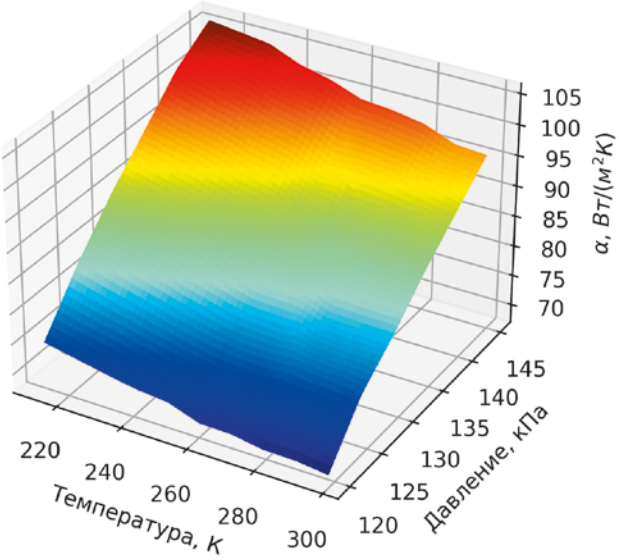

Рис. 6. Диаграмма зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи α на поверхностях охлаждаемого электрода от температуры воздуха и давления в системе

Такие многовариантные расчеты проводят в ПО КМ для решения задач механики сплошных

сред методом конечных объемов, а цифровая платформа CML-Bench® позволяет гибко интегрировать любое необходимое программное обеспечение. На рис. 7 и 8 представлена визуализация поля скорости с отображением линий тока в сечении.

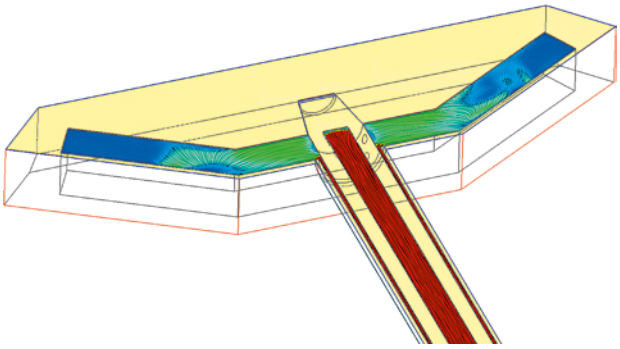

Рис. 7. Поле скорости в сечении модели охлаждаемой полости электрода

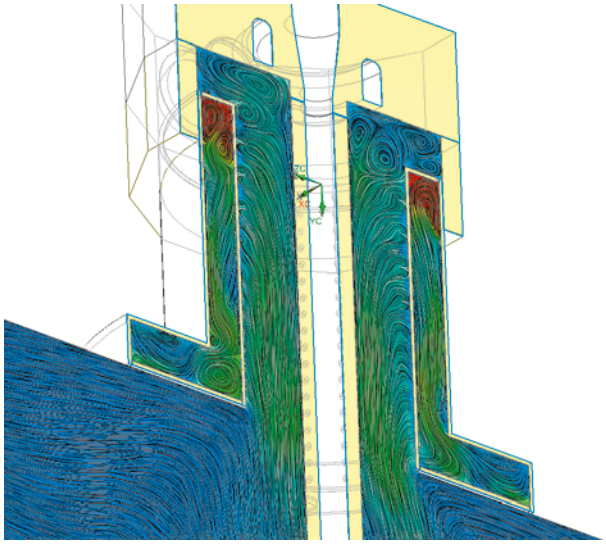

Рис. 8. Поле скорости в сечении модели охлаждаемой полости фильеры

Компьютерная модель тигля является мультидисциплинарной и предназначена для определения теплового состояния на различных режимах работы промышленной установки. Данная КМ позволяет проводить моделирование следующих физических процессов в тигле:

- протекание электрического тока через ванну расплава;
- теплообмен;
- тепловое излучение с поверхностей;
- конвективный теплоперенос.

КМ предусматривает расчеты в стационарной и нестационарной постановках. Интеграция с другими элементами ЦМ осуществляется с помощью дополнительных программных модулей, обрабатывающих результаты компьютерного моделирования в подходящий для трансфера формат.

В цифровой модели плавителя основным ПО для решения проблем, связанных с гидродинамикой, является OpenFOAM. Это программа для вычислений задач механики сплошных сред методом конечных объемов, позволяющая вносить изменения в исходный код с целью создания собственных моделей и алгоритмов вычислений. Возможности ПО позволяют имитировать физические процессы из областей гидро- и газодинамики, теплообмена и электромагнетизма. Одним из ключевых преимуществ является учет их мультифизичности, что особенно важно для компьютерного моделирования функций нагрева расплава в тигле, где электромагнитные явления оказывают существенное влияние на протекание тепловых и гидродинамических процессов.

Архитектура ЦМ обладает достаточной гибкостью для внесения изменений в перечень используемого ПО в случае необходимости.

Цифровые (виртуальные) испытания узла слива включают компьютерное моделирование теплового состояния донной части печи, определение временных характеристик процессов слива стекломассы и отработки последовательности действий оператора с целью выбора оптимальных параметров работы системы охлаждения и установки индукционного нагрева. Тепловой расчет процессов плавки и слива стекла рассмотрен в [19].

В КМ узла слива исследуются и тепловые, и гидродинамические эффекты процедур инициации и остановки слива стекломассы. Для отслеживания уровня расплава и корректного компьютерного моделирования течения стекломассы необходимо использовать методы, применяемые для моделирования многофазных течений. Распространенным является метод моделирования свободной поверхности, который в иностранной литературе имеет название Volume Of Fluid (VOF). Принимая во внимание достаточно высокую ресурсоемкость компьютерного моделирования, предусмотрена возможность моделирования как в осесимметричной, так и в трехмерной постановке. Для ее реализации был разработан дополнительный интеграционный модуль для трансфера данных из трехмерной КМ тигля в осесимметричную модель узла слива (донная часть тигля).

КМ узла слива разделена на две составляющие, одна из которых начальными и граничными условиями соответствует процессу инициации течения стекломассы, а вторая — его прекращению

или остановке. Входными данными, импортируемыми в данную модель, являются следующие:

- температурное поле, передаваемое из КМ тигля, описывает распределение температуры в плавителе в момент времени непосредственно перед инициацией слива, т. е. с учетом проведенной перекоммутации электродов и прогрева донной части;
- мощность тепловыделений на фильере передается из КМ установки индукционного нагрева с целью назначения в виде граничных условий и обеспечения необходимого прогрева донной части для инициации слива;
- из КМ системы охлаждения импортируются значения коэффициента теплоотдачи и температуры воздуха, соответствующие инициации и остановке слива.

По результатам компьютерного моделирования инициации слива осуществляется сохранение и последующая выгрузка температурного поля в плавителе. Это необходимо для корректного задания начального распределения температуры в КМ остановки слива, которой соответствует аналогичный инициации набор импортируемых данных, но значения прикладываемых граничных условий отличаются. Основным отличием этих процессов является то, что при инициации все граничные условия характерны для повышения температуры донной части, а в случае остановки — для ее снижения и обеспечения частичного затвердевания стекла внутри сливной фильеры.

КМ установки индукционного нагрева — это мультидисциплинарная модель для анализа электромагнитных полей и определения теплового состояния сливной фильеры и спирали индуктора. В базовом варианте она предназначена для решения осесимметричной задачи о переменных токах для анализа магнитных полей и определения мощности тепловыделений в фильере от наведенных токов высокой частоты, создаваемых индуктором с заранее известными электрическими параметрами (сила тока или напряжение). Результаты расчета передаются в компьютерные модели узла слива и тигля для определения теплового состояния печи.

Реализация КМ на цифровой платформе CML-Bench® позволяет решать задачи для установления оптимальной конфигурации элементов (например, спирали индуктора) или для подбора режима работы.

Циклический характер процессов эксплуатации промышленной установки предопределяет необходимость компьютерного моделирования с целью оценки количества деталей и циклической долговечности конструкционных элементов. КМ прочности и ресурса предназначена для анализа выполнения требований по надежности и долговечности при возникновении термоциклических напряжений. В модели используются аналитические соотношения по определению ресурса (формула Мэнсона) на основе конечно-элементного установления полей термонапряжений.

В цифровой двойник промышленной установки вводятся виртуальные датчики (точки сбора информации из компьютерных моделей), которые можно расположить в любых частях конструкции. Конечно, в первую очередь их желательно разместить в критических зонах, а также на участках, где установлены реальные датчики — это необходимо для проведения валидации компьютерных моделей и анализа функциональных характеристик изделия. На цифровой платформе CML-Bench® модель виртуальных датчиков представляет собой документ с информацией о них и реально существующих индикаторах на изделии, а также программный код, производящий сбор и фиксацию информации.

Для рассматриваемого варианта плавителя проведен анализ данных по испытаниям для режима выдержки, записанным в информационной системе экспериментальной установки «ПО «Маяк». Средствами языка Python и библиотеки Pandas создан программный код (скрипт), позволяющий считывать показания анализируемых датчиков, визуализировать информацию, относящуюся к определенным отрезкам времени, получать осредненные по времени значения и создавать на их основе файл с целевыми величинами в специальном формате для загрузки на ЦП CML-Bench®.

Результаты разработки и валидации моделей

На рис. 9 в качестве примера представлены поля распределения температур в плавителе на режиме выдержки.

Определить уровень адекватности компьютерной модели реальному объекту можно с помощью процесса валидации. Для этого разрабатывается матрица целевых показателей, основанная на данных натурных испытаний (величин температур с датчиков — термопар). В процессе создания КМ тигля были реализованы скрипты, позволяющие анализировать результаты компьютерного моделирования процесса работы плавителя и выгружать показания по температурам с термопар на цифровую платформу CML-Bench®.

На рис. 10 приведено сравнение между экспериментальными данными и результатами

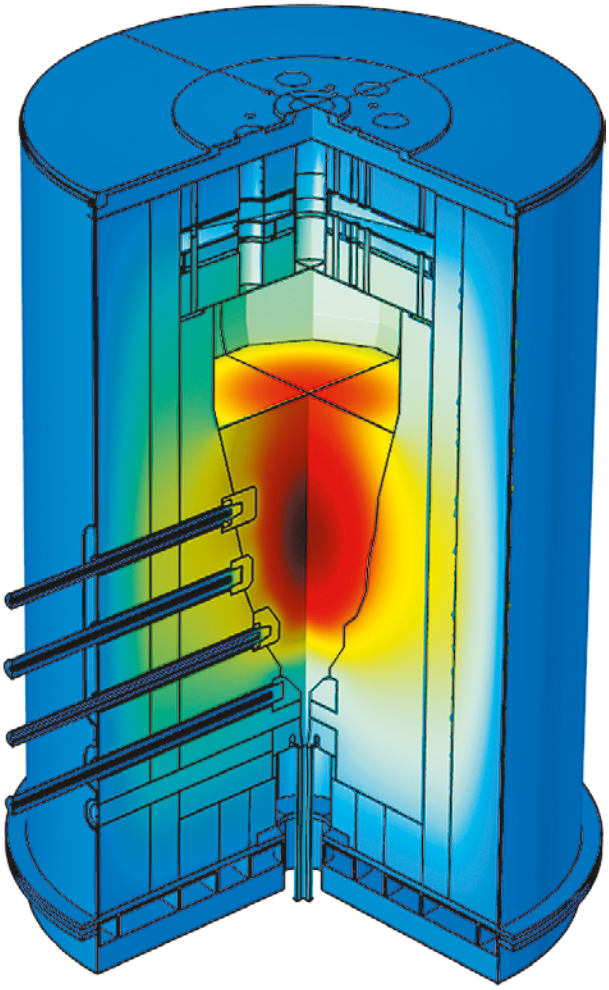

Рис. 9. Поля температур в плавителе на режиме выдержки

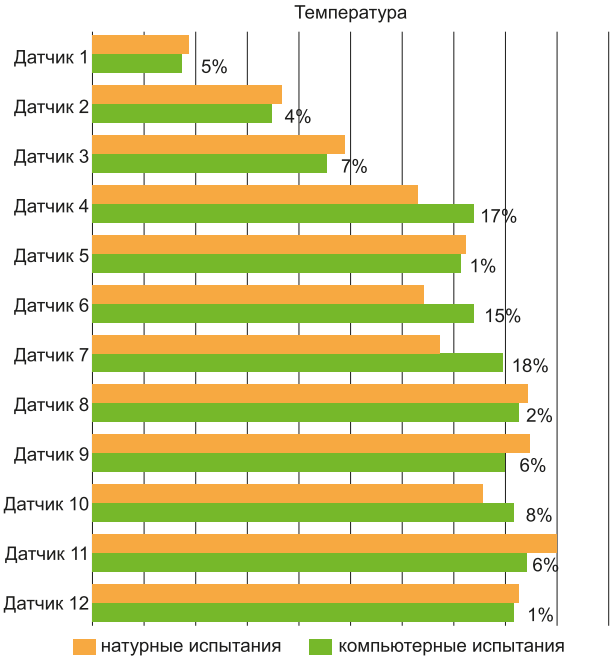

Рис. 10. Гистограмма сравнения значений температур, определенных в компьютерном моделировании и полученных с реальных датчиков

компьютерного моделирования. Отличия по ключевым характеристикам на основе показаний термопар в среднем не превышают 10%, что, учитывая сложность физико-механических процессов и эксплуатационных режимов, можно считать удовлетворительным.

Заключение

Применение технологий ЦД и цифровых (виртуальных) испытаний, обеспечивающих возможность проведения связанных и мультифизических расчетов, позволяет значительно снизить затраты при проектировании промышленных установок и ускорить вывод на рынок новых усовершенствованных образцов. В процессе выполненных исследований реализована архитектура ЦМ малогабаритного плавителя, включая систему математических и компьютерных моделей, описывающих работу ее основных узлов: тигля, системы охлаждения, узла слива и индукционного нагрева.

Валидация разработанных компьютерных моделей на основе данных натурных испытаний показала, что расхождение значений температур, полученных с реальных и виртуальных датчиков, составляет не более 10% (рис. 10), что подтверждает высокий уровень адекватности созданной ЦМ малогабаритного плавителя, представляющей систему взаимоувязанных математических и компьютерных моделей. Для дальнейшего уточнения и повышения уровня их адекватности необходимо расширять количество учитываемых в процессе валидации ключевых параметров, что делает актуальной задачу повышения качества результатов экспериментов, а также уточнения физико-механических свойств материалов и данных опытной эксплуатации плавителя.

Цифровая трансформация процесса разработки, проектирования и эксплуатации сложного промышленного оборудования требует единого информационного пространства управления сведениями об изделии (количественными и качественными характеристиками, конструкторской документацией и многими другими параметрами). В этом контексте использование цифровой платформы CML-Bench® позволило автоматизировать процессы компьютерного моделирования, обработку больших объемов информации, получаемой в результате многовариантных цифровых испытаний, и, конечно же, взаимоувязать компьютерные модели между собой.

Разработанная архитектура ЦМ, включающей систему сопряженных математических и

компьютерных моделей, обладает необходимым набором инструментов для:

- определения оптимального режима функционирования системы охлаждения;
- моделирования процессов инициации и остановки слива стекломассы.

Реализованная ЦМ плавителя является результатом успешного применения технологии ЦД. Подход, описанный при создании ее архитектуры, может быть использован на различных этапах жизненного цикла: для разработки и усовершенствования конструкции изделия, планирования экспериментов и оптимизации технологических процессов.

Важно подчеркнуть, что основой цифрового двойника является ЦМ — система сложных мультидисциплинарных математических и компьютерных моделей. Любые значимые изменения в них сопровождаются трудоемким процессом уточнения всей цепочки преобразований. Одним из перспективных вариантов решения данной задачи является создание редуцированных моделей (пониженного порядка) на основе полномасштабного ЦД. Симуляция на их основе — это метод значительного снижения вычислительной сложности или требуемого объема памяти КМ при сохранении заданного уровня ее адекватности в пределах контролируемых отличий от результатов натурных испытаний. Кроме этого, отметим, что на стадии эксплуатации изделия возникает потребность в поддержании подсистем на оптимальном уровне, осуществлении контроля показателей с учетом возможности обнаружения аномалий, а в некоторых случаях и детально обоснованного предиктивного мониторинга. Для рассматриваемого плавителя концепт интеллектуального помощника описан в [22].

Таким образом, определенная система подходов и технологий может обеспечить достаточную степень детализации мультифизических процессов, протекающих в промышленных установках подобного класса, а также существенно повысить уровень адекватности математических и компьютерных моделей конкретному объекту и реальным процессам. При разработке новых и усовершенствованных изделий возникает необходимость систематизации и цифровой трансформации процесса разработки и проектирования на основе технологии цифровых двойников [5]. За счет применения подобного подхода удается уйти от ситуации, когда число изменений и, соответственно, возрастающие затраты на их внесение распределяются на протяжении всех стадий жизненного цикла процесса. Большая часть изменений и, как следствие, издержек сосредоточены на этапе проектирования, на котором формируются конкурентоспособные функциональные, технические и стоимостные характеристики, которые должны обеспечить превосходство технологий и продукции над зарубежными аналогами, что и составляет национальную задачу на современном этапе — достижение технологического лидерства.

Литература

1. *Глаголенко Ю. В., Дзекун Е. Г., Дрожко Е. Г., Медведев Г. М., Ровный С. И., Суслов А. П.* Стратегия обращения с радиоактивными отходами на производственном объединении «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 1996. № 2. С. 3—10.
2. *Шайдуллин С. М., Ремизов М. Б., Козлов П. В., Мелентьев А. Б., Вербицкий К. В., Бендасов Д. И., Ребрин М. А.* Новый эвакуируемый малогабаритный плавитель с донным сливом дизайна ФГУП «ПО «МАЯК» для отверждения ВАО в боросиликатное стекло // Вестник НИЯУ МИФИ. 2021. Т. 10. № 2. С. 183—190. DOI: 10.1134/S2304487X21020097.
3. *Ремизов М. Б., Мелентьев А. Б., Шайдуллин С. М., Вербицкий К. В., Козлов П. В., Бендасов Д. И.* Разработка и испытания эвакуируемого малогабаритного плавителя прямого джоулевого нагрева дизайна ФГУП «ПО «МАЯК» для отверждения ЖРО от переработки ОЯТ в боросиликатное стекло в рамках создания нового комплекса остекловывания ВАО // Радиоактивные отходы. 2024. № 1 (26). С. 35—46. DOI: 10.25283/258 -9707-2024-1-35-46.
4. Фцп-ярб.рф: информ.-справочный портал. — URL: https://фцп-ярб.рф/society/news/v-sankt-peterburge-pri-podderzhke-goskorporatsii-rosatom-proshel-otraslevoy-nauchno-tekhnicheskiy-se/ (дата обращения: 20.01.2025).
5. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: монография / под ред. А. И. Боровкова. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022. 492 с.
6. *Боровков А. И., Рябов Ю. А., Марусева В. М.* Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // В кн. Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии. — М. : Автономная некоммерческая образовательная организация высшего профессионального образования «Сколковский институт науки и технологий», 2017. С. 24—35.
7. *Боровков А. И. и др.* Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // Оборонная техника. 2018. № 1. С. 6—33.

8. *Боровков А. И., Рябов Ю. А., Гамзикова А. А.* Цифровые двойники в нефтегазовом машиностроении // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2020. № 6 (102). С. 30—36.
9. *Боровков А. И., Власюк Ю. В., Ким Р. В.* Разработка цифрового полигона испытаний транспортного упаковочного комплекта, оптимизация конструкции // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств : Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 27 мая 2022 года / Под ред. Ю. Я. Болдырева, П. А. Аркина. — Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022. С. 145—155.
10. *Горский Ю. А., Паутова Т. А., Гаврилов П. А. и др.* Возможности цифрового двойника ГТД на базе цифровой платформы CML-Bench® // Климовские чтения — 2022: перспективные направления развития авиадвигателестроения : Сборник статей научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 27—28 октября 2022 года. — Санкт-Петербург : Скифия-принт, 2022. С. 189—196. DOI: 10.53454/9785986206257_189.
11. ГОСТ 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. — М. : Российский институт стандартизации, 2021. 15 с.
12. *Боровков А. И. и др.* Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench® (часть 1) // САПР и графика. 2023. № 8 (324). С. 42—51.
13. *Боровков А. И., Бураков В. В.* Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench® (часть 2) // САПР и графика. 2023. № 9 (325). С. 54—64.
14. *Боровков А. И. и др.* Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench® (часть 3) // САПР и графика. 2023. № 10 (326). С. 50—62.
15. *Боровков А. И. и др.* Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench® (часть 4) // САПР и графика. 2024. № 5 (333). С. 4—13.
16. *Боровков А. И. и др.* Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench® (часть 5) // САПР и графика. 2024. № 7 (335). С. 4—16.
17. *Ремизов М. Б., Козлов П. В., Власова Н. В. и др.* Тепло- и электропроводность расплавов алюмофосфатных и боросиликатных стекол, содержащих имитаторы высокоактивных отходов от переработки ОЯТ // Физика и химия стекла. 2019. Т. 45. № 2. С. 120—129. DOI: 10.1134/S0132665119020112.
18. *Шайдуллин С. М., Никулина А. Ю., Ремизов М. Б., Козлов П. В.* Термовискозиметрические характеристики боросиликатных стекол для перспективной области легкоплавких составов, разрабатываемых для удаляемого малогабаритного плавителя дизайна Производственного объединения «Маяк» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 3. С. 50—60. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4569.
19. *Понькин Е. И., Шайдуллин С. М., Дудкин В. А.* Разработка математической модели удаляемого малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2024. № 4 (116). С. 47—57.
20. *Ojovan M. I.* Viscosity and Glass Transition in Amorphous Oxides // Advances in Condensed Matter Physics. 2008. Vol. 2008. Article ID 817829. 23 p. DOI: 10.1155/2008/817829.
21. *Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е.* Индукторы для индукционного нагрева. Л. : Энергия, 1974. 264 с.
22. *Вершинин Д. В., Горский Ю. А., Мельникова Н. В. и др.* Концепт интеллектуального помощника для печи остекловывания // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2024 по направлению «Инновационные ядерные технологии» : Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции, Снежинск, 31 января — 02 февраля 2024 года. — М. : Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 2024. С. 203—208.

Информация об авторах

Горский Юрий Александрович, начальник отдела кросс-отраслевых технологий Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг», ФГАОУ ВО «СПбПУ» (194064, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), e-mail: gorskij_yua@spbstu.ru.

Евстратов Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер отдела кросс-отраслевых технологий Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг», ФГАОУ ВО «СПбПУ» (194064, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), e-mail: evstratov_ds@spbstu.ru.

Мельникова Наталья Владимировна, инженер отдела кросс-отраслевых технологий Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг», ФГАОУ ВО «СПбПУ» (194064, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), e-mail: melnikova_nv@spbstu.ru.

Никитин Георгий Игоревич, инженер-исследователь отдела кросс-отраслевых технологий Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг», ФГАОУ ВО «СПбПУ» (194064, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), e-mail: nikitin_gi@spbstu.ru.

Ефимов-Сойни Николай Константинович, кандидат технических наук, доцент, заместитель руководителя Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг», ФГАОУ ВО «СПбПУ» (194064, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), e-mail: efimovs_nk@spbstu.ru.

Боровков Алексей Иванович, кандидат технических наук, профессор, проректор по цифровой трансформации СПбПУ, руководитель Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг», ФГАОУ ВО «СПбПУ» (194064, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), e-mail: vicerector.ap@spbstu.ru.

Козлов Павел Васильевич, кандидат технических наук, доцент, начальник исследовательской лаборатории по обращению и кондиционированию РАО Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: kozlov_pavel@inbox.ru.

Шайдуллин Сергей Минуллович, ведущий инженер-технолог лаборатории по обращению и кондиционированию РАО Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: shaidullinsergey@gmail.com.

Поляков Евгений Викторович, начальник группы, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: e.v.polyakov@yandex.ru.

Понькин Евгений Игоревич, начальник группы ядерной безопасности исследовательской лаборатории физической технологии Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: epnk@rambler.ru.

Библиографическое описание статьи

Горский Ю. А., Евстратов Д. С., Мельникова Н. В., Никитин Г. И., Ефимов-Сойни Н. К., Боровков А. И., Козлов П. В., Шайдуллин С. М., Поляков Е. В., Понькин Е. И. Особенности разработки цифрового двойника эвакуируемого малогабаритного плавителя прямого джоулевого нагрева дизайна ФГУП «ПО «Маяк» // Радиоактивные отходы. 2025. № 2 (31). С. 45—59. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-2-45-59.

SPECIAL CONSIDERATIONS RELATED TO THE DIGITAL TWIN DEVELOPMENT FOR AN EVACUABLE SMALL-SIZED DIRECT JOULE HEATING MELTER DESIGNED BY PA MAYAK

Gorsky Yu. A.[1], Evstratov D. S.[1], Melnikova N. V.[1], Nikitin G. I.[1], Efimov-Soini N. K.[1], Borovkov A. I.[1], Kozlov P. V.[2], Shaidullin S. M.[2], Polyakov E. V.[2], Ponkin E. I.[2]

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

[2]FSUE "PA "Mayak", Ozersk, Chelyabinsk region, Russia

Article received on March 27, 2025

The article discusses the key features associated with the development of a digital twin (DT) for a small-sized direct Joule heating melter designed by PA Mayak, which also describes a set of mathematical models constituting to the digital twin of the product and reflecting the relationship between the models and their development flowchart.

The article presents the key performance characteristics of the considered melter, the data on which were required to develop the DT. Vitrification units are complex high-tech industrial products involving multiple interconnected physical processes. The article touches upon the advantages of digital platforms and their application in the context of automated collection and exchange of data between the computer models. The paper considers the application of the CML-Bench® CPU developed at SPbPU as such a digital platform.

Keywords: *digital twin, digital platform, validation, small-sized removable melter, drain device, Joule heating, induction heating, borosilicate glass, vitrification, high-level waste, radioactive waste.*

References

1. Glagolenko Yu. V., Dzekun E. G., Drozhko E. G., Medvedev G. M., Rovny S. I., Suslov A. P. Strategiya obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami na proizvodstvennom ob'yedinenii "Mayak" [Radioactive waste management strategy at the Mayak production association]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation safety issues,* 1996, no. 2, pp. 3—10.
2. Shaydullin S. M., Remizov M. B., Kozlov P. V., Melent'ev A. B., Verbitsky K. V., Bendasov D. I., Rebrin M. A. Novyy evakuiruyemyy malogabaritnyy plavitel' s donnym slivom dizayna FGUP "PO "MAYAK" dlya otverzhdeniya VAO v borosilikatnoye steklo [New Removable Small Melter Equipped with a Bottom Drain System Developed at the Mayak Production Association for Immobilization of HLW in Borosilicate Glass]. *Vestnik NIYAU MIFI — Bulletin of NRNU MEPhI,* 2021, vol. 10, no. 2, pp. 183—190. DOI: 10.1134/S2304487X21020097.
3. Remizov M. B., Melentyev A. B., Shaidullin S. M., Verbitsky K. V., Kozlov P. V., Bendasov D. I. Razrabotka i ispytaniya evakuiruyemogo malogabaritnogo plavitelya pryamogo dzhoulevogo nagreva dizayna FGUP "PO "MAYAK" dlya otverzhdeniya ZHRO ot pererabotki OYAT v borosilikatnoye steklo v ramkakh sozdaniya novogo kompleksa osteklovyvaniya VAO [Evacuable Small-Sized Direct Joule-Heated Melter Designed by PA Mayak to Immobilize LRW from SNF Reprocessing into Borosilicate Glass Developed and Tested as Part of a New HLW Vitrification Complex]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2024, no. 1 (26), pp. 35—46. DOI: 10.25283/258 -9707-2024-1-35-46.
4. фцп-ярб.рф: information and reference portal. — URL: https://фцп-ярб.рф/society/news/v-sankt-peterburge-pri-podderzhke-goskorporatsii-rosatom-proshel-otraslevoy-nauchno-tekhnicheskiy-se/ (accessed on: 20.01.2025).
5. *Tsifrovyye dvoyniki v vysokotekhnologichnoy promyshlennosti: monografiya* [Digital Twins in the High-Technology Manufacturing Industry] / edited by A. I. Borovkov. Saint-Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2022. 492 p.
6. Borovkov A. I., Ryabov Yu. A., Maruseva V. M. *Novaya paradigma tsifrovogo proyektirovaniya i modelirovaniya global'no konkurentosposobnoy produktsii novogo pokoleniya* [New paradigm of digital design development and modeling of globally competitive products of the new generation]. In book: "Tsifrovoye proizvodstvo: metody, ekosistemy, tekhnologii" [Digital Production: Methods, Ecosystems, Technologies]. Moscow, MSU Skolkovo Publ., 2017. Pp. 24—35.
7. Borovkov A. I. et al. Tsifrovyye dvoyniki i tsifrovaya transformatsiya predpriyatiy OPK [Digital twins and digital transformation of defense industry enterprises]. *Oboronnaya tekhnika — Defense equipment,* 2018, no. 1, pp. 6—33.
8. Borovkov A. I., Ryabov Yu. A., Gamzikova A. A. Tsifrovyye dvoyniki v neftegazovom mashinostroyenii [Digital twins in oil and gas engineering]. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU — Business magazine Neftegaz.* RU, 2020, no. 6 (102), pp. 30—36.
9. Borovkov A. I., Vlasyuk Yu. V., Kim R. V. Razrabotka tsifrovogo poligona ispytaniy transportnogo upakovochnogo komplekta, optimizatsiya konstruktsii [Development of a digital testing ground for a transport packaging kit, design optimization]. *Peredovyye proizvodstvennyye tekhnologii : komp'yuternyye (superkomp'yuternyye) tekhnologii i organizatsiya naukoyemkikh proizvodstv: Sb. tezisov dokl. Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konf.* (Saint Petersburg, 27.05.2022) [Advanced manufacturing technologies: computer (supercomputer) technologies and organization of high-tech industries : Collection of report abstracts. National scientific and practical conference, Saint Petersburg, 27.05.2022]. Ed. by Yu. Ya. Boldyrev, P. A. Arkina. — Saint Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2022. P. 145—155.
10. Gorsky Yu. A., Pautova T. A., Gavrilov P. A. et al. Vozmozhnosti tsifrovogo dvoynika GTD na baze tsifrovoy platformy CML-Bench® [Capabilities of a GTE digital twin based on the CML-Bench® digital platform]. *Klimovskiye chteniya — 2022: perspektivnyye napravleniya razvitiya aviadvigatelestroyeniya: Sbornik statey nauchno-tekhnicheskoy konf.* [Klimov Readings — 2022: Promising Trends in Aircraft Engine Design Development: Collection of articles from the scientific and technical conference], Saint Petersburg, October 27—28, 2022. Saint Petersburg, Skifiya-print Publ., 2022. Pp. 189—196. DOI: 10.53454/9785986206257_189.

11. GOST 57700.37-2021. *Komp'yuternyye modeli i modelirovaniye. Tsifrovyye dvoyniki izdeliy. Obshchiye polozheniya* [Computer models and modeling. Digital twins of products. General Provisions]. Moscow, Rossiyskiy institut standartizatsii Publ., 2021. 15 p.
12. Borovkov A. I. et al. Tsifrovaya platforma po razrabotke i primeneniyu tsifrovykh dvoynikov (Digital Twins) CML-Bench® (chast' 1) [Digital platform for the development and application of digital twins (Digital Twins) CML-Bench® (part 1)]. *SAPR i grafika — CAD and graphics,* 2023, no. 8 (324), pp. 42—51.
13. Borovkov A. I., Burakov V. V. et al. Tsifrovaya platforma po razrabotke i primeneniyu tsifrovykh dvoynikov (Digital Twins) CML-Bench® (chast' 2) [Digital platform for the development and application of digital twins (Digital Twins) CML-Bench® (part 2)]. SAPR i grafika — CAD and graphics, 2023, no. 9 (325), pp. 54—64.
14. Borovkov A. I. et al. Tsifrovaya platforma po razrabotke i primeneniyu tsifrovykh dvoynikov (Digital Twins) CML-Bench® (chast' 3) [Digital platform for the development and application of digital twins (Digital Twins) CML-Bench® (part 3)]. *SAPR i grafika — CAD and graphics,* 2023, no. 10 (326), pp. 50—62.
15. Borovkov A. I. et al. Tsifrovaya platforma po razrabotke i primeneniyu tsifrovykh dvoynikov (Digital Twins) CML-Bench® (chast' 4) [Digital platform for the development and application of digital twins (Digital Twins) CML-Bench® (part 4)]. *SAPR i grafika — CAD and graphics,* 2024, no. 5 (333), pp. 4—12.
16. Borovkov A. I. et al. Tsifrovaya platforma po razrabotke i primeneniyu tsifrovykh dvoynikov (Digital Twins) CML-Bench® (chast' 5) [Digital platform for the development and application of digital twins (Digital Twins) CML-Bench® (part 5)]. *SAPR i grafika — CAD and graphics,* 2024, no. 7 (335), pp. 4—16.
17. Remizov M. B., Kozlov P. V., Vlasova N. V. et al. Teplo- i elektroprovodnost' rasplavov alyumofosfatnykh i borosilikatnykh stekol, soderzhashchikh imitatory vysokoaktivnykh otkhodov ot pererabotki OYAT [Thermal and electrical conductivity of aluminophosphate and borosilicate glass melts containing simulators of high-level waste from spent nuclear fuel reprocessing]. *Fizika i khimiya stekla — Glass Physics and Chemistry,* 2019, vol. 45, no. 2, pp. 120—129. DOI: 10.1134/S0132665119020112.
18. Shaidullin S. M., Nikulina A. Yu., Remizov M. B., Kozlov P. V. Termoviskozimetricheskie kharakteristiki borosilikatnykh stekol dlya perspektivnoj oblasti legkoplavkikh sostavov, razrabatyvaemykh dlya udalyaemogo malogabaritnogo plavitelya dizajna Proizvodstvennogo ob"edineniya “Mayak” [Thermoviscosimetric Characteristics of Borosilicate Glasses with Regard to the Promising Area of Low-Melting Compositions Currently Being Developed for the Removable Small-Scale Melter Designed by Mayak Production Association]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering,* 2024, vol. 335, no. 3, pp. 50—60. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4569.
19. Pon’kin Ye. I., Shaydullin S. M., Dudkin V. A. Razrabotka matematicheskoy modeli udalyayemogo malogabaritnogo plavitelya dizayna FGUP “PO “Mayak” [Development of a mathematical model for a removable small-scale melter of Mayak PA design]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation safety issues,* 2024, no. 4 (116), pp. 47—57.
20. Ojovan M. I. Viscosity and Glass Transition in Amorphous Oxides. *Advances in Condensed Matter Physics,* 2008, vol. 2008. Article ID 817829. 23 p. DOI: 10.1155/2008/817829.
21. Slukhotsky A. E., Ryskin S. E. *Induktory dlya induktsionnogo nagreva* [Inductors for induction heating]. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 264 p.
22. Vershinin D. V., Gorskii Yu. A., Melnikova N. V. et al. Kontsept intellektual'nogo pomoshchnika dlya pechi osteklovyvaniya [Concept of an intelligent assistant for a vitrification furnace]. *Nauchnaya sessiya NIYAU MIFI-2024 po napravleniyu "Innovatsionnyye yadernyye tekhnologii" : Sb. nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific session of NRNU MEPhi-2024 in the area of innovative nuclear technologies: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific and practical conference], Snezhinsk, 2024, 31 January — 02 February. Moscow, NRNU MEPhI Publ., 2024. Pp. 203—208.

Information about the authors

Gorsky Yuri Alexandrovich, Head of the Department of Cross-industry Technologies at the Advanced Engineering School “Digital Engineering”, FSAEI “SPbPU” (29, Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 194064, Russia), e-mail: gorskij_yua@spbstu.ru.

Evstratov Dmitry Sergeevich, Senior Engineer, Department of Cross-industry Technologies at the Advanced Engineering School "Digital Engineering", FSAEI "SPbPU" (29, Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 194064, Russia), e-mail: evstratov_ds@spbstu.ru.

Melnikova Natalia Vladimirovna, Engineer, Department of Cross-industry Technologies at the Advanced Engineering School "Digital Engineering", FSAEI "SPbPU" (29, Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 194064, Russia), e-mail: melnikova_nv@spbstu.ru.

Nikitin Georgy Igorevich, Research Engineer, Department of Cross-industry Technologies at the Advanced Engineering School "Digital Engineering", FSAEI "SPbPU" (29, Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 194064, Russia), e-mail: nikitin_gi@spbstu.ru.

Efimov-Soini Nikolay Konstantinovich, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Engineering Center "Computer Engineering Center" at the Advanced Engineering School "Digital Engineering", FSAEI "SPbPU" (29, Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 194064, Russia), e-mail: efimovs_nk@spbstu.ru.

Borovkov Alexey Ivanovich, PhD, Professor, Vice-rector for Digital Transformation of St. Petersburg State University, Head of the Department at the Advanced Engineering School "Digital Engineering", FSAEI "SPbPU" (29, Politechnicheskaya st., St. Petersburg, 194064, Russia), e-mail: vicerector.ap@spbstu.ru.

Kozlov Pavel Vasilyevich, PhD, Associate Professor, Head of the Research Laboratory for Handling and Conditioning of Radioactive Waste of the Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: kozlov_pavel@inbox.ru.

Shaidullin Sergey Minullovich, Leading Process Engineer of the Research Laboratory for Handling and Conditioning of Radioactive Waste of the Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: shaidullinsergey@gmail.com.

Polyakov Evgeny Viktorovich, Head of the group, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: e.v.polyakov@yandex.ru.

Ponkin Evgeny Igorevich, Head of the Nuclear Safety Group of the Research Laboratory of Physical Technology of the Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: epnk@rambler.ru.

Bibliographic description

Gorsky Yu. A., Evstratov D. S., Melnikova N. V., Nikitin G. I., Efimov-Soini N. K., Borovkov A. I., Kozlov P. V., Shaidullin S. M., Polyakov E. V., Ponkin E. I. Special considerations related to the digital twin development for an evacuable small-sized direct Joule heating melter designed by PA Mayak. *Radioactive Waste,* 2025, no. 2 (31), pp. 45—59. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-2-45-59. (In Russian).