

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ОБЛАСТИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Наурызбаев Р.Ж., Сысалетин А.В., Вурим А.Д., Бакланова Ю.Ю.,
Ермаков В.А., Исламов Р.С., Бакланов В.В.
(Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан)

Введение

Создание информационно-аналитических систем (ИАС), предназначенных для оптимизации процесса анализа результатов экспериментов в области ядерной энергетики является одним из важных и актуальных направлений развития современных научно-технических инструментов. Экспериментальное изучение тяжелых аварий ядерных реакторов играет ключевую роль в обеспечении безопасности ядерной энергетики, улучшении технологий и управлении рисками. Эти исследования имеют большое значение из-за потенциально катастрофических последствий, которые могут вызвать аварии реакторов для окружающей среды, здоровья людей и социально-экономических систем. Исследования тяжелых аварий ядерных реакторов проводятся во многих научных центрах в различных странах, включая Россию, Францию, Германию, Венгрию и др.

На экспериментальных стендах «АНГАРА», «EAGLE», «ВЧГ-135» [1, 2] эксплуатируемых в Национальном ядерном центре Республики Казахстан (далее – НЯЦ РК) в сотрудничестве с японскими научными организациями и компаниями (JAEA, Toshiba Corp., Marubeni US Ltd., NUPEC, JAPC и др.) проводились исследования тяжелых аварий, направленные на обоснование концепций и технических решений, которые могут послужить основой для разработки принципов действия и конструктивного исполнения перспективных систем пассивной безопасности для реакторных установок различного типа.

Годы исследований проблем безопасности ядерных реакторов на стендах в НЯЦ РК привели к накоплению большого количества информации. Однако эффективное использование этой информации становится все сложнее без применения современных инструментов и методов обработки данных, которые, в частности, могут быть реализованы в виде специальных информационных баз.

С целью совершенствования процесса анализа результатов экспериментов и оптимизации принятия решений, связанных с разработкой ядерных технологий, в НЯЦ РК была разработана специализированная ИАС. Эта система интегрирует в себя передовые методы обработки и анализа экспериментальной информации. Система предоставляет возможность выполнения расчетов входных данных экспериментов и обеспечивает надежное хранение параметров каждого эксперимента, а также позволяет анализировать и сравнивать различные характеристики экспериментов и создавать отчеты с выбранными параметрами данных.

В данной статье рассмотрены основные принципы и структура ИАС, предназначенной для повышения эффективности анализа результатов экспериментов в области обоснования безопасности ядерных реакторов, приведены сведения, о задачах, которые могут быть решены инструментами ИАС, о преимуществах использования ИАС и перспективах.

1. Описание и назначение ИАС

1.1. Структура и функциональные возможности ИАС

ИАС предназначена для защищенного хранения, систематизации и обработки результатов экспериментов по моделированию процессов, происходящих в ядерных реакторах при развитии тяжелых аварий с плавлением активной зоны, выполненных на экспериментальных установках Филиала «ИАЭ РГП НЯЦ РК».

Структура ИАС ориентирована на выполнение следующих основных задач:

- полного описания экспериментальных установок и устройств;
- хранения объемных данных по зарегистрированным параметрам экспериментов, а также данных после завершения исследований;
- математической обработки результатов измерений, анализа качества результатов послеэкспериментальных исследований, сопоставления результатов экспериментов и прогнозирования параметров планируемых экспериментов [3].

Для решения указанных задач ИАС разделена на два основных раздела: «Экспериментальное моделирование» и «Анализ и Обработка». Помимо этого, существует дополнительный раздел «Экспериментальные стенды», где хранится информация о стендах.

Раздел «Экспериментальные стенды» содержит проектную документацию о основных конструктивных элементах площадок, которая остается неизменной при реализации отдельных исследовательских проектов.

Раздел «Экспериментальное моделирование» содержит информацию о проводимых экспериментах в рамках конкретных проектов.

Раздел «Анализ и Обработка» предназначен для извлечения данных из модулей «Экспериментальные стенды» и «Экспериментальное моделирование», а также для обработки данных с применением разработанных инструментов анализа, предназначенных для решения данной задачи.

1.2. Раздел «Экспериментальные стенды»

В разделе «Экспериментальные стенды» содержатся информация о стендах «АНГАРА», «EAGLE» и «ВЧГ-135». Эта информация включает в себя описание самих установок, данные об их использовании в определенный период времени, а также проектные документы, описывающие основные компоненты и системы этих установок. Информация доступна в текстовом и графическом форматах с возможностью сохранения в формате PDF. Например, в отношении стенда «АНГАРА» в разделе «Экспериментальные стенды» представлена информация о следующих установках: ЛАВА, СЛАВА и ЛАВА-Б. Они являются инструментами для изучения процессов, характерных для заключительной стадии аварии водоохлаждаемого реактора, связанной с потерей теплоносителя (авария типа LOCA). На этих установках исследуются взаимодействие расплава кориума с водой, бетоном и материалами силового корпуса реактора, в том числе, при имитации остаточного тепловыделения в расплаве. Экспериментальная установка «ВЧГ-135» позволяет моделировать процессы взаимодействия конструкционных и топливных материалов ядерных реакторов при температуре до 3000°C. Помимо этого, на стенде «ВЧГ-135» возможно получение кориума различного состава для последующего изучения его физико-химических и механических свойств, а также получение данных о температурных характеристиках его фазовых переходов [4]. Эти исследования проводятся на малогабаритных образцах в поддержку крупномасштабных экспериментов, которые осуществляются на стенде «АНГАРА».

1.3. Раздел «Экспериментальное моделирование»

Раздел «Экспериментальное моделирование» содержит информацию по экспериментальным исследованиям, выполняемым в рамках каждого отдельно взятого проекта.

Описание каждого проекта включает в себя базовую информацию о целях и задачах исследований, организационно-методическую документацию (текст контракта, техническое задание, программы и методики испытаний и т.д.), а также систему с полным описанием результатов отдельной серии экспериментов. Описание каждого эксперимента содержит, как правило, но не ограничивается этим, следующую информацию:

- исходные данные - техническое задание и технические требования (состав и соотношения компонентов кориума и конструкционных материалов, условия их испытания и т.д.), программа эксперимента, описание устройств, разработанных для реализации эксперимента, а также используемые средства измерения параметров и схемы их размещения в экспериментальной установке;
- массив регистрируемых параметров эксперимента, таких как температура и давление в полостях экспериментального устройства, температура, давление и расход теплоносителя на охлаждение энергонапряженных узлов установки, параметры системы электропитания электроплавильной печи;
- массив данных, полученных в результате послеэкспериментальных исследований, в том числе информацию о распределении расплава в экспериментальном устройстве [5], о структуре, гранулометрическом и элементно-фазовом составе, теплофизических свойствах топливных и конструкционных материалов, подвергшихся высокотемпературному взаимодействию расплава.

1.4. Раздел «Анализ и Обработка»

Раздел «Анализ и Обработка» позволяет извлекать данные из блоков «Экспериментальные стенды» и «Экспериментальное моделирование» и обрабатывать их с использованием встроенных инструментов анализа. Одной из основных наиболее важных задач, на решение которой ориентированы функциональные инструменты раздела «Анализ и Обработка», является выбор и обоснование диаграмм разогрева кориума в экспериментах по моделированию процессов взаимодействия расплава активной зоны с конструкционными материалами ядерного реактора. При выборе режимов нагрева кориума наибольшую трудность представляет решение задачи для первого эксперимента в их серии в связи с отсутствием предыдущего опыта. В последующих экспериментах серии, ИАС позволяет выполнить обоснованный выбор диаграммы работы электроплавильной установки на основе опыта выполнения предыдущих экспериментов.

В процессе анализа результатов материаловедческих исследований ИАС обеспечивает возможность извлечения файлов в формате JPEG, PDF и их визуальное сравнение в двух и более окнах программы.

При различных видах комплексного анализа требуется формирование таблиц, в том числе при выполнении элементного и фазового анализа, построении матриц серии экспериментов и экспериментов проекта, анализе различных составов шихты, газа и т.д., что обеспечивается доступом к данным как отдельных экспериментов, так и их совокупности с возможностью выбора соответствующих параметров.

Для получения информации по одному эксперименту или для сравнения результатов нескольких экспериментов в одном документе используется функция «Протокол», которая обеспечивает возможность формирования выводных форм

по данным экспериментов, содержащихся в ИАС в виде графиков, фото, таблиц данных и прочей информации.

2. Программное решение

2.1. Выбор инструментальных средств разработки

Программная реализация ИАС основывается на следующих принципах [6]:

- пользовательский интерфейс должен быть чрезвычайно легким в использовании и интуитивно понятным;
- повышение эффективности работы пользователя за счет простоты выполнения операций;
- автоматизированный анализ данных;
- уменьшение общего числа пользовательских ошибок.

В качестве разработки ИАС выбран язык программирования C#, Microsoft Visual Studio в качестве среды программирования и тип проекта ASP.NET Core Blazor (рис. 1). Для хранения и управления реляционными базами данных выбрана система SQL Server. Для работы с базами данных используется решение Entity Framework, применяемое в программировании на языках семейства .NET.

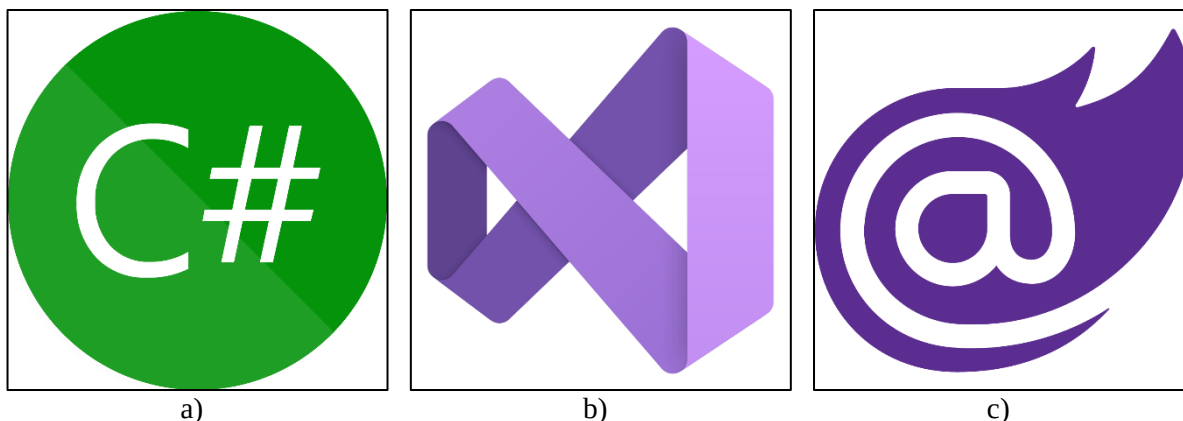


Рис. 1. а – язык программирования C#, b – среда программирования Visual Studio, c – ASP.NET Core Blazor

Разработка ИАС на языке программирования C# с использованием ASP.NET Core Blazor предоставляет следующие значимые преимущества и возможности [7]:

- *интерактивный пользовательский интерфейс*. Blazor позволяет создавать интерактивные веб-приложения с богатым пользовательским интерфейсом, что обеспечивает более удобное и эффективное взаимодействие пользователя с системой;
- *реактивное программирование*. Blazor основан на концепции реактивного программирования, что позволяет создавать быстрые и отзывчивые приложения, что критически важно для обработки данных в режиме реального времени;
- *многоплатформенность*. Приложение, разработанное на ASP.NET Core Blazor, может быть запущено как на сервере, так и на клиенте (с использованием WebAssembly). Это обеспечивает гибкость в выборе платформы для развертывания;
- *удобство разработки*. ASP.NET Core Blazor предлагает удобные инструменты и библиотеки для разработки веб-приложений, что способствует ускорению процесса создания функциональности и уменьшению времени разработки;
- *интеграция с .NET Core*. Использование C# и интеграция с .NET Core обеспечивает широкие возможности для работы с данными, асинхронного программирования и других функциональных аспектов разработки;

- *масштабируемость*. Благодаря возможности масштабирования Blazor-приложений, система может легко адаптироваться к увеличивающемуся объему данных и повышенному числу пользователей;
- *безопасность*. ASP.NET Core обеспечивает высокий уровень безопасности, что особенно важно в области ядерной энергетики, где обработка и хранение данных требует строгих мер безопасности;
- *интеграция с аналитическими и статистическими инструментами*. Система может интегрирована с различными аналитическими инструментами и библиотеками для эффективного анализа результатов экспериментов.

Разработка системы на ASP.NET Core Blazor с использованием C# значительно расширяет возможности анализа результатов экспериментов, обеспечивая быстрый доступ, эффективную обработку данных и удобный интерфейс для исследователей и специалистов данной области.

Использование SQL Server (рис. 2) в ИАС позволяет достичь нескольких ключевых целей для обеспечения эффективного функционирования системы [8, 9]:

- *Хранение и управление данными*. Позволяет надежно и эффективно хранить большие объемы данных, необходимых для функционирования ИАС. Это включает в себя информацию об экспериментальных исследованиях, характеристики установок, результаты анализов и другие данные, которые могут быть организованы в базу данных;
- *Обработка данных и анализ*. Предоставляет мощные инструменты для обработки данных в базе данных. Это может включать запросы, хранимые процедуры, триггеры и другие методы обработки и анализа данных для получения нужной информации из базы данных;
- *Обеспечение целостности и безопасности данных*. Предлагает механизмы для обеспечения целостности данных, контроля доступа и безопасности информации. Это важно для ИАС, где защита данных и контроль доступа к ним играют ключевую роль;
- *Масштабирование и производительность*. Обеспечивает возможность масштабирования системы в зависимости от растущих потребностей ИАС, а также оптимизацию производительности запросов для быстрого доступа к данным;
- *Резервное копирование и восстановление данных*. Предоставляет средства для создания резервных копий данных и восстановления системы в случае необходимости, что является важным аспектом обеспечения надежности ИАС.

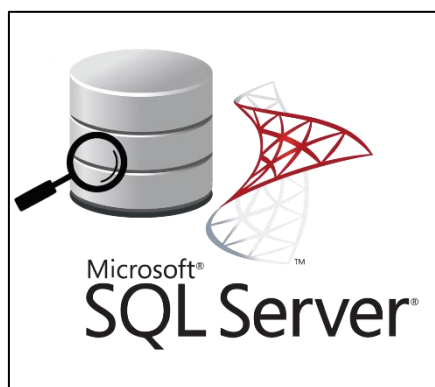


Рис. 2. Система управления реляционными базами данных SQL Server

Entity Framework (рис. 3) является объектно-реляционной отображаемой библиотекой в .NET, разработанной Microsoft и позволяющей работать с данными, используя объектно-ориентированный подход [10]. Она упрощает взаимодействие с базой данных SQL Server путем представления данных в виде объектов и позволяет работать с ними на уровне кода, избегая прямых SQL-запросов в большинстве случаев.

Entity Framework автоматически генерирует SQL-запросы на основе объектной модели данных (представленной в виде классов в C#) и преобразует результаты запросов в объекты, которые используются в коде приложения. Это упрощает и ускоряет разработку, так как не нужно вручную формировать большинство SQL-запросов и преобразовывать данные в объекты.

Основными преимуществами использования Entity Framework являются:

- ускорение процесса разработки благодаря автоматической генерации SQL-запросов и объектов данных;
- сокрытие деталей работы с базой данных, что упрощает сопровождение и улучшает архитектуру приложения;
- обеспечение согласованности данных между приложением и базой данных;
- уменьшение вероятности ошибок при работе с данными и запросами.

Entity Framework поддерживает различные провайдеры баз данных, включая SQL Server, PostgreSQL, MySQL, Oracle и др., что делает его универсальным инструментом для работы с различными системами управления базами данных.



Рис. 3. Entity Framework

2.2. Программная архитектура

Эффективная программная архитектура должна учитывать специфические потребности и требования, предъявляемые к результатам экспериментов, обеспечивая точность, надежность и безопасность их анализа.

Программная архитектура ИАС для анализа результатов экспериментов должна быть специализированной и эффективной для обработки больших объемов данных.

Архитектура ИАС, включающая веб-интерфейс, серверы приложений и базу данных, основана на модели клиент-сервер [11]. В данной архитектуре веб-интерфейс взаимодействует с серверами приложений, а серверы приложений обращаются к базе данных для получения и обработки данных (рис. 4).

Связь состоит из трех слоев:

1. *Клиентский слой (веб-интерфейс)*. Пользователь взаимодействует с веб-интерфейсом через браузер, где отображается интерфейс системы. HTML, CSS, JavaScript используются для создания пользовательского интерфейса и обеспечения взаимодействия с пользователем.
2. *Серверный слой (серверы приложений)*. Здесь работает серверное программное обеспечение, которое обрабатывает запросы от клиентского слоя, взаимодействует с базой данных и формирует соответствующие ответы. А также определяет основные функции и операции, выполняемые системой.
3. *Слой данных (база данных)*. В этом слое хранятся данные системы. Серверы приложений обращаются к базе данных для получения и обновления данных.

Связь между слоями осуществляется следующим образом:

- веб-интерфейс отправляет запросы к серверам приложений посредством HTTP или HTTPS протоколов;
- серверы приложений обрабатывают запросы, взаимодействуя с базой данных для получения и обработки данных;
- база данных предоставляет серверам приложений необходимые данные для ответа на запросы.

Кроме того, для улучшения производительности и масштабируемости системы предусмотрено использовать кэширование, асинхронные запросы, пулы соединений и другие методы оптимизации взаимодействия между компонентами системы.

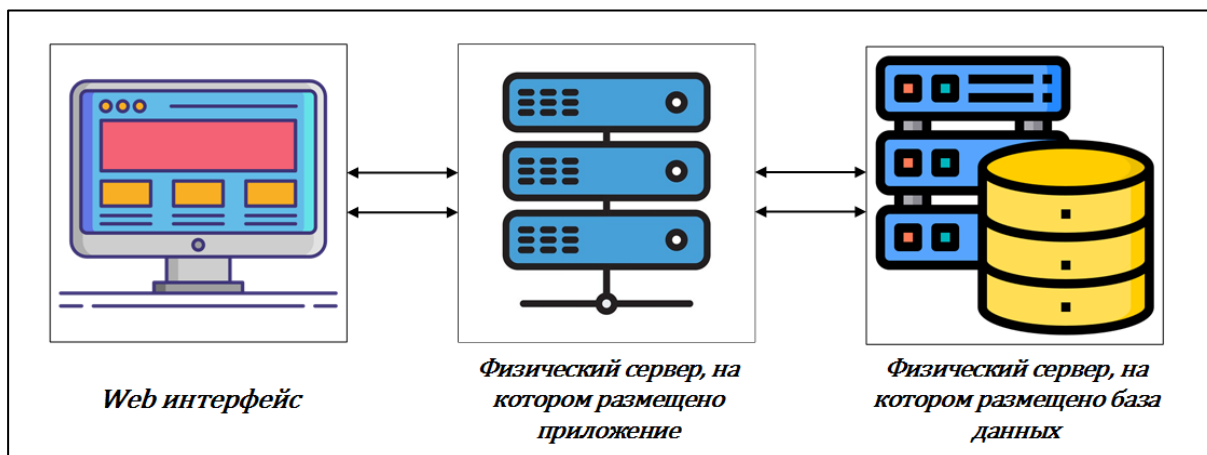


Рис. 4. Архитектура ИАС

Принцип работы ИАС, основанный на последовательности обмена информацией между компонентами, изображенными на рисунке 5, описывается следующим образом:

- *Веб интерфейс*. Пользователь взаимодействует с системой через веб-интерфейс, отправляя запросы на обработку данных и получение результатов анализа.
- *Безопасность*. Перед обработкой запросов система осуществляет проверку безопасности, чтобы гарантировать, что запросы и данные соответствуют установленным правилам безопасности и авторизации.
- *ИАС*. Система принимает запросы от веб-интерфейса, обрабатывает их и передает на следующий уровень для доступа к данным и выполнения соответствующих операций.
- Entity Framework обеспечивает доступ к данным и представляет данные из базы данных в виде объектов, упрощая работу с ними на уровне приложения.
- SQL Server является реляционной базой данных, где хранятся данные, необходимые для функционирования ИАС.
- База данных, управляемая SQL Server, представляет собой хранилище данных, используемых ИАС для анализа, обработки и предоставления результатов пользователю.

Процесс работы включает в себя передачу запросов от пользователя через веб-интерфейс, проверку безопасности, обработку запросов в ИАС, доступ к данным через Entity Framework и SQL Server, а также хранение данных в базе данных. Эта последовательность компонентов обеспечивает функциональность, безопасность и эффективность работы ИАС.

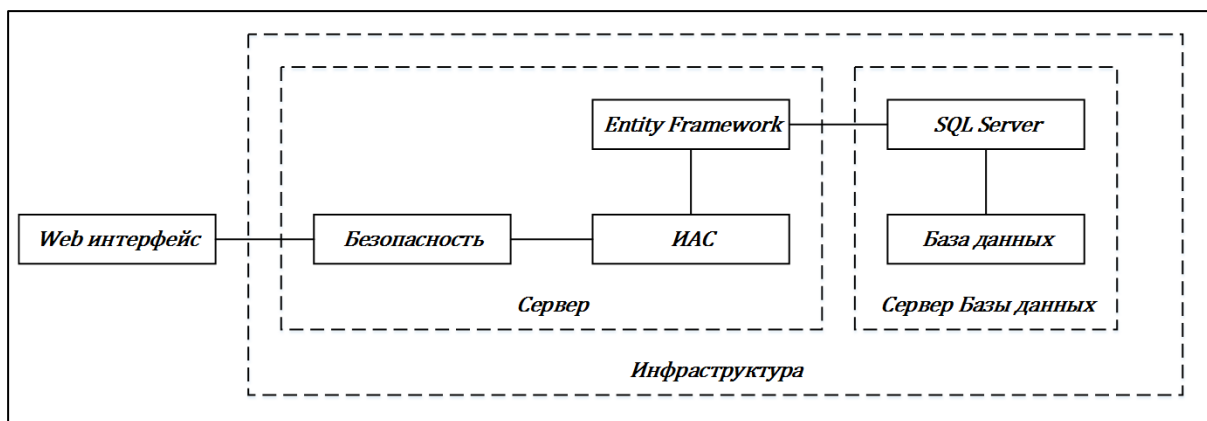


Рис. 5. Принцип работы ИАС

Основными модулями ИАС являются (рис. 6):

- Модуль «Экспериментальные стенды». Предназначен для обработки информации о стендах.
- Модуль «Экспериментальное моделирование». Предназначен для обработки информации по экспериментальным исследованиям, проводимым в рамках конкретного проекта.
- Модуль «Анализ и обработка». Предназначен для анализа и обработки данных с использованием алгоритмов машинного обучения и аналитических методов, полученных в результате экспериментов и моделирования. Также он осуществляет генерацию отчетов и визуализацию результатов анализа.
- Модуль «Регистрация и архивация данных». Отвечает за регистрацию, обеспечивает целостность и безопасность хранения данных для последующего доступа и анализа, собранных в процессе экспериментов и моделирования.
- Модуль «Поиск и сравнение экспериментов». Позволяет искать экспериментальные данные по заданным критериям и сравнивать результаты различных экспериментов для анализа изменений и сходств.
- Модуль «Модуль безопасности». Ответственен за обеспечение безопасности ИАС и ее данных. Управляет доступом пользователей к системе и ее функциональным частям. Осуществляет мониторинг безопасности системы и выявляет потенциальные угрозы.

На этапе проектирования ИАС для оптимизации анализа результатов экспериментов была определена структура и архитектура алгоритма работы модуля. Задачи каждого модуля были распределены и организованы таким образом, чтобы они взаимосвязано функционировали для единой работы с компонентами ИАС.

Разделение задач по модулям является критически важным аспектом, обеспечивающим корректную работу программы [12]. Поскольку область ядерной энергетики требует высокой надежности и точности соответствующих знаний, возникновение неполадок или ошибок может иметь серьезные последствия. Поэтому каждый модуль разрабатывается с учетом возможных сбоев и обеспечивает их обнаружение и устранение.

В этой связи, ИАС способна функционировать бесперебойно, обеспечивая эффективную обработку, анализ, поиск и отображение всей необходимой информации на экране. Это позволяет исследователям и специалистам иметь быстрый и надежный доступ к данным, необходимым для принятия важных решений.

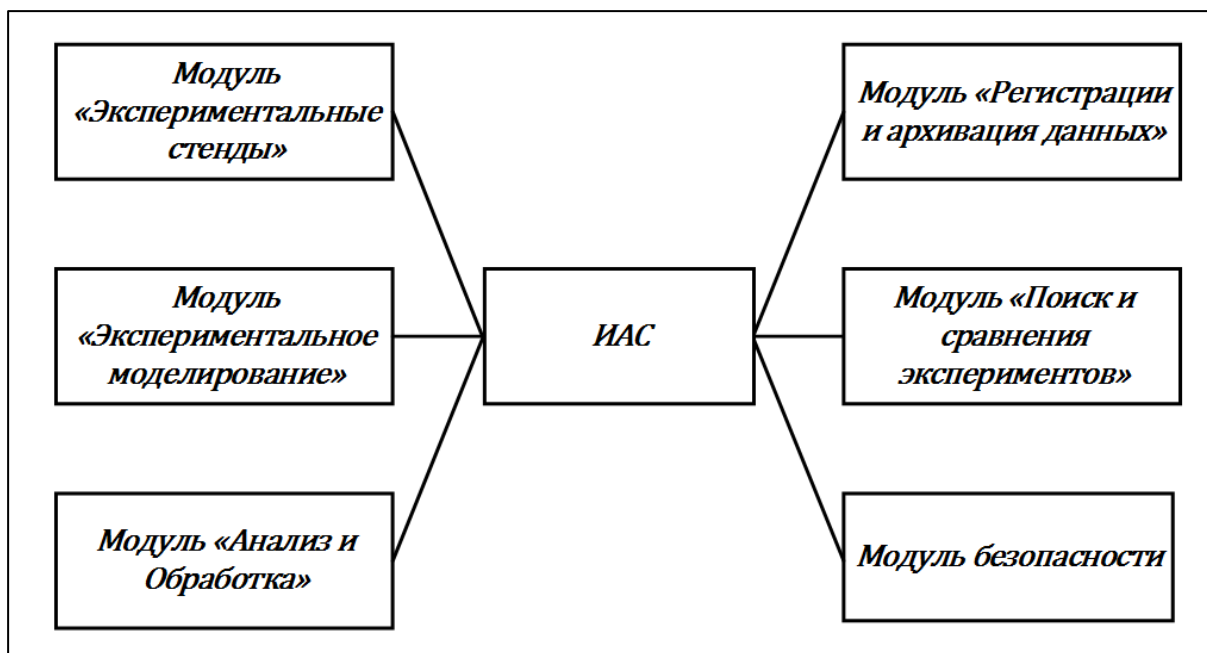


Рис. 6. Основные модули ИАС

3. Информационно-аналитическая система

Внешний вид веб-интерфейса ИАС для оптимизации анализа результатов экспериментов должен быть интуитивно понятным, функциональным и эстетичным, удовлетворяя потребности пользователей. При проектировании внешнего вида веб-интерфейса учитывались следующие аспекты:

- *интуитивная навигация.* Меню и элементы управления являются легко доступными и понятными. Интерфейс предоставляет понятные пути для навигации по системе;
- *консистентность дизайна.* Внешний вид имеет единообразный на всех страницах системы, создавая чувство целостности;
- *цветовая палитра и шрифты.* Используются цвета, соответствующие тематике ядерной энергетики, и шрифты, обеспечивающие хорошую читаемость;
- *использование мультимедиа.* Интегрированы графики, диаграммы, изображений и другие мультимедийные элементы для наглядного представления данных;
- *адаптивный дизайн.* Гибкость интерфейса для корректного отображения на различных устройствах (компьютеры, планшеты, смартфоны) с разными разрешениями экранов;
- *формы и элементы ввода.* Ясное оформление форм, кнопок, чек-боксов и других элементов для удобного взаимодействия с системой;
- *легкость использования.* Простота в использовании, минимализм и удобство для обеспечения эффективного взаимодействия пользователя с системой;
- *отображение данных.* Эффективное отображение результатов анализа и данных, включая графику, таблицы и графики для облегчения понимания информации;
- *интерактивность.* Используются интерактивные элементы, позволяющие пользователям взаимодействовать с данными и анализировать их;
- *безопасность.* Имеет значение обеспечение безопасности веб-интерфейса, включая защиту данных и доступа к функционалу системы.

Общий дизайн веб-интерфейса обеспечивает удобство пользователям, помогая им в эффективном анализе результатов экспериментов и принятии обоснованных решений.

Страница авторизации (рис. 7) в ИАС является ключевым элементом для обеспечения безопасности и контроля доступа пользователей к системе. Она предоставляет возможность пользователям войти в систему, предоставив свои учетные данные. Страница авторизации является первым шагом в доступе к системе, поэтому ее дизайн и функциональность является максимально интуитивно понятным и удобным для пользователей.

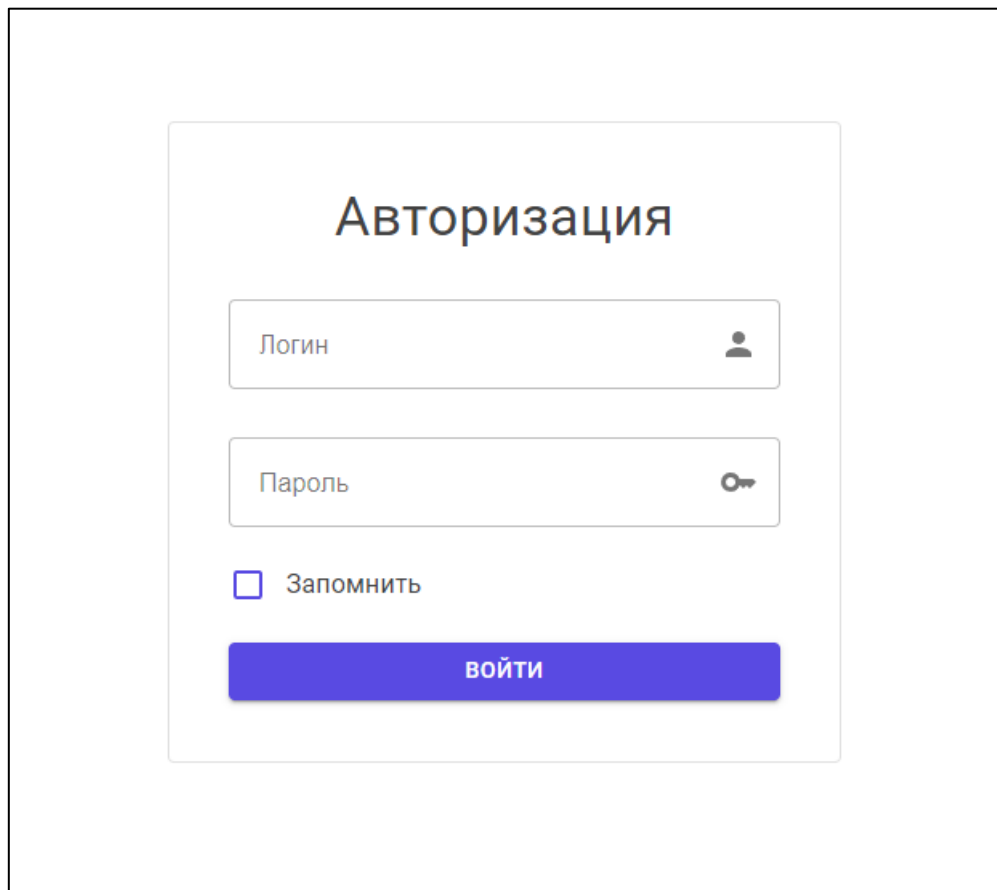


Рис. 7. Страница авторизации

Главная страница (рис. 8) в ИАС является центральной точкой входа и основным интерфейсом, предоставляющим пользователю обзор и доступ ко всем основным функциям системы.

На верхней части страницы расположены заголовок, который отражает название ИАС, и логотип, идентифицирующий систему. Также присутствует верхнее меню, содержащее ссылки на основные разделы и функции системы. На странице имеется ссылка на раздел, предоставляющий краткое описание ключевых возможностей ИАС. Это позволяет пользователям понять, какие операции они могут выполнять в системе.

Дополнительно на странице размещены ссылки на разделы «Экспериментальные стенды», «Экспериментальное моделирование» и «Анализ и Обработка», в результате чего обеспечивается быстрый доступ к наиболее важным функциям системы. Дизайн страницы является современным и привлекательным, гармоничная цветовая палитра соответствует общему стилю ИАС. Адаптивный дизайн гарантирует корректное отображение страницы на различных устройствах, таких как компьютеры, планшеты и смартфоны. Это обеспечивает удобство использования системы в любых условиях и на различных устройствах.



Рис. 8. Главная страница

В качестве примера на рисунке 9 продемонстрирована одна из существующих страниц, которая представляет собой инструмент сравнения результатов двух экспериментов в ИАС. Она предназначена для подробного сравнительного анализа данных, полученных в ходе двух различных экспериментов. Пользователям предоставляется возможность выбора и загрузки данных по двум экспериментам для последующего сравнения. Визуализация результатов представлена в различных видах графиков, диаграмм и таблиц, отражающих результаты каждого эксперимента. Например, графиков изменений температуры, давления, энергетических спектров и другие, в зависимости от специфики экспериментов. Блок инструментов для сравнения результатов позволяет пользователям управлять параметрами сравнения и переключаться между различными видами данных. Таким образом, страница сравнения результатов экспериментов предоставляет пользователям все необходимые инструменты для анализа и сопоставления данных разных экспериментов, помогая принимать обоснованные решения и делать выводы.

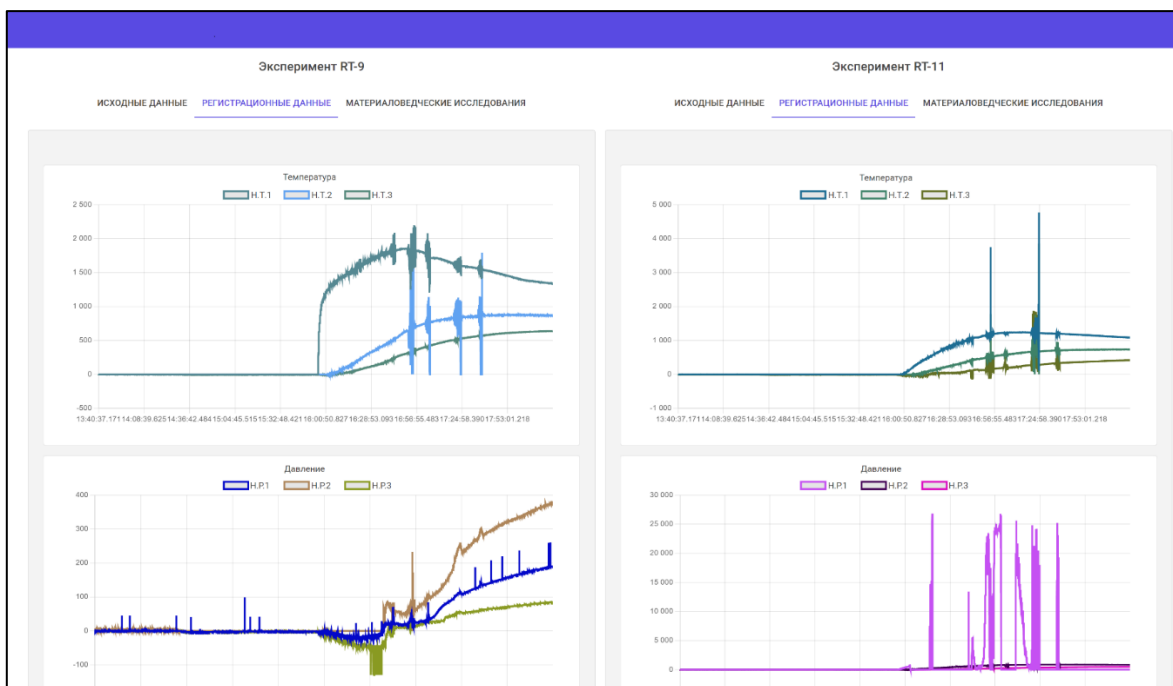


Рис. 9. Сравнения результатов экспериментов

Закключение

Моделирование развития тяжелой аварии представляет собой сложную задачу, включающую анализ нестационарного тепломассообмена и химических реакций в системе с тремя агрегатными состояниями вещества и изменяющейся топологией. Результаты исследований взаимодействия кориума с конструкционными материалами имеют большое значение для специалистов и организаций в данной области.

ИАС, разработанная в Национальном ядерном центре Республики Казахстан, способствует более широкому доступу к результатам этих исследований, повышая уровень подготовки и проведения экспериментов.

Интеграция инструментов структурирования результатов исследований по кластерам и анализа в рамках ИАС ускоряет обработку данных и позволяет анализировать ранее неструктурированные данные различных экспериментов. Это, в свою очередь, способствует повышению достоверности результатов при сравнении параметров и уменьшению ошибок в планировании экспериментов.

Настоящая работа выполняется в рамках грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан (ИРН AP09260704 «Информационно-аналитическая система данных, полученных при экспериментальном моделировании процессов тяжелой аварии на ядерном реакторе», 2021–2023 гг.

Список литературы

1. Бакланов, В.В. Взаимодействие кориума с корпусом водо-водяного энергетического реактора при тяжелой аварии: дис. канд. тех. наук: 01.04.07 / Бакланов Виктор Владимирович. – Томск, 2017. – 154 с.
2. Гречаник, А.Д. Металлографическое исследование кориума, полученного при моделировании тяжелых аварий на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. /Гречаник А.Д., Кукушкин И.М., Бакланов В.В.// Доклады семинара «Ядерный потенциал Казахстана», Алматы, Ассоциация ЯОК, 2014. – С. 73–83.

3. Biswal, B. ADA: Advanced data analytics methods for abnormal frequent episodes in the baseline data of ISD / B. Biswal, A. Duncan, Z. Sun // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – V.54. – P.3996-4004.
4. Барбатенков Р.К., Бакланов В.В., Кукушкин И.М., Бакланова Ю.Ю. Реализация метода высокотемпературного термического анализа на стенде ВЧГ-135 для определения температур плавления и затвердевания кориума. Вестник НЯЦ РК, Курчатов, Вып. 1(69) 2017, с. 75–84.
5. Асмолов, В.Г. Поведение бассейна расплава активной зоны в днище корпуса реактора (проект РАСПЛАВ) / В.Г. Асмолов, С.С. Абалин., Ю.Г. Дегальцев., О.Я. Шах., Е.К. Дьяков, В.Ф. Стрижов // Атомная энергия. – 1998. – Т. – 84. – № 4. С. 303–318.
6. Вигерс Карл, Битти Джой. Разработка требований к программному обеспечению. 3-е изд., дополненное / Пер. с англ. — М.: Издательство «Русская редакция»; СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 736 стр.: ил.
7. Himschoot P. Blazor Revealed: Building Web Applications in .NET / P. Himschoot, J. Michael Hare, K Griffin // Apress; 1st ed. edition. 2019. – 247 p.
8. Документация по Microsoft SQL, <https://docs.microsoft.com/ru-ru/sql/>.
9. Агальцов, В.П. Базы данных. В 2-х т.Т. 1. Локальные базы данных: Учебник / В.П. Агальцов. - М.: ИД ФОРУМ, НИЦ ИНФРА-М, 2013. – 352
10. Центр документации Entity Framework, <https://learn.microsoft.com/en-us/ef/>.
11. Ипатова, Э. Р. Методологии и технологии системного проектирования информационных систем / Э.Р. Ипатова, Ю.В. Ипатов. – М.: Флинта, 2016.– 256 с.
12. Алдохина О.И., Басалаева О.Г. Информационно-аналитические системы и сети. Часть 1. Информационно-аналитические системы. – Кемерово: КемГУКИ, 2010. – 148 с.