

УДК 533.9, 004.42

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ ПО УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ

*А.С. Вишня<sup>1</sup>, А.В. Лебедев<sup>1</sup>, О.И. Семенов<sup>2</sup>, Е.Ю. Миронова<sup>2</sup>, Л.Ю. Калина<sup>1</sup>,  
Д.М. Гусев<sup>1</sup>, З.В. Ежова<sup>2</sup>, С.С. Портоне<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ООО «АйТинерис», Калининград, Россия

<sup>2</sup>Частное учреждение «Проектный Центр ИТЭР», Москва, Россия

В работе рассмотрена задача создания программного комплекса совместной работы с экспериментальными данными термоядерных исследований, в частности, программного обеспечения информационного взаимодействия, анализа и отображения экспериментальных данных. Определены архитектура, функциональные возможности, принципы построения графического пользовательского интерфейса, обоснован технологический подход к их реализации, выбраны и апробированы технологические решения. Рассмотренные решения обеспечивают возможность дистанционного участия в научных экспериментах и работы с их результатами. Сформулированы выводы по результатам проведённой работы, представлены планы по дальнейшему развитию программного комплекса.

**Ключевые слова:** дистанционные эксперименты, технологии удалённого участия, программный комплекс, термоядерный синтез, цифровизация.

## DEVELOPMENT OF A COMPLEX SOFTWARE FOR COLLABORATIVE WORK WITH EXPERIMENTAL FUSION DATA

*A.S. Vishnya<sup>1</sup>, A.V. Lebedev<sup>1</sup>, O.I. Semenov<sup>2</sup>, E.Yu. Mironova<sup>2</sup>, L.Yu. Kalina<sup>1</sup>,  
D.M. Gusev<sup>1</sup>, Z.V. Ezhova<sup>2</sup>, S.S. Portone<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>LCC «ITneris», Kaliningrad, Russia

<sup>2</sup>Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

The paper examines the problem of creating a complex software for collaborative work with experimental fusion data, in particular, software for information interaction, software for analysis and display of experimental data. The architecture, functionality and principles of constructing a graphical user interface were determined, the technological approach to their implementation was justified, and technological solutions were selected and tested. The considered solutions provide the opportunity to remotely participate in scientific experiments and work with their results. Conclusions are formulated based on the results of the work carried out, and plans for the further development of the software complex are given.

**Key words:** remote experiments, remote participation technologies, complex software, thermonuclear fusion, digitalization.

DOI: 10.21517/0202-3822-2023-46-4-16-24

### ВВЕДЕНИЕ

Современная жизнь предполагает высокий уровень цифровизации. Вопрос цифровизации особенно актуален для научно-исследовательской деятельности, требующей ввиду сложности задач объединения уникальных компетенций и наличия специализированного высокопроизводительного оборудования и программного обеспечения для получения, хранения, обработки и анализа экспериментальных данных (ЭД). Показательным примером является область исследований управляемого термоядерного синтеза (УТС).

Предполагается, что промышленное применение УТС способно в долгосрочной перспективе решить энергетическую проблему и на основе процесса синтеза ядер станет возможным создание чистого, безопасного источника энергии — термоядерного реактора. Чтобы проверить эту гипотезу, а также сделать шаг к решению физических и технологических проблем, связанных с созданием термоядерного реактора, в настоящее время во Франции строится самая крупная в мире УТС-установка Международный экспериментальный термоядерный реактор (International Thermonuclear Experimental Reactor — ITER, ИТЭР). В этом проекте класса MegaScience участвуют 35 стран, включая Российскую Федерацию. Для того чтобы обеспечить научное взаимодействие с национальными домашними агентствами стран, участвующих в проекте, Международная организация (МО) ИТЭР совместно с учёными российского национального агентства ИТЭР («Проектный Центр ИТЭР») исследует и успешно реализует комплекс техно-

логий, благодаря которым учёные имеют возможность принимать дистанционное участие в работах на ИТЭР, а также удалённо работать с полученными данными [1]. Совместные успехи позволяют применять накопленный опыт в других проектах по исследованию УТС в Российской Федерации и за рубежом [2].

Для реализации в Российской Федерации совместных научных программ с участием организаций Госкорпорации «Росатом», институтов Российской академии наук, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается платформа совместной работы с экспериментальными и проектными данными УТС-исследований с учётом лучших международных практик: аппаратно-инфраструктурная платформа (АИП) информационно-коммуникационного пространства (ИКП) в области управляемого термоядерного синтеза в Российской Федерации (АИП ИКП или FusionSpace) [3, 4]. Эта задача особенно актуальна в силу уникальности форматов данных, генерируемых системами отечественных УТС-установок, отсутствием единого подхода к хранению и обработке данных, и, как следствие, сложностей, связанных с совместной работой с полученными результатами.

В настоящее время развёрнута аппаратная инфраструктура платформы FusionSpace, представляющая собой совокупность узлов трёх основных типов: центральный узел, совместные лаборатории и центры дистанционного участия. К основным функциям центрального узла — «ядра» системы относятся обеспечение хранения и обработки данных, обеспечение работоспособности сервисов АИП ИКП и обеспечение информационной безопасности платформы. Через центры дистанционного участия и совместные лаборатории реализован доступ к сервисам платформы и открытой научно-технической информации, однако совместные лаборатории создаются вокруг источника данных — научной установки или стенда, и их главной задачей является обеспечение передачи научных данных от источника для последующей обработки и анализа в АИП ИКП, а центры дистанционного участия предназначены преимущественно для участия в дистанционном эксперименте и последующей работы с полученными данными.

Для автоматизации этапов получения и адаптации данных от источника для дальнейшей совместной работы с «готовыми» к анализу и отображению данными требовалось разработать программный комплекс, включающий программное обеспечение для информационного взаимодействия между узлами платформы и программное обеспечение анализа и отображения результатов экспериментов.

## ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На отечественных УТС-установках в настоящее время не выработано единого подхода к хранению, обработке и отображению данных. Таким образом, каждая установка является уникальной с точки зрения информационной инфраструктуры. Для определения требований к разработке программного комплекса работы с экспериментальными данными термоядерных исследований был проведён научно-технический анализ типов и форматов данных, генерируемых установками Глобус-М2, Туман-3М, Т-11М, ГДЛ, ГОЛ-НВ, СМОЛА, а также существующего программного обеспечения анализа и обработки данных.

В результате проведённого анализа определены форматы данных систем российских УТС-установок: специфичные установки (DAT, JSON, IND, 000, FITS и пр.), относящиеся к банкам данных RMN (включая GR2R/GR2F, GVT, VOLT и другие), технические данные оборудования National Instruments TDMS [5], файлы данных систем установок, например, ROOT [6, 7].

Объём данных, генерируемых за импульс одной установкой, может достигать в зависимости от типа данных и установки нескольких Гб в день. Общий объём архива одной установки может достигать нескольких Тб. Для анализа и обработки данных используются специализированные программные обеспечения, например, Combiscope, Look4, Graph, IRBIS View, ROOT или пользовательские программы, написанные на языках программирования Java, Python, C++, в LabView и пр. Для формирования требований к разработке программного комплекса был проведён анализ используемых программных средств и сформированы пользовательские требования.

Так как Российская Федерация является полноправным участником проекта ИТЭР, целесообразно рассматривать ИТЭР как установку, которая может быть подключена к АИП ИКП. В силу этого необходимо учитывать подходы и практики проекта ИТЭР для обеспечения возможности работы российских учёных с ними через АИП ИКП. В частности, необходимо учитывать формат данных HDF5 и IMAS.

В результате были определены функциональные и нефункциональные требования к программному обеспечению информационного взаимодействия между узлами платформы FusionSpace, анализа и отобра-

ражения ЭД. Основными задачами программного обеспечения взаимодействия между узлами платформы FusionSpace являются:

- извлечение данных из источников данных (установок/стендов УТС-исследований);
- идентификация и типизация (каталогизация) полученных данных;
- обеспечение качества данных с точки зрения их целостности, полноты и непротиворечивости;
- структурированное и файловое хранение данных;
- оркестрация, журнализация и мониторинг технологических процессов работы с данными на их пути от источников до хранилища.

Основными задачами программного обеспечения анализа и отображения являются:

- обеспечение авторизованного доступа к данным, пригодным для анализа и отображения;
- навигация по хранилищу данных;
- проектирование панелей визуализации с двумерным и трёхмерным представлением данных, пользовательский обмен и их просмотр;
- конфигурация и выполнение вычислительных (расчётных) сценариев;
- экспорт и обеспечение доступа к данным средствами математической обработки.

### **АРХИТЕКТУРНЫЙ КОНТЕКСТ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА**

Для реализации автоматизированной информационной поддержки перечисленных задач каждого из программных обеспечений в составе программного комплекса с архитектурной точки зрения выделены следующие составные элементы (модули/подсистемы/компоненты):

- программное обеспечение взаимодействия между узлами АИП ИКП включает в себя:
  - экстракторы данных из источников;
  - временные хранилища данных в исходном виде;
  - хранилище журналов работы экстракторов данных;
  - оркестратор заданий Extract, Transform, Load (ETL), реализующий прикладной интерфейс взаимодействия REpresentational State Transfer Application Programming Interface (REST API) для экстракторов;
  - набор ETL-заданий;
  - структурированное хранилище данных;
  - файловое хранилище данных;
  - прикладные интерфейсы выгрузки данных с использованием подготовленных фрагментов кода (сниппетов) для средств математической обработки;
- программное обеспечение анализа и отображения включает в себя:
  - модуль авторизации и аутентификации;
  - модуль управления полномочиями;
  - модуль пользовательской персонализации;
  - модуль навигации по каталогам данных;
  - модуль проектирования панелей визуализации с двумерным и трёхмерным представлением ЭД;
  - модуль проектирования вычислительных сценариев;
  - модуль журнализации пользовательских действий;
  - модуль экспорта данных;
  - хранилище конфигурационных данных.

Таким образом, архитектурно в рамках проектирования программного комплекса выделены следующие уровни: уровень источников данных (УТС-установок), уровень сбора, обработки и хранения экспериментальных данных (программное обеспечение взаимодействия между узлами платформы FusionSpace), уровень анализа и отображения ЭД (программное обеспечение анализа и отображения данных), а также пользовательский уровень.

### **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОНТЕКСТ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА**

На основе архитектурного решения программного комплекса реализуется сценарий сбора, обработки, загрузки, хранения, анализа и отображения ЭД.

Так, по результатам выполнения эксперимента на заданной УТС-установке экстракторами в составе программного обеспечения информационного взаимодействия между узлами АИП ИКП осуществляется извлечение данных из источника. Каждый из идентифицированных массивов данных преобразуется в канонический формат JavaScript Object Notation (JSON) для нужд их каталогизации в соответствующем временном хранилище совместной лаборатории. На этом шаге также выполняется фиксирование первоначальной контрольной (хэш) суммы с применением 128-битного алгоритма хеширования Message Digest 5 Sum (MD5). При этом размещение каталогизированных исходных данных в формате JSON во временном хранилище совместной лаборатории является условием к их перемещению в файловое хранилище центрального узла, запуску экстрактором данных работы ETL-заданий на уровне оркестратора центрального узла посредством вызова его прикладного интерфейса взаимодействия REST API.

ETL-задания, инициированные экстрактором, получают на вход сведения о массивах данных, подлежащих обработке, а затем выполняют их обработку с фиксированием контрольной (хэш) суммы по факту перемещения данных (из совместной лаборатории в центральный узел) и соответствующим сравнением первоначальной и итоговой контрольной (хэш) сумм. При этом обработке и размещению в структурированном хранилище подлежат только те данные, контрольные (хэш) суммы которых эквивалентны. По результатам обработки (преобразования данных) осуществляется наполнение как структурированного, так и файлового хранилищ данных, а весь оркестрируемый процесс работы с данными журналируется и доступен в рамках средств мониторинга на уровне оркестратора.

Отдельным набором ETL-заданий наполненные структурированные и файловые хранилища по запросу пользователя преобразуются в файлы самоописания (содержащие метаданные о своём содержимом). При этом формат файлов соответствует формату, принятому в рамках платформы (HDF5 и Parquet). Итоговые файлы согласованного формата доступны пользователям, работающим с использованием отдельных средств математической обработки (Python, Matlab), в пределах установленного срока жизни ссылки на скачивание, являющейся частью подготовленных сниппетов.

Подготовленные и размещённые как в структурированном, так и в файловом хранилищах данные становятся доступными программному обеспечению анализа и отображения и его пользователям с учётом реализованной модели разграничения прав доступа к данным УТС-установок. Пользователь программного обеспечения анализа и отображения ЭД с использованием современного веб-браузера на базе Chromium по результатам успешной авторизации и аутентификации осуществляет навигацию по каталогам данных, иерархически упорядоченных настраиваемым образом, на основе базовых параметров, показанных на рис. 1.

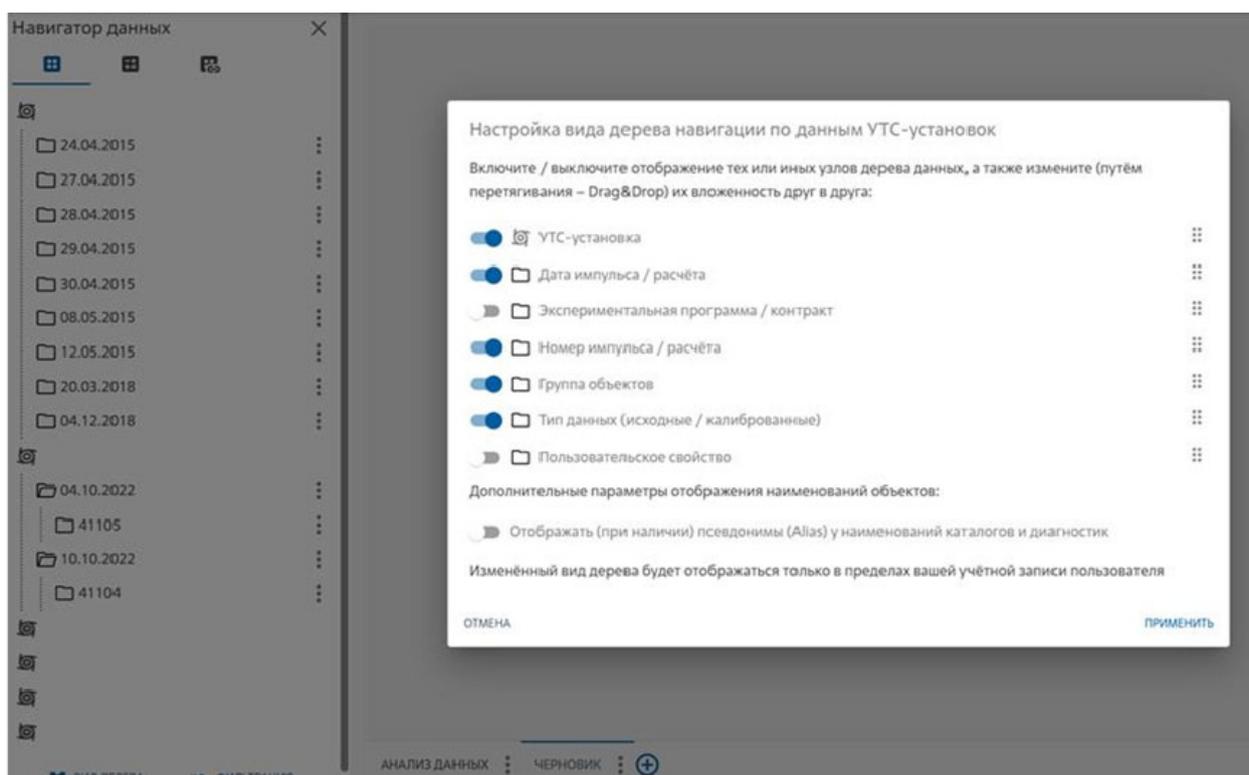


Рис. 1. Фрагмент графического пользовательского интерфейса группировки дерева ЭД УТС-установок

В рамках навигации по ЭД пользователю предоставляется возможность как ручного выбора интересующих его диагностических данных, так и фасетного поиска (поиска с использованием одновременно нескольких фильтров) по заданным условиям. Например, типичным поисковым запросом пользователя на выборку может быть: «данные диагностики X установки Y за период с 01.07.2023 по 07.07.2023, где минимальное значение меньше или равно 0,0; максимальное значение больше или равно 0,85». На рис. 2 показан фрагмент графического пользовательского интерфейса конфигурации такого поиска по ЭД УТС-установок.

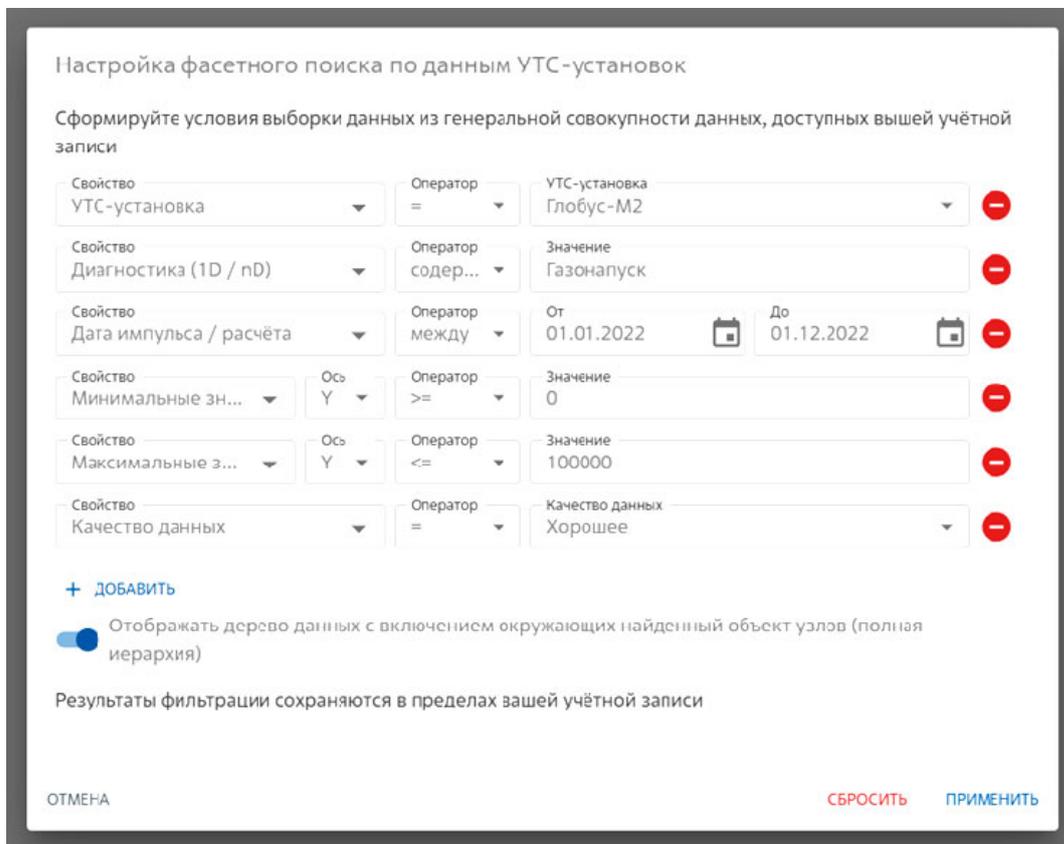


Рис. 2. Фрагмент графического пользовательского интерфейса конфигурации фасетного поиска по ЭД УТС-установок

Каждый из интересующих пользователя массивов ЭД, выбранных в навигаторе, доступен как к помещению напрямую на график панели визуализации с соответствующей настройкой отображения, как показано на рис. 3, так и к выполнению вычислительных (расчётных) сценариев.

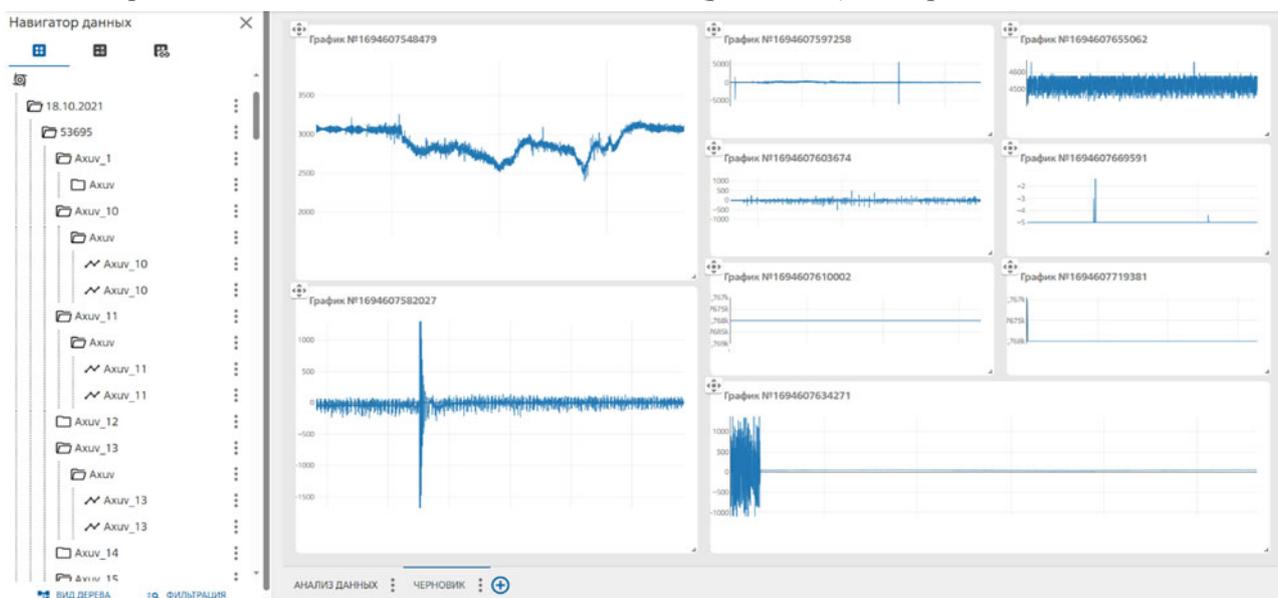


Рис. 3. Фрагмент графического пользовательского интерфейса проектирования панелей визуализации ЭД УТС-установок

Проектирование вычислительных сценариев доступно пользователю в режиме визуального редактора с возможностью использования штатных математических операций и методов, а также написанных вручную необходимых вычислительных этапов сценария с использованием интерактивной среды разработки на базе языка программирования Python, не покидая интерфейс программного обеспечения анализа и отображения, как показано на рис. 4.

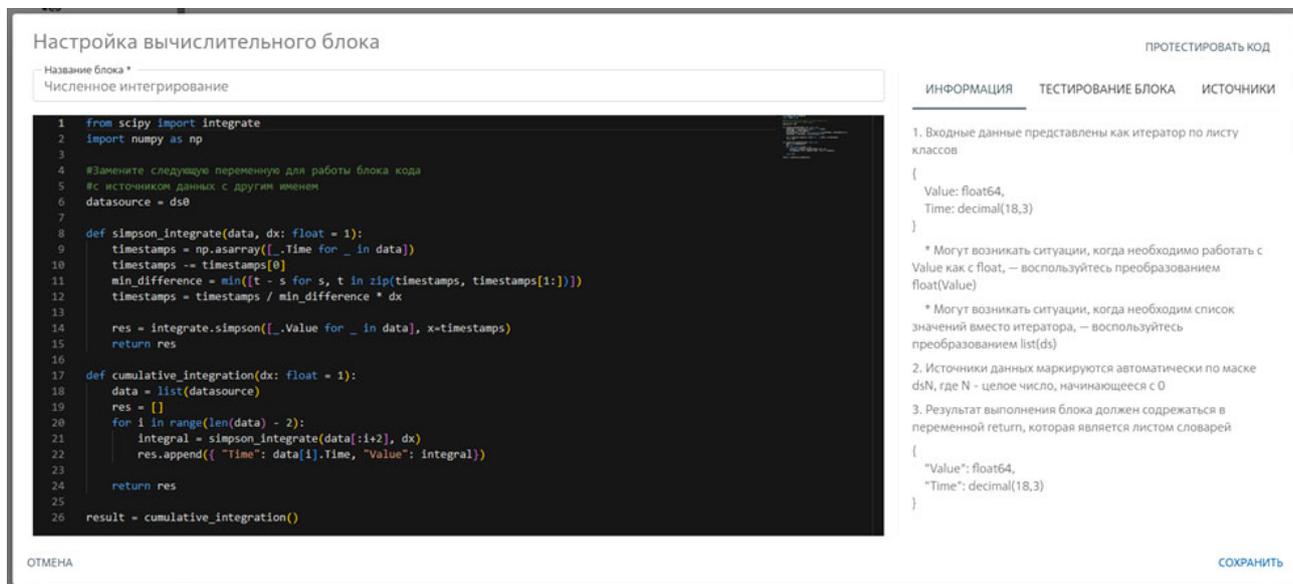


Рис. 4. Фрагмент графического пользовательского интерфейса формирования вычислительного блока для обработки ЭД на языке программирования Python

Все результаты пользовательской конфигурации графиков, интерактивных панелей визуализации, проведенных расчетов и прочих настроек сохраняются и, при необходимости, могут быть отправлены на ознакомление и дальнейшее использование другим пользователям программного обеспечения анализа и отображения данных с учетом наличия соответствующих полномочий у отправителя и получателя на доступ к данным. Кроме того, за счет возможностей экспорта данных и графиков пользователю предоставляется возможность упрощенного формирования необходимого наглядного материала для презентаций, научных статей и прочих нужд. Пример экспорта частного графика в файл показан на рис. 5.

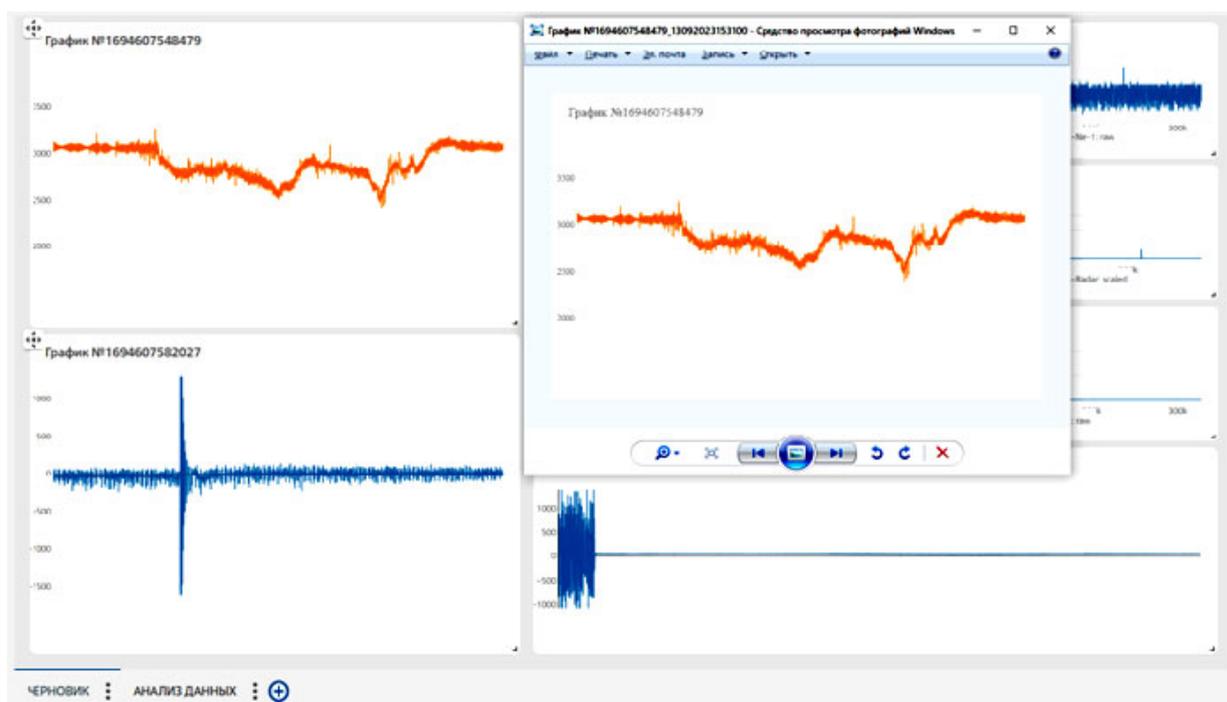


Рис. 5. Фрагмент графического пользовательского интерфейса экспорта частного графика в файл для последующего переиспользования

Таким образом, программное обеспечение анализа и отображения ЭД обеспечивает возможность использования удобных пользователям и интуитивно понятных инструментов работы с набором графиков ЭД, с функциональностью, соответствующей уровню научных задач участников АИП ИКП.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ И АПРОБАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Для целей реализации программного комплекса определены технологические решения, функционально удовлетворяющие сформированным требованиям, индустриально зарекомендовавшие себя и являющиеся свободно распространяемым (open-source) программным обеспечением.

Для реализации программного обеспечения взаимодействия между узлами АИП ИКП, а именно развёртывания экстракторов данных из источников, выбран язык программирования C# с учётом широко применяемого руководства C# Coding Conventions (C# Programming Guide)) [8]. Платформенной частью разработки экстракторов является .NET Core — модульная платформа для разработки программного обеспечения с открытым исходным кодом.

Для реализации структурированного хранилища ЭД используется свободно распространяемая колоночно-ориентированная система управления базами данных (СУБД) ClickHouse [9], которая широко применяется крупными отечественными и международными компаниями для реализации систем хранения и аналитики данных с высокочастотным запросом. Применение данной СУБД обеспечивает возможность хранения массивов диагностических данных по результатам выполнения на установках УТС исследований в колоночном формате, что позволяет как повысить быстродействие при выполнении запросов к данным (в отличие от реляционной модели хранения данных), так и упростить процедуру горизонтального масштабирования вычислительных средств, необходимых для структурированного хранения ЭД, за счёт встроенных в ClickHouse средств шардирования (стратегия масштабирования кластера, при которой части базы данных размещаются на разных узлах). Благодаря открытости СУБД ClickHouse обеспечено существенное повышение производительности при работе с массивными временными рядами (1D-диагностики) путём реализации на языке программирования C++ метода снижения частоты дискретизации представленных данных с сохранением визуальной схожести их графического представления.

Оркестрация, журнализация выполнения и мониторинг ETL-заданий по обработке ЭД реализуются на базе свободно распространяемого оркестратора Apache Airflow [10], а сами ETL-задания — на базе набора инструментов с открытым исходным кодом для реализации распределённой обработки неструктурированных и слабоструктурированных данных с применением языка программирования Python с учётом руководства по программированию на языке программирования Python (PEP 8 — Style Guide for Python Code) [11].

Файловое самоописанное хранение данных основано на иерархическом формате данных Hierarchical Data Format version 5 (HDF5), что обеспечивает совместимость с АИП ИКП и МО ИТЭР. Дополнительно обеспечено хранение в файлах формата Parquet.

Программное обеспечение анализа и отображения ЭД реализуется в виде приложения на базе совокупности свободно распространяемых технологий, языков программирования, модулей и компонентов, включая:

- язык программирования C# с учётом широко применяемого руководства C# Coding Conventions (C# Programming Guide));
- JavaScript-библиотеку для разработки пользовательских интерфейсов React.JS;
- графическую JavaScript-библиотеку для визуализации данных Plot.ly;
- графическую JavaScript-библиотеку для построения жизненных циклов и сценариев React Flow;
- браузерно-ориентированную библиотеку для реализации интегрированной среды разработки Monaco Editor.

Реализация программного обеспечения анализа и отображения экспериментальных данных в виде веб-приложения позволяет осуществлять коллективную работу через современный веб-интерфейс, а перечисленный набор технологий, языков программирования, модулей и компонентов обеспечивает быстродействие при работе с запросами на отображения множества массивов ЭД одновременно.

Хранение конфигурационных данных программного обеспечения анализа и отображения обеспечивается свободно распространяемой реляционной СУБД на базе PostgreSQL, являющейся широко используемой для надёжного хранения хорошо структурированных ограниченных по набору нормализованных данных с учётом требований к транзакционности — атомарность, согласованность, изоляция, устойчивость (atomicity, consistency, isolation, durability (ACID)).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы был создан программный комплекс работы с данными — программное обеспечение информационного взаимодействия между узлами прототипа АИП ИКП, а также программное обеспечение анализа и отображения экспериментальных данных внутри прототипа АИП ИКП. Были разработаны архитектура, функциональные требования, принципы построения графического пользовательского интерфейса, обоснован технологический подход к их реализации, выбраны и апробированы технологические решения. Созданное ПО позволяет:

— выполнять задачи информационного обмена между узлами АИП ИКП, а именно обеспечить извлечение данных из УТС-установок и стендов, их каталогизацию, структурированное и файловое хранение, оркестрацию, журнализацию, а также мониторинг процессов работы с данными;

— выполнять задачи анализа и отображения данных, а именно обеспечение (с учётом разграничения пользовательских полномочий) навигации, доступа к данным средствами математической обработки, а также создание панелей визуализации, выполнение вычислительных сценариев.

Выбранные технологические решения наилучшим образом подходят для работы с форматами данных отечественных УТС-установок и стендов, позволяют организовать единое пространство работы с данными отечественных УТС-исследований. Кроме того, выбранные решения учитывают принятые на ИТЭР форматы и подходят для работы над результатами международной кооперации в рамках проекта ИТЭР. Таким образом, описанные решения позволяют оптимизировать и унифицировать порядок работы с разнородными данными УТС-исследований.

На следующих этапах работы запланирована разработка программного обеспечения портала информационного обмена, который станет связующим звеном информационных и коммуникационных сервисов совместного участия в эксперименте. Также запланированы интеграция в АИП ИКП средств совместного проектирования для реализации разработки новых отечественных установок и создание экспериментального комплекса Центр работы с данными, который обеспечит функционал построения произвольных вычислительных инструментов и применения методов анализа данных и машинного обучения для решения задач прогнозирования, поиска скрытых зависимостей, аномалий и т.п.

Работа выполнена в рамках государственного контракта с Госкорпорацией «Росатом» от 22.03.2023 № Н.4к.241.09.23.1036 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в Российской Федерации. Этап 2023—2024 годов».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов О.И., Лобес Л.А., Потапов А.М., Степанов Д.Н., Портоне С.С., Ларионов А.С., Нагорный Н.В., Миронова Е.Ю., Ежова З.В., Семенов И.Б. Опыт России в разработке и тестировании элементов для удалённого участия в эксперименте ИТЭР. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4, с. 56—60.
2. Степанов Д.Н., Лобес Л.А., Семенов О.И. — В сб.: XIX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы». — Москва, Троицк: «Тривант», 2021, с. 242—243.
3. Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Семенов О.И., Ежова З.В., Семенов Е.В., Миронов А.Ю., Ларионов А.С., Нагорный Н.В., Звонарева А.А., Григорян Л.А., Гужев Д.И., Николаев А.И., Семенов И.Б., Красильников А.В. Развитие аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства как инструмента интеграции исследований в области УТС. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4, с. 34—44.
4. Портал информационного обмена в области управляемого термоядерного синтеза; <https://fusionspace.ru>.
5. National Instruments. TDMS File Format Internal Structure; <https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/07/tdms-file-format-internal-structure.html>.
6. ROOT Manual. ROOT files; [https://root.cern/manual/root\\_files/](https://root.cern/manual/root_files/).

7. Antcheva I., Ballintijn M., Bellenot B., Biskup M., Brun R., Buncic N., Canal Ph., Casadei D., Couet O., Fine V., Franco L., Ganis G., Gheata A., Maline D.G., Goto M., Iwaszkiewicz J., Kreshuk A., Segura D.M., Maunder R., Moneta L., Naumann A., Offermann E., Onuchin V., Panacek S., Rademakers F., Russo P., Tadel M. ROOT — A C++ Framework for Petabyte Data Storage, Statistical Analysis and Visualization. — Computer Physics Communications, 2009, vol. 180, № 12, p. 2499—2512.
8. Microsoft Ignite. Общие соглашения о коде C#; <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/programming-guide/inside-a-program/coding-conventions>.
9. ClickHouse. Use cases; <https://clickhouse.com/use-cases>.
10. The Apache Software Foundation. Use cases; <https://airflow.apache.org/use-cases/>.
11. Python Enhancement Proposals. PEP 8 — Style Guide for Python Code; <https://peps.python.org/pep-0008/>.



Артём Сергеевич Вишня, генеральный директор; ООО «АйТинерис»; 236022 Калининград, пл. Победы 4, лит. VIII, пом. 6, Россия  
[vishnya@itneris.ru](mailto:vishnya@itneris.ru)



Анна Валерьевна Лебедева, директор по развитию; ООО «АйТинерис»; 236022 Калининград, пл. Победы 4, лит. VIII, пом. 6, Россия  
[lebedeva@itneris.ru](mailto:lebedeva@itneris.ru)



Олег Игоревич Семенов, главный специалист; Частное учреждение «ИТЭР-Центр»; 1123060 Москва, ул. Расплетина 11, корп. 2, Россия  
[O.Semenov@iterrf.ru](mailto:O.Semenov@iterrf.ru)



Екатерина Юрьевна Миронова, с.н.с.; Частное учреждение «ИТЭР-Центр»; 123060 Москва, ул. Расплетина 11, корп. 2, Россия  
[E.Mironova@iterrf.ru](mailto:E.Mironova@iterrf.ru)



Людмила Юрьевна Калина, программист; ООО «АйТинерис»; 236022 Калининград, пл. Победы 4, лит. VIII, пом. 6, Россия  
[kalina@itneris.ru](mailto:kalina@itneris.ru)



Демид Михайлович Гусев, ведущий программист; ООО «АйТинерис»; 236022 Калининград, пл. Победы 4, лит. VIII, пом. 6, Россия  
[gusev@itneris.ru](mailto:gusev@itneris.ru)



Злата Владиславовна Ежова, специалист; Частное учреждение «ИТЭР-Центр»; 123060 Москва, ул. Расплетина 11, корп. 2, Россия  
[Z.Ezhova@iterrf.ru](mailto:Z.Ezhova@iterrf.ru)



Сергей Сергеевич Портоне, начальник сектора; Частное учреждение «ИТЭР-Центр»; 1123060 Москва, ул. Расплетина 11, корп. 2, Россия  
[S.Portone@iterrf.ru](mailto:S.Portone@iterrf.ru)

Статья поступила в редакцию 9 октября 2023 г.  
После доработки 11 октября 2023 г.  
Принята к публикации 12 октября 2023 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, вып. 4, с. 16—24.