

УДК. 533.952

РАЗВИТИЕ АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА КАК ИНСТРУМЕНТА ИНТЕГРАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ УТС

*С.С. Портоне, Е.Ю. Миронова, О.И. Семенов, З.В. Ежова, Е.В. Семенов, А.Ю. Миронов, А.С. Ларионов,
Н.В. Нагорный, А.А. Звонарева, Л.А. Григорян, Д.И. Гужев, А.И. Николаев, И.В. Семенов, А.В. Красильников*

Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия

Для организации территориально-распределённой совместной научной деятельности необходима технологическая база, обеспечивающая быстрый информационный обмен, централизованное хранение данных, объединяющая материально-технические ресурсы и профессиональные компетенции участников. Такой базой служат информационные платформы и системы удалённого участия в экспериментальной деятельности, широко применяемые в крупнейших международных научных сообществах и проектах в области управляемого термоядерного синтеза (на установках ИТЭР, JET, DIII-D и в других проектах, например, EUROFusion). В статье представлены результаты внедрения российского проекта аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства (АИП ИКП, FusionSpace.RU) для совместной научной деятельности в области УТС-исследований в Российской Федерации, рассмотрен международный опыт построения систем участия в территориально-распределённых экспериментах с использованием центров удалённого участия (Japan Remote Experimentation Center, Russian Remote Participation Center). Показано, что подходы к работе с данными, внедрённые в мировых научных сообществах и централизуемые в FusionSpace.RU, обеспечивают создание единого пространства для отечественных и международных совместных УТС-исследований.

Ключевые слова: распределённые исследования, цифровая научная платформа, удалённое участие.

INFRASTRUCTURAL HARDWARE PLATFORM OF THE COMMON IT SPACE FOR FUSION RESEARCH (FUSIONSPACE.RU)

*S.S. Portone, E.Yu. Mironova, O.I. Semenov, Z.V. Ezhova, E.V. Semenov, A.Yu. Mironov, A.S. Larionov,
N.V. Nagorny, A.A. Zvonareva, L.A. Grigoryan, D.I. Guzhev, A.I. Nikolaev, I.V. Semenov, A.V. Krasilnikov*

Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

The technological basis for fast information exchange, centralized data storage, combining hardware infrastructure and collaboration of professionals is required to perform of distributed joint scientific research. Remote participation platforms are widely used in the largest international scientific fusion projects (ITER, JET, DIII-D, EUROFusion etc.) represent example of it. The paper presents the results of the implementation of Russian project FusionSpace.Ru — IT infrastructure for performing joint experiments on Russian Fusion Facilities with remote participation, united space for fusion science networking in Russia. The article refers to international experience of territorially distributed experiment systems design, including remote participation and experimentation centers (Japan Remote Experimentation Center, Russian Remote Participation Center). It is shown that foreign approaches and best practices of data handling applied in FusionSpace.RU ensure the advanced design of the platform for domestic and international joint fusion research.

Key words: distributed research, digital scientific platform, remote participation.

DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-4-34-44

ВВЕДЕНИЕ

Современные информационные технологии позволяют объединить в рамках научно-исследовательских программ профессиональные компетенции различных организаций, вычислительные мощности, аппаратную инфраструктуру, базы данных и организовать подготовку научно-технических кадров, что в сочетании с мощными территориально-распределёнными гетерогенными информационно-вычислительными системами существенно повышает эффективность научных исследований.

Создание новых и модернизация существующих информационных систем экспериментальных установок и стендов в рамках внутренней программы по развитию управляемого термоядерного синтеза (УТС) приводит к увеличению объёма и многообразия получаемых данных, усложнению процессов их хранения и обработки. Если обеспечить бесперебойный оперативный доступ к хранимым данным боль-

шого объёма и предоставить возможность работы с ними при помощи современных средств анализа и обработки данных, то появится возможность организовать совместную научную деятельность на УТС-установках и стендах, что приведёт к увеличению научного потенциала и созданию критической массы для развития отрасли.

Технологической базой для совместной научной деятельности служат системы дистанционного участия в научных экспериментах, позволяющие объединить в рамках научно-исследовательских программ вычислительные мощности, базы данных и профессиональные компетенции различных организаций. В настоящее время такие технологии эффективно развиваются в международных проектах, таких как ИТЭР, JET, DIII-D, EUROfusion, WEST и др. [4—11].

На основе изучения зарубежного и российского опыта участия в международных и отечественных проектах были разработаны технические и функциональные требования, которые стали базисом для создания аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства УТС-исследований в РФ (АИП ИКП, далее ИКП FusionSpace.RU или FusionSpace.RU).

В 2021 г. успешно пройден первый этап создания FusionSpace.RU, позволяющего обеспечить:

- совместное планирование и проведение дистанционных научных исследований;
- информационное взаимодействие в рамках экспериментальных программ по УТС (унифицированные форматы и структуры данных, совместимые с IMAS [Integrated Modelling & Analysis Suite]);
- централизованный доступ к базе экспериментальных данных (хранение научных данных как в унифицированном, так и в исходном формате) и интеграцию с математическими пакетами и кодами с возможностью создания пользовательских приложений;
- сохранение уникальных решений мировой практики в области УТС и последующего их распространения и внедрения, в том числе на основе опыта Международной организации ИТЭР.

В 2026—2028 гг. должен состояться физический пуск самой большой в мире экспериментальной УТС-установки ИТЭР. Создаваемое в настоящее время информационно-коммуникационное пространство установки ИТЭР станет эталоном для взаимодействия в рамках международного сотрудничества в области УТС. Следует подчеркнуть, что все результаты научной деятельности ИТЭР (500—2000 ГБ научных данных в день) принадлежат участникам проекта, в том числе и России. Таким образом, к 2025 г. ИКП FusionSpace.RU должно быть готово к информационному взаимодействию с информационно-коммуникационным пространством установки ИТЭР.

Цель данной статьи — представить результаты разработки и функциональные возможности ИКП FusionSpace.RU как инструмента интеграции отечественных организаций, занимающихся исследованиями в области УТС, в единое информационное пространство с учётом стандартов и методик, широко используемых в мировой практике, в том числе в Международной организации ИТЭР.

В данной статье представлены результаты первого этапа работ по созданию ИКП FusionSpace.RU.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЖДУНАРОДНОГО ОПЫТА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УДАЛЁННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПРИ СОЗДАНИИ И РАЗРАБОТКЕ ИКП FUSIONSPACE.RU

FusionSpace.RU создано для предоставления пользователям (участникам исследований) функционала доступа к научным данным, вычислительным ресурсам, специализированному ПО, для планирования распределённых научных исследований, совместного участия в экспериментальных программах с эффектом присутствия на установке и других научных и коммуникационных сервисов [3]. Для реализации этого функционала были использованы зарекомендовавшие себя подходы к проведению территориально-распределённых исследований и сохранению компетенций и знаний, используемых на зарубежных установках (ASDEX Upgrade, JT-60SA, TCV, EAST, JET, ИТЭР и др.) [5, 8].

Задача FusionSpace.RU состоит в предоставлении функционала управления научной программой, начиная с этапа планирования, в том числе удалённого путём отправки запросов через специальные формы, заканчивая анализом полученных результатов. Подобный опыт внедрён на токамаке WEST, где используется программный пакет Operation Management Software Suite [7].

Для организации удалённого доступа к экспериментальным данным и их обработки на вычислительных мощностях в рамках территориально-распределённого участия апробируются следующие подходы: распределение экспериментальных данных между научными центрами с последующей обработкой этих данных в лабораториях, участвующих в экспериментах (подход реализован на Большом Адронном Коллайдере в рамках программы The Worldwide LHC Computing Grid); обработка экспериментальных данных на удалённых суперкомпьютерах (данный вариант частично реализован на установке DIII-D в Сан-Диего с последующей обработкой в Аргонской национальной лаборатории в Чикаго [8]).

Для обеспечения связи между лабораториями и пультами в FusionSpace.RU созданы центры коллективного дистанционного участия, в рамках которых разработано и реализовано решение по передаче экранов операторов установки в режиме реального времени. Подобные центры удалённого участия создаются для прямого взаимодействия с Международной организацией ИТЭР на площадках домашних агентств участников проекта ИТЭР [10].

Портал информационного обмена FusionSpace.RU и специализированные программные средства, создаваемые поэтапно, обеспечат возможность внешнего использования сервисов, таких как удалённый доступ к архиву данных экспериментов, визуализация экспериментальных данных, сервис видеоконференцсвязи с планировщиком событий, доступ к базе технической и проектной документации, репозиториям моделей, расчётным кодам, специализированному программному обеспечению в соответствии с регламентом доступа конкретного пользователя (за основу взят опыт JET [6]).

АППАРАТНАЯ СТРУКТУРА ИКП FUSIONSPACE.RU

FusionSpace.RU представляет собой территориально-распределённую инфраструктуру, узлы которой развёрнуты на площадках ведущих отечественных научных центров, специализирующихся на исследованиях в области УТС. FusionSpace.RU состоит из следующих трёх типовых узлов: центральный узел (ЦУ), центр дистанционного участия (ЦДУ), Совместная лаборатория (СЛ) (рис. 1).



Рис. 1. Структура ИКП FusionSpace.RU

СЛ. СЛ представляют собой программно-аппаратную инфраструктуру, необходимую для сбора и обмена научными данными. Каждая СЛ обеспечивает интерфейс с установкой или стендом — источником научных данных, его средствами сбора, хранения и передачи данных в ИКП, предоставляя необходимые технические средства (рис. 2).

Аппаратная инфраструктура СЛ включает оборудование для консолидации данных с системой хранения данных (объём буфера данных не менее 20 ТБ), устройство видеозахвата с поддержкой разрешения 4 К, специализированные рабочие места участников эксперимента, комплект оборудования для организации видеоконференцсвязи (ВКС) и сетевого подключения, в том числе средства обеспечения защиты информации, а также устройства мониторинга, контроля доступа и обеспечения отказоустойчивости.

Данная аппаратная инфраструктура позволяет осуществлять безопасную передачу научных данных, ретранслировать видеосигнал высокого качества, осуществлять локальную работу с данными установки и дистанционную работу с сервисами FusionSpace.RU.

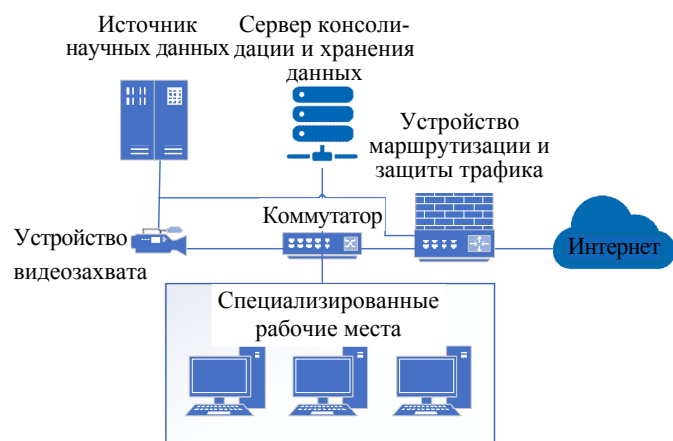


Рис. 2. Общая схема структуры СЛ ИКП FusionSpace.RU

ЦДУ. ЦДУ — специализированные комплексы коллективного удалённого участия в экспериментах, оборудованные рабочими местами для доступа к сервисам платформы и локальной работы с данными ИКП (рис. 3).

Техническое оснащение типового ЦДУ включает видеостену, контроллер видеостены с возможностью объединения экранов в единое пространство отображения научных данных, специализированные рабочие места участников эксперимента, комплект оборудования для организации ВКС и сетевого подключения, в том числе средства обеспечения защиты информации, а также устройства мониторинга, контроля доступа и обеспечения отказоустойчивости.

Аппаратная инфраструктура типового ЦДУ поддерживает процессы участия в совместной научной деятельности, предоставляет возможность локальной работы с данными и дистанционной работы с сервисами FusionSpace.RU.

ЦУ АИП ИКП. ЦУ является ключевым элементом платформы. Он представляет собой совокупность серверной и сетевой инфраструктуры, обеспечивающую функционирование FusionSpace.RU. Инфраструктура ЦУ адаптирована для получения, обработки, хранения и передачи научных данных и иных информационных массивов, обеспечивает возможность проведения расчётов и вычислений, функционирование портала информационного обмена, системы информационной безопасности платформы, позволяет осуществлять администрирование прав доступа пользователей платформы и мониторинг узлов ИКП.

Созданная аппаратная инфраструктура ЦУ поддерживает хранение и передачу данных объёмом до 100 ТБ, работу системы с архивом научных данных со скоростью не менее 300 МБ/с, обеспечивает скорость миграции виртуальных серверов не менее 500 МБ/с и подключение до 100 внешних узлов суммарной пропускной способностью не менее 400 Мбит/с. Выбранные средства защиты сетевой инфраструктуры обеспечивают криптографическую защиту информации в соответствии с ГОСТ 28147—89. Обеспечено резервирование основных серверных компонентов ЦУ для оперативного восстановления в случае выхода из строя. Топология сети коммутации выполнена с учётом резервирования как сетевых соединений, так и коммутаторов, что обеспечивает приемлемую отказоустойчивость сети.

ЦУ архитектурно и функционально разделён на три подсистемы:

- подсистему обеспечения работоспособности центрального узла;
- подсистему обеспечения сервисов ИКП FusionSpace.RU;
- подсистему информационной безопасности.

ЦУ размещён в серверном помещении, отвечающем требованиям бесперебойной и безопасной работы.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦУ ИКП FUSIONSPACE.RU

Для выполнения задач ИКП FusionSpace.RU на ЦУ реализованы следующие функции:

- виртуализация;
- мониторинг;
- контроллер АИП ИКП;
- хранение конфигураций;
- резервное копирование;
- проведение вычислений;
- обеспечение коммуникационных сервисов;
- хранение научных данных;
- обеспечение информационной безопасности.

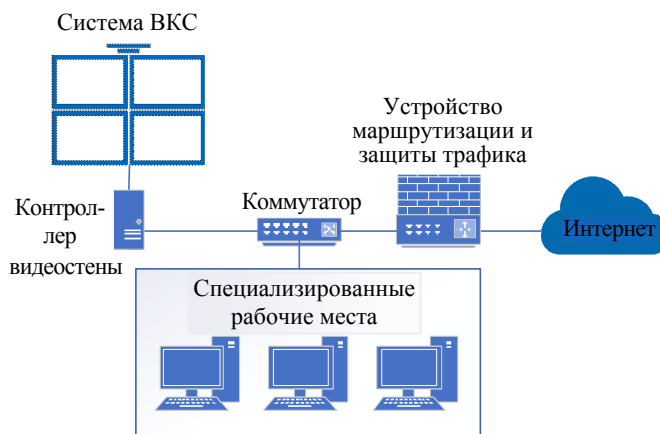


Рис. 3. Структура ЦДУ ИКП FusionSpace.RU

Функция виртуализации реализуется при помощи гиперконвергентного (гипервизор VMware ESXi) и конвергентного (гипервизор Microsoft Hyper-V) кластеров, системы хранения данных (СХД) и сервера управления виртуализацией в СЛ. Помимо создания и управления ресурсами инфраструктурных и пользовательских виртуальных машин, происходит адаптация к возрастающей нагрузке на компоненты системы и балансировка ресурсов аппаратных узлов. Отказоустойчивость функции виртуализации достигается путём автоматической миграции приложений и виртуальных машин с отказавших компонентов системы на исправные, а также достаточным ресурсом ЦУ АИП ИКП.

Функция мониторинга реализуется при помощи программного средства PRTG Network Monitor, развёрнутого на виртуальной машине конвергентного кластера. С помощью программного средства PRTG (Paessler Router Traffic Grapher) Network Monitor осуществляется контроль и оповещение о случаях чрезвычайных ситуаций и нарушений в работе оборудования и сервисов платформы. Контроль за температурой, влажностью и доступом к оборудованию в шкафах осуществляется при помощи устройств семейства NetPing, установленных в них, и связи с контроллером серверного помещения. PRTG Network Monitor опрашивает всё оборудование ЦУ и внешних узлов, имеющее подключение к сети, с целью получения статуса, отчёта о работоспособности, текущей нагрузке и использовании ресурсов. Оперативное информирование о сбоях в работе системы и чрезвычайных ситуациях выполняется PRTG Network Monitor путём использования настраиваемых оповещений с приоритизацией событий и дальнейшей отправкой почтовых уведомлений.

Функция контроллера АИП ИКП реализуется с помощью отдельно стоящего серверного оборудования, а также виртуальных машин конвергентного кластера для обеспечения отказоустойчивого решения. Функция контроллера АИП ИКП обеспечивает работу службы каталогов АИП ИКП, сервис транслирования доменных имён и групповые политики с помощью компонентов Active Directory, Domain Name System (DNS), Group Policy.

Функции резервного копирования и хранения конфигураций оборудования реализуются с помощью отдельного сервера, подключённого к СХД. В системе сохраняются резервные копии виртуальных машин конвергентного и гиперконвергентного кластеров, а также настройки сетевого и серверного оборудования. В качестве инструмента резервного копирования используется программный продукт Veeam Backup & Replication. Быстрый запуск виртуальной машины непосредственно из хранилища резервных копий позволяет запустить вышедшую из строя виртуальную машину за несколько минут и вернуть её в работу.

Функция обеспечения коммуникационных сервисов реализуется с помощью отдельной виртуальной машины на конвергентном кластере. Коммуникационные сервисы выполняются с помощью программного обеспечения TrueConf. TrueConf позволяет объединять переговорные комнаты, рабочие места и мобильные устройства для совместной работы. TrueConf построен на программной масштабируемой архитектуре, позволяющей работать как в локальных сетях, так и через интернет. Сервер TrueConf позволяет проводить несколько конференций с тысячами пользователей, подключённых через клиентские приложения.

Функция хранения научных данных реализуется с помощью ресурсов конвергентного и гиперконвергентного кластеров и СХД. Сохранение научных данных в СХД и доступ к ним из различных виртуальных машин осуществляются с помощью архитектурного решения SAN (Storage Area Network) и vSAN (virtual Storage Area Network).

Функция проведения вычислений реализуется с помощью вычислительного сервера Inspur NF5468A5 и двух серверов расчётных приложений DELL R740XD. Серверы работают под операционной системой Linux, работа с графическими ускорителями осуществляется с помощью программно-аппаратной архитектуры Nvidia CUDA (Compute Unified Device Architecture).

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ НАУЧНЫЕ СЕРВИСЫ ИКП FUSIONSPACE.RU

В ИКП FusionSpace.RU пользователям предоставляется возможность решать задачи нейтронных и конструкторских расчётов, моделирования оптических систем, разработки и тестирования программного обеспечения систем сбора данных и управления, проведения научных расчётов и визуализации данных на централизованных вычислительных ресурсах и инструментах по запросу. Для этого на высокопроизводительных серверах разворачивается менеджер загрузки и приоритизации выполняемых задач по ресурсам кластера (например, Slurm) и дополнительное специализированное программное обеспечение.

При решении определённого круга ресурсоёмких научно-технических задач, таких как нейтронные и конструкционные расчёты, потоковая обработка экспериментальных данных, выполнение логических алгоритмов на уровне компьютеров и визуализация данных, требуется обеспечение возможности выполнения параллельной обработки данных. Например, для расчётных задач, в которых приходится иметь дело с матричным умножением, а также в случае решения задач, в которых проводится большое количество однотипных вычислений с различными параметрами (расчёты методом Монте-Карло либо численные расчёты методом конечных элементов, например, распространения тепла, переноса нейтронов, механических нагрузок и т.д.), требуется обеспечить возможность распараллеливания исполнения кода. В таких случаях используются библиотека CuPy (CUDA + Python) и аналоги, которые позволяют загружать параллелизуемые вычислительные задачи на графический процессор (GPU, видеокарта). GPU NVIDIA с тензорными ядрами обеспечивает значительное ускорение анализа данных и вычислительных задач с пропускной способностью памяти более 2 ТБ/с, что позволяет работать с ресурсоёмкими моделями и большими объёмами данных.

Описанная аппаратная инфраструктура ИКП FusionSpace.RU позволяет организовать совместное проведение научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ, связывая организации, территориально распределённые по стране (например, Новосибирск, Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород и др.).

Единое информационное пространство использования средств совместного проектирования, расчётных пакетов и приложений, включая IMAS, обеспечивает возможность выполнения работ, находясь на своём рабочем месте, без долгосрочных командировок.

FusionSpace.RU даёт пользователям возможность «находиться на установке», обеспечивая оперативный доступ к информации экранов операторов установки, экранов отдельных её систем, к интересующим данным в формате, удобном для локального анализа, а также возможность коммуникации с персоналом пультовой.

Для проведения расчётных работ реализована возможность использования прикладных пакетов и приложений, включая IMAS.

Совместное проектирование. Для решения территориально-распределённых задач совместного проектирования, таких как создание эскизного проекта токамака TRT, где требуется множество уникальных технических и инженерных решений от различных команд российских разработчиков, возникает необходимость в инструментах совместного проектирования и управления проектом (т.е. использование систем класса PLM — Product Lifecycle Management), применяемых в научных проектах схожего масштаба, например, ИТЭР). В рамках ИКП FusionSpace.RU предполагается создать такие решения. В качестве функциональных требований, предъявляемых к системе совместного проектирования, выступают:

- функционал системы управления данными с возможностью хранения и управления данными САПР-приложений (систем автоматизированного проектирования);

- возможность управления и интеграции данных различных САПР: AutoCAD, CATIA, Solidworks, КОМПАС-3D, T-FLEX CAD и др.;

- централизованная система управления проектной документацией;

- возможность использования элементов систем управления требованиями, обеспечения целостности проектирования, управление конфигурациями и внесением изменений;

- обеспечение доступа и эффективной совместной работы пользователей — участников проекта из различных регионов России;

- управление инженерными данными и конфигурацией систем проектируемой установки и её частей;

- сохранение и формирование отчётности в соответствии со стандартами ЕСКД и ЕСТД;

- управление планированием инженерных процессов и бизнес-логикой (опционально).

В настоящее время на мощностях ИКП FusionSpace.RU развёрнута система хранения и обмена инженерными данными в рамках проектирования токамака TRT. Одновременно с этим проходит тестирование российских систем совместного проектирования, по результатам которого будет определено решение, наиболее соответствующее нуждам проекта.

Научные данные с установок. Существующие установки и стенды УТС-исследований в России разрабатывались и эксплуатировались в течение длительного периода времени с использованием раз-

личных подходов и принципов организации информационных систем, их пользовательских инструментов и средств. По этой причине каждая из существующих установок уникальна с точки зрения информационных взаимодействий.

Каждая экспериментальная установка имеет свой специфический набор технологических и диагностических подсистем. Экспериментальные данные на установках хранятся в различных, иногда уникальных форматах. Используемые способы хранения зачастую сильно отличаются. В ИКП FusionSpace.RU предполагается разработать обобщённые форматы хранения для каждого типа данных с учётом их особенностей при каталогизации и индексации.

Основной объём сохраняемых данных будет образован следующими типами: научными и технологическими данными, в том числе экспериментальными (в базах и файлах данных), документацией, статьями и отчётами, аудио-, видеозаписями и фотографиями экспериментов, трудами конференций.

Для получения данных от установок и стендов необходимо осуществлять безопасную синхронизацию данных, не оказывающую влияние на их источник. Для каждой СЛ такие программные средства подбираются индивидуально. В типовом случае обеспечивается синхронизация файлов и каталогов результатов экспериментов в двух местах — сервер установки и сервер СЛ, при необходимости используется кодирование данных. Важно отметить, что передаются только изменения в каталогах (реакция по подписке на изменения при регулярном опросе), определяемые при синхронизации баз данных информации об экспериментах.

Управление научными данными. Навигатор данных. Данные экспериментов предоставляются в форматах источников данных, которые используются на экспериментальных установках и стендах. Данные передаются от установки или стенда (источник данных) через СЛ в централизованное хранилище, где в дальнейшем данные подлежат консолидации: классификации, типизации, конвертации (если требуется), сжатию, индексации для обеспечения оперативного поиска и размещения в репозиториях.

В ИКП FusionSpace.RU хранение данных построено на трёхуровневой модели, включающей в себя:

- нижний уровень — базы данных и каталоги, используемые для первичного получения данных от источников (сервера СЛ и данных, генерируемых в самом ИКП);
- средний уровень — уровень, выполняющий консолидацию и преобразование (при необходимости) всех входящих данных;
- верхний уровень — это уровень клиента (навигатор данных). Этот уровень содержит инструменты, используемые для доступа к данным, высокоуровневого анализа данных и пр.

Система управления научными данными действует как система управления документами, собирая, каталогизируя и архивируя получаемые или создаваемые в рамках ИКП данные, и даёт доступ к уже структурированной информации.

Система управления научными данными располагается на среднем и верхнем уровнях архитектуры хранения данных. При этом доступ к репозиториям прочей (исходно структурированной) хранимой информации, такой как модели, пользовательское ПО, документация, аудио-, фото- и видеоматериалы, также может осуществляться через навигатор данных либо быть синхронизированным с системой управления научными данными для сохранения однородной информационной среды.

Основной функционал системы управления научными данными FusionSpace.RU следующий: проверка целостности данных, индексирование данных, наличие и обновление метаданных, поддержка различных видов данных (сценарии, модельные, экспериментальные и обработанные данные, прикладное ПО, расчётные коды, модели и другая информация, предоставляемая узлами ИКП FusionSpace.RU).

Доступ к данным обеспечивает навигатор данных, структурированный по установкам, типам измерительных систем, дате, номерам, ключевым характеристикам эксперимента и пр.

Между программными средствами ИКП FusionSpace.RU (навигатор данных, журнал экспериментов, ВКС и пр.) предусмотрена возможность обмена информацией для обеспечения совместного доступа (ссылки на объекты данных, доступ к списку пользователей, интересующихся этой же информацией за определённый период, оперативное подключение коллег с целью обсуждения) и поддержки принятия решений.

Журнал экспериментов — Logbook. В ходе подготовки и проведения экспериментальной деятельности ведутся журналы экспериментов. Зачастую даже при наличии современных информационных систем на объекте данная информация ведётся вручную в бумажном виде и в дальнейшем сложно подда-

ётся оцифровке для архивирования и последующего автоматизированного использования. Предлагается разработать гибкое средство ведения журнала экспериментов, позволяющее организовать локальную работу на установке с дальнейшей синхронизацией в FusionSpace.RU. Запланировано, что для установок структура Logbook будет иметь следующий вид:

1. Название эксперимента;
2. Номер импульса;
3. Дата и время (время начала);
4. Длительность (время окончания);
5. Цель/название эксперимента;
6. Руководитель эксперимента;
7. Текстовые комментарии;
8. Магнитное поле (B_t);
9. Ток плазмы;
10. Плотность плазмы;
11. Температура (электронная);
12. Тип разряда (классификация на всех установках разная, зачастую связана с типом нагрева, параметрами технологических систем и т.д.);
13. Участники эксперимента.

Портал информационного обмена. Для создания единой информационной среды совместной деятельности участников в FusionSpace.RU организуется специализированный портал информационного обмена. Портал информационного обмена представляет собой средство доступа к научным сервисам и информационным ресурсам и обеспечивает возможность использования программного обеспечения, реализованного в формате веб-приложений, а также оперирования релевантной и архивной информацией, связанной с УТС-исследованиями в РФ и мире, получаемой от участников ИКП.

Для управления информацией в FusionSpace.RU предусмотрена иерархичная система информационных объектов, предполагающая горизонтальные и вертикальные связи объектов и их атрибутов. К информации ИКП относятся реестр установок, стендов и оборудования с архивной справкой и внутренним классификатором, информация о научных программах установок и стендов, архивные данные, архив профильных научных публикаций, карта компетенций и пр. Возможность доступа к информации определена принадлежностью к конкретной пользовательской группе.

Функционал портала информационного обмена также предполагает совместное планирование экспериментальных и научных программ с учётом ранее запланированных экспериментов, доступности оборудования, установок и экспериментальных стендов, организацию профильных научных конференций и семинаров, поиск утверждённых мероприятий (экспериментальных и научных программ, конференций, семинаров) с возможностью отправки запроса на участие и пр. Основными структурными элементами портала являются информационный раздел, содержащий доступные пользователю сведения об информационных объектах FusionSpace.RU, навигатор данных, специализированный раздел, представленный набором веб-приложений для работы с экспериментальными данными, личный кабинет, раздел управления информацией и раздел администрирования прав пользователей.

Поддержка принятия научных решений в FusionSpace.RU осуществляется на основе средств управления документацией и знаниями в рамках портала при наличии интегрированных средств группового профессионального общения для научного и технического персонала организаций-участниц ИКП, сторонних экспертов, сотрудников и студентов высших учебных заведений в области УТС. В перспективе данные средства позволят сохранить знания этапов проектирования и эксплуатации установки ИТЭР для дальнейшего использования в России.

Хранение документации, отчётов и научных статей предполагает использование в рамках портала системы с каталогизацией. Публикация результатов научной деятельности предполагает хранение в классифицированном по тематике и авторам виде. Аудио- и видеозаписи экспериментов и конференций, а также фотографии хранятся в отдельном связанном разделе с каталогизацией по времени, объектам, событиям и их особенностям.

Анализ, обработка и отображение данных. Конечные пользователи FusionSpace.RU посредством имеющихся программных средств и портала информационного обмена имеют возможность анализировать, обрабатывать и визуализировать данные.

В силу необходимости использования моделей и специализированного ресурсоёмкого ПО пользователям может предоставляться доступ (по запросу) к ресурсам высокопроизводительного расчётного кластера с удалённых рабочих мест. При этом обеспечивается (при необходимости) перенос запрошенных данных в индивидуальные пользовательские области для дальнейшей оперативной работы с ними.

Для отображения и первичного анализа данных результатов экспериментов в настоящее время апробируются следующие средства:

— стандартные средства отображения данных, интегрированные в средства управления установками и стендами. Например, используемые для установки ИТЭР CSSstudio для работы с оперативными данными неудобны для отображения больших массивов и анализа данных, а ThermoVir позволяет выполнять отрисовку видеоданных (3D, распределения и пр.), но является коммерческим решением;

— свободно распространяемые и прочие пользовательские средства работы с данными эксперимента из архива, реализованные на Qt, Python и пр.

В продолжение работ запланирована адаптация полученного опыта апробации в процессе создания универсального средства анализа и отображения данных под нужды пользователей ИКП согласно следующим требованиям к его функционалу:

— работа с данными различных типов (бинарные файлы и иерархические форматы данных (HDF5 — Hierarchical Data Format 5 и пр.), файлы изображений, медиафайлы, текстовые файлы), включая совместимость с форматами данных IMAS;

— типовая обработка экспериментальных данных, использование математических операций над данными;

— возможность использовать специальные пользовательские коды и программы (скрипты для преобразования данных);

— отрисовка графиков с заданной выборкой и скважностью;

— построение трёхмерных графиков (профили и поверхности);

— гибкие возможности по настройке способов формирования пользовательских данных:

одновременное предоставление информации из нескольких источников (наложение графиков в одной координатной плоскости);

возможность масштабирования графиков, настройка цвета (и др.) параметров графика;

установка меток (точек) на графиках;

возможность наложения дополнительной информации на график;

— возможность сохранения полученной графической информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время завершён первый этап создания платформы ИКП FusionSpace.RU, которая включает в себя ЦУ, восемь ЦДУ и шесть СЛ. В единое информационное пространство объединены предприятия ГК «Росатом» (ТРИНИТИ, НИИЭФА, ИТЭР-Центр и ИЛФИ РФЯЦ — ВНИИЭФ) и институты Министерства науки и высшего образования (ФТИ, ИПФ, ИЯФ). На следующем этапе запланировано подключение профильных вузов (МИФИ, МФТИ, МЭИ и пр.) и других российских научных центров, а также подключение международных установок, таких как ИТЭР.

ИКП FusionSpace.RU позволяет осуществлять оперативный доступ к хранимым данным большого объёма, анализ, обработку и визуализацию данных, дистанционно участвовать в проведении экспериментов и пусконаладочных работах, а также создаёт единое коммуникационное пространство.

В настоящее время на платформе ИКП исследуется возможность территориально-распределённого проектирования токамака TRT. Параллельно с этим проходит апробация отечественных PLM-систем для совместного проектирования, по результатам которой будет проведена интеграция в ИКП FusionSpace.RU.

Через FusionSpace.RU проводятся заседания постоянно действующего семинара по проектированию токамака TRT (рис. 4), совместные работы в области лазерной техники (ТРИНИТИ, г. Троицк, РФЯЦ — ВНИИЭФ, г. Саров) и исследования по Томсоновскому рассеянию микроволнового излучения (ИПФ, Нижний Новгород, и ИЯФ, г. Новосибирск, рис. 5).

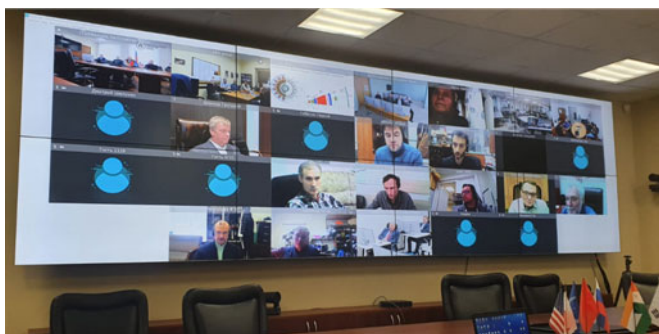


Рис. 4. Семинар по проектированию токамака TRT

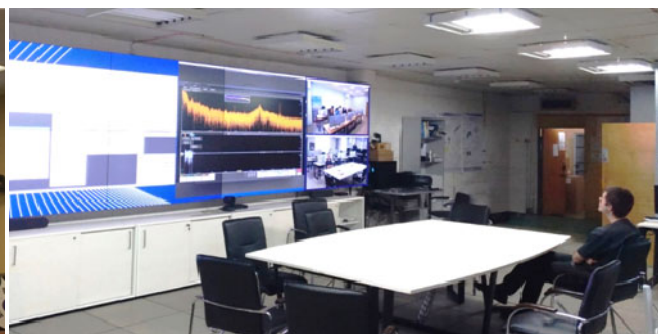


Рис. 5. Совместные исследования ИПФ, г. Нижний Новгород, и ИЯФ, г. Новосибирск

Дальнейшее развитие ИКП FusionSpace.RU позволит обеспечить сохранение знаний и компетенций внутри научного сообщества термоядерных исследований в Российской Федерации.

Авторы выражают признательность коллективу Частного учреждения «Проектный центр ИТЭР» и сотрудникам организаций-участниц ИКП — АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, ФГБНУ ИЯФ СО РАН, ФГБНУ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, АО НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, ФГУП РФЯЦ — ВНИИЭФ, ФГБНУ ИПФ РАН, принявшим участие в реализации проекта, создании узлов ИКП и внесшим свой вклад в организацию совместной деятельности в области исследований УТС на базе FusionSpace.Ru.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом с Госкорпорацией «Росатом» от 31.08.2022 № Н.4ф.241.09.22.1129 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в Российской Федерации. Этап 2022 года».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов О.И., Ларионов А.С., Лазарева С.Г., Миронова Е.Ю., Портоне С.С., Портнов Д.В., Семенов И.Б. — В сб.: XVIII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы». — Москва, Троицк: «Тривант», 2019, с. 55.
2. Ежова З.В., Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Миронов А.Ю., Звонарева А.А., Семенов О.И. — В сб.: XIX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы». — Москва, Троицк: «Тривант», 2021, с. 251.
3. Ларионов А.С., Портоне С.С., Семенов О.И., Миронов А.Ю., Миронова Е.Ю. — Там же, с. 253.
4. Tokunaga S., Moreau P., Signoret J., Imbeaux F., Tsitrone E., Loarer T., Salmon T., Hutter T., Giruzzi G., Joffrin E., De Tommasi G., Sartori F., Farthing J., Nakanishi H., Ozeki T., Asakura N., Sakamoto Y., Ohtsu H., Sugie Y., Suzuki S., Fukuda M., Nakano T., Sano R., Ishii Y., Clement-Lorenzo S., Nakajima N. Remote experiment with WEST from ITER Remote Experimentation Centre. — Fusion Engineering and Design, 2020, p. 111554; doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111554.
5. Suttrop W., Kinna D., Farthing J., Hemming O., How J., Schmidt V. Preprint Culham Science Centre EFDA-JET-CP(01)04-04. Padova, 2001. 16 p.
6. Hutter T., Ancher H., Bourdelle C., Caulier G., Colnel J., Corbel E., Fleury L., Imbeaux F., Justel T., Maini P., Moreau P., Salmon T., Signoret J., Signoret J., Tsitrone E. — Poster: 12th IAEA Technical Meeting on Control, Data Acquisition and Remote Participation for Fusion Research. Daejeon, South Korea, 2019.
7. McHarg B.B. — In: 15th IEEE/NPS Symposium Fusion Engineering. USA. — IEEE, 1993, vol. 1, p. 123—126; doi: 10.1109/FUSION.1989.102203.
8. Ablat G., Schissel D.P., Penaflo B.G., Wallace G. A remote control room at DIII-D. — Fusion Engineering and Design (Netherlands: Elsevier BV), 2008, vol. 83, Issues 2—3, p. 480—485; doi: 10.1016/j.fusengdes.2007.09.013.
9. Farthing J., Ozeki T., Clement Lorenzo S., Nakajima N., Sartori F., De Tommasi G., Manduchi G., Barbato P., Rigoni A., Vitale V., Giruzzi G., Mattei M., Mele A., Imbeaux F., Artaud J.-F., Robin F., Noe J., Joffrin E., Hynes A., Hemming O., Wheatley M., O'hira S., Ide S., Ishii Y., Matsukawa M., Kubo H., Totsuka T., Urano H., Naito O., Hayashi N., Miyata Y., Namekawa M., Wakasa A., Oshima T., Nakanishi H., Yamanaka K. Status of the ITER remote experimentation centre. — Fusion Engineering and Design (Netherlands: Elsevier BV), 2018, vol. 128, p. 158—162; doi: 10.1016/j.fusengdes.2018.02.004.
10. Semenov I., Abadie L., Kuzminov S., Larionov A., Lazareva S., Makijarvi P., Mironova E., Simroc S.K., Portone S., Stepanov D., Semenov O. — Poster: 12th IAEA Technical Meeting on Control, Data Acquisition and Remote Participation for Fusion Research. Daejeon, South Korea, 2019.

11. Coster D., de Witt Sh., Klampanos I., Plociennik M., Ikonomopoulos A., Imbeaux F., Cummings N., Owsiak M., Filipczak A., Bosak B., Konstantopoulos S., Strand P. — In: IEEE 17th International Conference on eScience (eScience). USA. — IEEE, 2021, p. 233—234; doi: 10.1109/eScience51609.2021.00037.



Сергей Сергеевич Портоне, начальник сектора; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
S.Portone@iterrf.ru



Екатерина Юрьевна Миронова, с.н.с.; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
E.Mironova@iterrf.ru



Олег Игоревич Семенов, главный специалист; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
O.Semenov@iterrf.ru



Злата Владиславовна Ежова, специалист сектора; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
Z.Ezhova@iterrf.ru



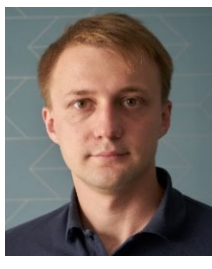
Евгений Владимирович Семенов, главный специалист; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
E.Semenov@iterrf.ru



Андрей Юрьевич Миронов, м.н.с.; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
A.Mironov@iterrf.ru



Алексей Сергеевич Ларионов, системный администратор; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
A.Larionov@iterrf.ru



Никита Васильевич Нагорный, н.с.; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
N.Nagornyy@iterrf.ru



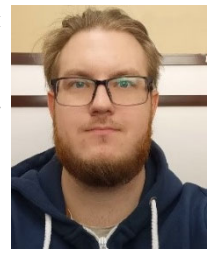
Анжела Александровна Звонарева, н.с.; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
A.Zvonareva@iterrf.ru



Левон Арменович Григорян, м.н.с. сектора; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
L.Grigorian@iterrf.ru



Денис Игоревич Гужев, м.н.с. сектора; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
D.Guzhev@iterrf.ru



Антон Игоревич Николаев, м.н.с. сектора; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
A.Nikolaev@iterrf.ru



Игорь Борисович Семенов, к.ф.-м.н., доцент, начальник отдела; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
I.Semenov@iterrf.ru



Анатолий Витальевич Красильников, д.ф.м.н., директор; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
A.Krasilnikov@iterrf.ru

Статья поступила в редакцию 29 августа 2022 г.
После доработки 29 сентября 2022 г.
Принята к публикации 5 октября 2022 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4, с. 34—44.