

УДК 004.771

## ОПЫТ РОССИИ В РАЗРАБОТКЕ И ТЕСТИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УДАЛЁННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ИТЭР

*О.И. Семенов<sup>1</sup>, Л.А. Лобес<sup>2</sup>, А.М. Потапов<sup>1</sup>, Д.Н. Степанов<sup>2</sup>, С.С. Портоне<sup>1</sup>, А.С. Ларионов<sup>1</sup>,  
Н.В. Нагорный<sup>1</sup>, Е.Ю. Миронова<sup>1</sup>, З.В. Ежова<sup>1</sup>, И.Б. Семенов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия

<sup>2</sup> ITER Organization, Cadarache, Saint-Paul-Lez-Durance, France

Термоядерный реактор ИТЭР строится во Франции вблизи атомного центра Кадараш совместно странами-участницами проекта — Россией, Евросоюзом, Китаем, Индией, Кореей, Японией и США. В рамках проекта планируются дистанционное научное участие в экспериментальной программе и доступ к данным из домашних агентств. Российский центр удалённого участия создаётся в г. Троицке в Российском домашнем агентстве ИТЭР (Частное учреждение «ИТЭР-Центр») и в настоящее время является наиболее продвинутым в плане доступной функциональности, а на его основе проводятся совместные с Международной организацией ИТЭР (МО ИТЭР) работы по отработке технологий и принципов дистанционного участия в эксперименте для других участников. В статье приведены результаты исследований протоколов, методов и каналов передачи данных через существующие сети и связанные с этим вопросы информационной безопасности, включая зонирование сетей. Описаны элементы доступа к системе сбора данных ИТЭР в режиме реального времени через шлюз системы управления установкой EPICS, протестированы различные инструменты для дистанционного участия, планируемые к использованию в рамках проекта ИТЭР, такие как совместное использование экранов и просмотр данных в реальном времени. По результатам работ МО ИТЭР были сформулированы требования для удалённого подключения партнёров к ресурсам ИТЭР.

**Ключевые слова:** удалённое участие, ИТЭР, EPICS, VPN, информационная безопасность.

## RUSSIAN EXPERIENCE IN DEVELOPMENT AND TESTING OF THE ELEMENTS OF REMOTE PARTICIPATION IN ITER EXPERIMENT

*O.I. Semenov<sup>1</sup>, L.A. Lobes<sup>2</sup>, A.M. Potapov<sup>1</sup>, D.N. Stepanov<sup>2</sup>, S.S. Portone<sup>1</sup>, A.S. Larionov<sup>1</sup>,  
N.V. Nagorny<sup>1</sup>, E.Yu. Mironova<sup>1</sup>, Z.V. Ezhova<sup>1</sup>, I.B. Semenov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia,

<sup>2</sup>ITER Organization, Cadarache, Saint-Paul-Lez-Durance, France

The ITER facility is being built in France next to the French nuclear center of Cadarache. The facility is being built jointly by the countries participating in the project - Russia, the European Union, China, India, Korea, Japan, and the USA. It is planned that participation in the experiments will be carried out from remote participation rooms located in the countries participating in the project. The Russian Center for Remote Participation is being created in Troitsk at the premises of the Russian Domestic Agency of ITER (Institution «Project Center ITER»). Currently, the center is the most advanced of all countries participating in the project in terms of available functionality; it is used together with ITER Organization for the development of technologies and principles of remote participation in the experiment, to be used later with other participants. The article presents the results of a study of protocols, methods and channels for data transmission through existing public networks as well as of the topic of IT network zoning in accordance with the requirements of cybersecurity. Elements of access to the ITER data handling system in real time through the EPICS control system gateway and the results of testing various interfaces to remote access to ITER data (screen sharing, online data browsing) are also described. Based on the results of the work, ITER Organization formulated requirements for remote connection of partners to the ITER resources.

**Key words:** remote participation, ITER, EPICS, VPN, information security.

DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-4-56-60

Международный проект ИТЭР реализуется при участии семи равноправных партнёров и более тридцати стран-участниц. Соглашение о строительстве и проведении исследований на установке ИТЭР предусматривает доступ к результатам экспериментов для всех участников проекта. В связи с этим в систему сбора данных установки закладывается возможность удалённого доступа и дистанционной обработки научных данных как после (оффлайн), так и в процессе (онлайн) проведения эксперимента. Такой подход требует инструментария удалённого участия в эксплуатации установки, совместного мониторинга. С 2018 г. Домашнее агентство Российской Федерации (RFDA) работает над прототипом Цен-

тра дистанционного участия в экспериментах ИТЭР (RF DA Remote Participation Centre — RPC) (рис. 1), в рамках которого изучается следующее:

- инфраструктура, идеология Центра удалённого участия в эксперименте, роли удалённых участников, технические средства для хранения и обработки данных;
- методы подключения к сетям ИТЭР, проблемы, риски и ограничения, применимость публичных сетей передачи данных;
- интерфейсы и сервисы для удалённого участия, разрабатываемые МО ИТЭР;
- границы, в которых удалённые участники могут участвовать в активности ИТЭР: возможность управления, наблюдения, доступа к данным, машинным интерфейсам, взаимодействие с сотрудниками, находящимися на площадке МО ИТЭР и в центральной пультной.



Рис. 1. RF RPC

Модель RF RPC была реализована для решения перечисленных задач, включая разработку и тестирование элементов диагностик, поставляемых Российской Федерацией для проекта ИТЭР.

В связи с тем, что установка ИТЭР является ядерным объектом, к его ИТ (Information Technology) инфраструктуре применяются требования и ограничения по информационной безопасности как к ядерному объекту на территории Франции. Вследствие этого сетевая инфраструктура зонирована согласно с требованиями стандарта информационной безопасности IEC 62645 [1]. Этот стандарт определяет три зоны по степени безопасности (S1, S2 и S3) (рис. 2). ИТЭР идёт дальше и вводит четвёртую зону:

- S1 — система обеспечения безопасности объекта;
- S2 — системы управления и блокировок (Plant Operation Zone — POZ);
- S3 — внешние по отношению к зоне POZ службы и сервисы (external to POZ — XPOZ);
- Зона ИТ — всё, что находится за пределами зоны S3, но внутри площадки ИТЭР.

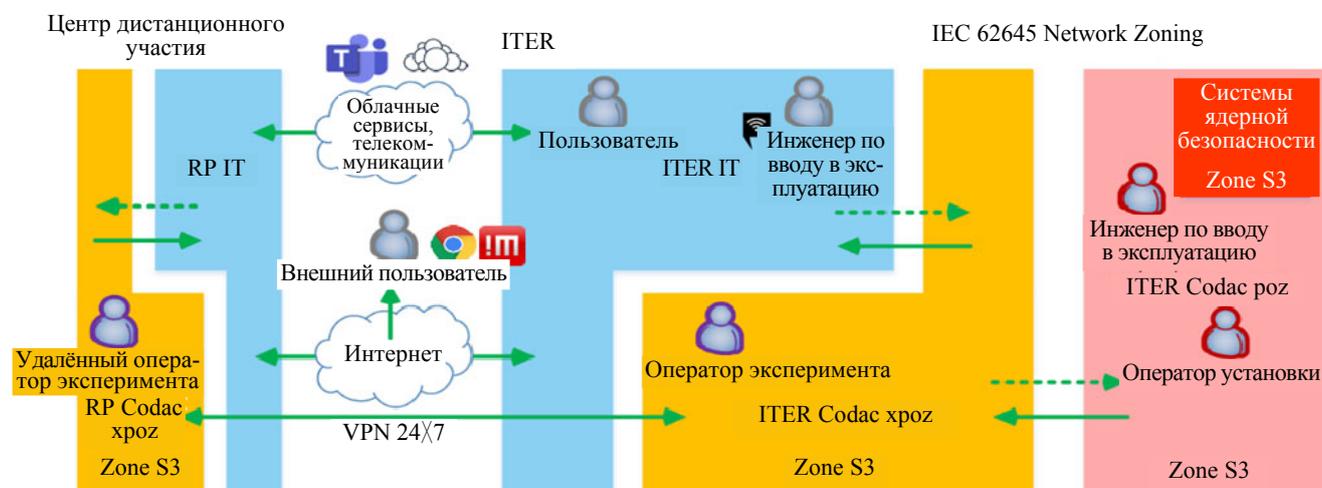


Рис. 2. Сетевое зонирование ИТЭР

Для выполнения требований IT-безопасности удалённых участников разместили в зоне XPOZ DMZ на стороне МО ИТЭР, организованной между зонами IT и S3, куда и были подключены созданные в рамках работы туннели [2]. С другой стороны, в Центре дистанционного участия была создана изолированная подсеть RP XPOZ, в которую терминируется данный туннель. Таким образом, на обоих концах сети был создан аналог зоны S3, который при этом не требует особой сертификации. Для подключения к инфраструктуре сбора данных ИТЭР были созданы два независимых туннеля L3 VPN через публичную точку обмена интернет-трафиком STOKHOLM GTT TER ONE и научную сеть GEANT.

Исследование латентности туннелей показало, что публичный туннель по общедоступным каналам связи имеет приблизительно ту же задержку, что и выделенный канал через научные сети. Задержка в обоих вариантах подключения составила 66—68 мс.

При ширине тестируемого канала 200 Мбит/с удалось достичь передачи стабильных 180 Мбит/с без потерь пакетов в рамках протокола негарантированной доставки (например, UDP). Протокол TCP-IP из-за своих особенностей [3—6], в частности, зависимости от TCP-окна, продемонстрировал эффект зависимости пропускной способности относительно латентности канала. В одном потоке TCP-IP между ИТЭР и RF RPC удалось достичь около 25 Мбит/с без кастомизации протокола, что демонстрирует необходимость обеспечения стабильности канала и (или) оптимизации сети как программными методами, так и использованием дополнительного оборудования. В экспериментах с кастомизацией канала МО ИТЭР удалось получить в рамках одного TCP-соединения стабильный поток данных до 400 Мбит/с в выделенном канале 1 Гбит/с с одним из партнёров. Переход на более низкий уровень VPN также является методом увеличения пропускной способности [7].

Другой метод улучшения ситуации с протоколом TCP-IP — использование многопоточных протоколов передачи данных. Эксперимент с множеством потоков между ИТЭР и RF RPC продемонстрировал применимость такого метода загрузки канала. В нашем случае оказалось достаточным около 20—30 потоков для загрузки 80—90% пропускной способности канала в целом.

В настоящее время МО ИТЭР сформулировала предварительные требования к каналу для внешних подключений [8].

С целью исследования возможности управления оборудованием был проведён тест, в котором удалённый оператор наблюдал и контролировал систему, в качестве которой была выбрана референсная диагностика нейтронных потоков DNFМ, на стороне МО ИТЭР. Параллельно был использован Skype for Business в качестве способа аудио- и видеокommunikации с представителями. Было проведено сравнение программного (терминал NX) и аппаратного (Teradici PCoIP® Remote) методов. В целом оба метода работали удовлетворительно, однако NX показал себя более простым решением. Такое решение может быть полезным во время приёма и ввода в эксплуатацию диагностических и технологических систем установки.

В результате работы было определено, что из-за специфики стандарта IEC 62645 [1] и обязательств по защите компьютерных сетей, принятых МО ИТЭР перед французским регулирующим органом (ASN), удалённое участие в экспериментальной программе ИТЭР будет организовано по принципу только наблюдение с возможностью взаимодействия через конкретных операторов внутри центральной пультавой с целью формирования заявок. Прямое управление чем-либо на площадке из центров удалённого участия возможно только на этапе приёма и ввода в эксплуатацию оборудования в весьма ограниченном виде и полностью исключено во время экспериментальной кампании. Передача данных от диагностических систем установки в центры удалённого участия для последующего их анализа и обратная передача результатов анализа изучаются в настоящее время.

Одними из основных задач Центра удалённого участия являются создание эффекта присутствия на площадке и обеспечение связи с центральной пультавой. Было показано, что решением данной задачи может быть применение терминалов NX (в нашем случае для экспериментов использовались решения NX NoMachine [9]), в которых формируются необходимые наборы экранов, как это реализовано на установке JET. Однако такое решение не даёт возможность настраивать под себя эти экраны. Кроме того, сложно предсказать набор экранов, который удовлетворил бы большинство участников эксперимента. Было найдено решение, позволившее передать функцию формирования экранов на сторону Центра удалённого участия.

Вся инфраструктура установки и сопровождающих её систем построена на единой системе сбора данных и управления ITER — CODAC (COntrol Data Access And Communications). Эта система физически объединяет более чем 180 различных подсистем и более 1 000 000 сигналов. Для достижения таких высоких результатов были разработаны набор стандартов Plant System Design Handbook [10] и комплект программного обеспечения под названием CODAC Core System, обеспечивающий обмен данными всех подсистем. Помимо обеспечения связи и интеграции, CODAC предоставляет ряд других услуг, необходимых для работы ИТЭР, включая централизованный контроль, управление и архивирование данных.

В основе данного программного решения лежит широко используемое программное обеспечение (SCADA — Supervisory Control And Data Acquisition) с открытым исходным кодом под названием EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) [11], которое также используется во многих других крупных научных проектах. В результате исследований было решено использовать гейтвей системы EPICS—EPICS Process Variable Gateway [12] в качестве шлюза для удалённого подключения участников к системе сбора данных ИТЭР. Так как все необходимые данные уже присутствуют в виде переменных EPICS на самой установке и они же используются в центральной пультовой (Main Control Room) для формирования человеко-машинных интерфейсов, то такое решение позволяет на стороне Центра удалённого участия полностью эмулировать центральную пультовую со всеми терминалами, кнопками, графиками и другими элементами с минимальными модификациями ПО терминалов или вообще без них. EPICS Process Variable Gateway позволяет установить в удалённых центрах терминалы, которые полностью равнозначны центральной пультовой, а также создавать свои собственные интерфейсы, которые не требуют административного утверждения со стороны МО ИТЭР. При гарантии односторонности такого гейтвея решаются вопросы, связанные с требованиями французского ядерного Регулятора и стандартов безопасности. Обеспечение таких гарантий сейчас находится в стадии проработки и согласования с Регулятором.

Для определения принципиальной возможности удалённого использования EPICS проводились специализированные тесты. Результаты тестирования оказались весьма обнадеживающими. При большом количестве PV (Process Variable) в системе управления и их частом обновлении задержка на стороне удалённого участника сравнима с задержкой, измеренной на стороне генерирующего сервера с разницей на задержку канала, что позволяет использовать EPICS для удалённого участия [13].

Текущая оценка сверху количества PV на один терминал 200 PV. Испытания показали [13], что до 2000 PV (8—10 терминалов — наиболее вероятный сценарий Центра удалённого участия) возможна работа без оптимизации каналов, протоколов и т.д. Работа с более 2000 PV требует оптимизации канала для получения нужного результата. Эксперимент также показал, что без оптимизации оператор не заметит краткосрочные задержки, что приемлемо, когда терминал имеет только функцию наблюдения.

Помимо прямого взаимодействия с МО ИТЭР, Российский центр удалённого участия сегодня используется для реальных экспериментов, отрабатываются различные сценарии будущего взаимодействия ИТЭР и аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области исследований УТС в России — ИКП FusionSpace.RU [14]. Был проведён ряд успешных дистанционных экспериментов на реакторе ИБР-2М в Лаборатории нейтронной физики им. Франка (Дубна, Россия) [15], а также на нейтронном генераторе в ТРИНИТИ (Троицк, Россия) для проверки некоторых элементов диагностики ИТЭР. Эксперименты доказали, что предложенный метод удобен, позволяет сократить издержки на организацию командировок к месту проведения эксперимента и обеспечить эффект полного присутствия на экспериментальном стенде или установке.

Работы выполнены по государственному контракту № Н.4а.241.19.21.1038 от 11.05.2021 и рабочему соглашению С45TD15FR от 25.07.2018 с Международной организацией ИТЭР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **International** Electrotechnical Commission, Nuclear Power Plants — Instrumentation and Control Systems — Requirements for Security Programmes for Computer-based Systems. IEC 62645.
2. **Stepanov D., Abadie L., Dequidt D., Kalsi S., Larionov A., Lobes L., Mocquard X., Nagorny N., Pons N., Semenov O., Simrock S., Zvonareva A.** Remote participation in ITER systems commissioning [Oral]. — In: 13th Technical Meeting on Plasma Control Systems, Data Management and Remote Experiments in Fusion Research. Culham, United Kingdom, 2021.
3. **Lepikhov K.** Large TC Windows. Available: <https://wiki.geant.org/display/public/EK/Large+TCP+Windows>.
4. **ESnet. Host Tuning.** Available: <https://fasterdata.es.net/host-tuning/>.

5. **Grigorik I.** Building Blocks of TCP. Available: <https://hpbn.co/building-blocks-of-tcp/>.
6. **Rogier B.** Measuring network performance: links between latency, throughput and packet loss. Available: <https://accedian.com/blog/measuring-network-performance-latency-throughput-packet-loss/>.
7. **Tokunaga S., Moreau P., Signoret J., Imbeaux F., Tsitron E., Loarer T., Salmon T., Giruzzi G., Joffrin E., De Tommasi G., Sartori F., Farthing J., Nakanish 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., the WEST Team.** Remote experiment with WEST from ITER remote experimentation centre-fusion engineering and design, Fusion Engineering and Design, May 2020, vol. 154, p. 111554.
8. **Степанов Д.Н., Лобес Л.А., Семенов О.И.** — В сб.: XIX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» — Москва, Троицк: «Троянт», 2021, с. 242—243.
9. **NoMachine.** Available: <https://www.nomachine.com/>.
10. **Jean-Yves Journeaux A.W.** Plant Control Design Handbook. ITER Technical Report, № ITR-20-009, 2020.
11. **About EPICS.** Available: <https://epics-controls.org/about-epics/>.
12. **Kenneth Evans J.** EPICS Gateway Users Guide. Available: <https://epics.anl.gov/EpicsDocumentation/ExtensionsManuals/Gateway/Gateway.html>.
13. **Lobes L., Lange R., Semenov O., Stepanov D.** Study on EPICS communication over long distance [Oral]. — In: 13th Technical Meeting on Plasma Control Systems, Data Management and Remote Experiments in Fusion Research. Culham, United Kingdom, 2021.
14. **Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Семенов О.И., Ежова З.В., Миронов А.Ю., Семенов Е.В., Ларионов А.С., Нагорный Н.В., Семенов И.Б., Звонарева А.А., Григорян Л.А.** — В сб.: XIX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы». — Москва, Троицк: «Троянт», 2021, с. 249—250.
15. **Обудовский С.Ю., Джурик А.С., Воробьев В.А., Качук Ю.А.** — В сб.: XVIII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы». — Москва, Троицк: «Троянт», 2019, с. 286—288.



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



Леонид Анатольевич Лобес, ITER Project Associate, Data, Connectivity and Software Section; ITER Organization, 13067 St Paul Lez Durance Cedex, France  
Lenid.Lobes@iter.org



Алексей Михайлович Потапов, м.н.с.; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия  
A.Potapov@iterrf.ru



Денис Николаевич Степанов, Computing Coordinating Engineer; ITER Organization, 13067 St Paul Lez Durance Cedex, France  
Denis.Stepanov@iter.org



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



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



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



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

Статья поступила в редакцию 29 июля 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. 56—60.