

Создание экономически эффективного и безопасного термоядерного реактора является одним из перспективных направлений развития энергетической инфраструктуры будущего. По своим характеристикам термоядерный реактор обеспечивает рекордные показатели в соотношении полученной энергии к массе исходного топлива (изотопы водорода), которое, кроме того, содержится в огромных количествах на Земле или может воспроизводиться непосредственно в реакторе. В ряду других ядерных энергетических технологий реактор на основе термоядерного синтеза более безопасен при эксплуатации, а побочные активированные продукты его работы минимизированы и поддаются более безопасному и дешевому контролю и захоронению. Термоядерная энергетика в перспективе способна решить проблему энергетического голода и стать одной из основ устойчивого развития Российской Федерации.

Успех создания термоядерного реактора на базе токамака в значительной мере зависит от решения проблемы обеспечения необходимого ресурса энергонапряженных компонентов, обращенных к плазме (КОП), которые в силу наиболее сложных условий эксплуатации в реакторе имеют ограниченный срок службы. Выбор оптимальных конструкционных и облицовочных материалов, а также оптимизация многослойной композиции на их основе, параметров охлаждения и режимов эксплуатации, позволяют существенно увеличить ресурс их работы, повысить безопасность и экономические показатели реактора.

Таким образом, разработка и внедрение инновационных конструкций и технологий энергонапряженных многослойных структур является одной из ключевых и актуальных задач для достижения перспективной цели создания безопасной и эффективной термоядерной энергетики и глобального лидерства Российской Федерации в отрасли.

Для проекта Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) разработаны, апробированы, квалифицированы и внедрены в производство уникальные конструкции и технологии изготовления КОП. В настоящий момент идет стадия изготовления поставочной партии КОП для сооружаемого во Франции самого большого в мире токамака. До начала производства компонентов пройден длинный путь от расчетного обоснования конструкции, поисковых экспериментов на

малых макетах, разработки и квалификации критических технологий изготовления до изготовления и испытаний полномасштабных прототипов КОП.

В 2020 году завершены изготовление и сдаточные испытания, а также осуществлена поставка на площадку сооружения реактора первого в своем роде полномасштабного прототипа центральной сборки дивертора (ЦСД) ИТЭР. ЦСД является одним из компонентов диверторного устройства токамака, отвечающего за утилизацию до 70 % энергии из плазмы, а также удаление продуктов термоядерной реакции и эрозии первой стенки путем их нейтрализации и откачки. Величина плотности поглощенной мощности в диверторном устройстве достигает колоссальных 20 МВт/м^2 в квазистационарных режимах. Для работы в данных условиях компоненты имеют защитную вольфрамовую облицовку и высокоинтенсивную систему охлаждения. Российская Федерация оказалась первой среди всех стран-участников, кто завершил испытания и осуществил поставку своей части компонентов для сборки полномасштабного прототипа диверторного устройства ИТЭР во Франции. Фотография изготовленного полномасштабного прототипа ЦСД представлена на рисунке 1.

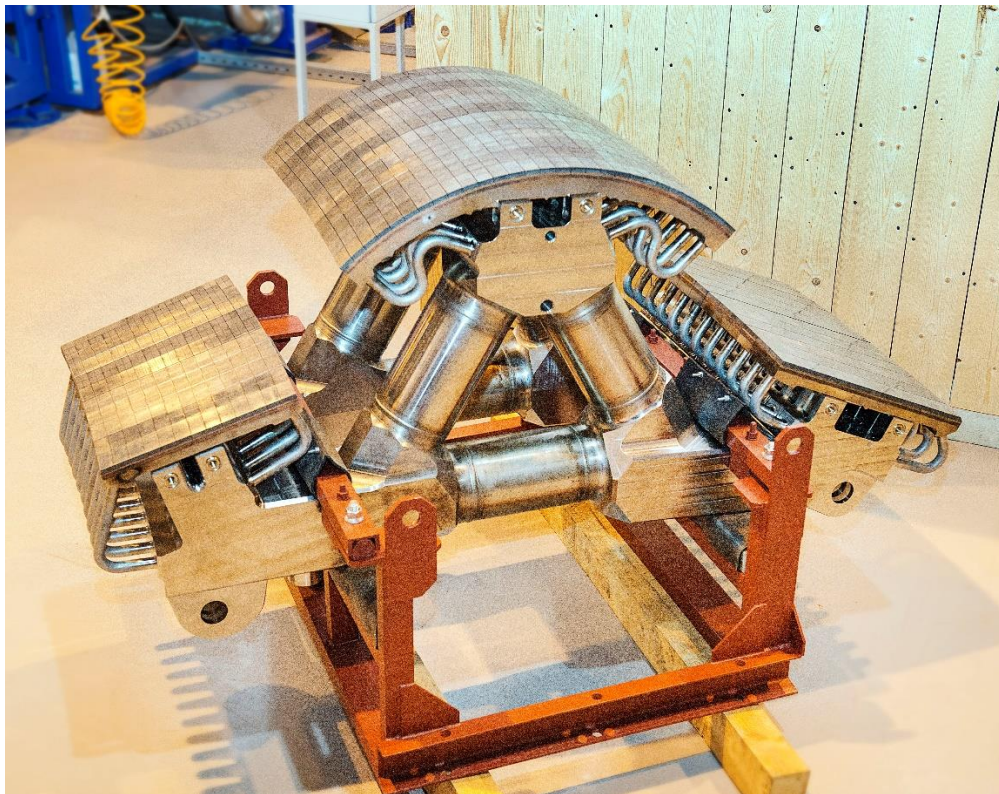


Рисунок 1 – Фотография полномасштабного прототипа ЦСД ИТЭР

В 2022 году завершены изготовление и сдаточные испытания первого в своем роде полномасштабного прототипа высоконагруженной панели первой стенки (ППС) ИТЭР. ППС представляют собой многослойные защитные панели с высокоинтенсивным охлаждением и размером в плане в среднем 1.5×1.5 метра, покрывающие внутренний объем вакуумной камеры токамака (более 600 м^2) и защищающие от воздействия плазмы стенки камеры и другие системы реактора, а также ограничивающие поступление примесей со стенки в плазму. Высоконагруженные ППС, поставляемые Российской Федерацией, составляют 40 % (или около 250 м^2) площади первой стенки ИТЭР и располагаются в наиболее ответственных областях вакуумной камеры, где пиковая тепловая нагрузка достигает $4,7 \text{ МВт/м}^2$.

Технологии высоконагруженных ППС, разработанные в Российской Федерации, показали лучшие результаты в длительных ресурсных термоциклических испытаниях, по сравнению с другими странами-участниками. Фотография изготовленного полномасштабного прототипа высоконагруженной ППС представлена на рисунке 2.

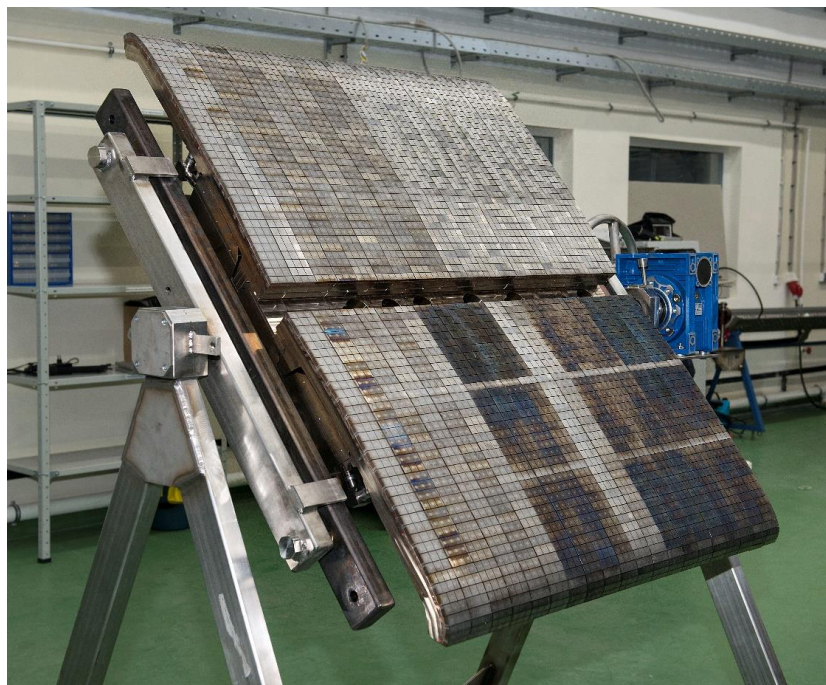


Рисунок 2 – Фотография полномасштабного прототипа ППС ИТЭР

На основе полученных в рамках международного проекта ИТЭР компетенций и отработанных решений разработаны инновационные конструкции и технологии

КОП для национального проекта Токамак с реакторными технологиями (ТРТ), а также проекта будущего демонстрационного реактора – термоядерного источника нейтронов (ДЕМО-ТИН). ТРТ проектируется в настоящий момент в рамках Федерального проекта №3 «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации» (ФП-3 КП РТТН). Одними из особенностей ТРТ являются высокая средняя плотность мощности тепловой нагрузки на первую стенку не менее $0,2 \text{ МВт/м}^2$ и пиковая нагрузка до 25 МВт/м^2 в диверторе, что обусловлено большой мощностью дополнительного нагрева плазмы до 40 МВт и относительной компактностью установки (площадь обращённой к плазме поверхности ПС около 80 м^2), а также квази-стационарный режим работы (не менее 100 с.) и использование жидко-литиевых внутрикамерных устройств. Конструкция КОП для проекта ТРТ представлена на рисунке 3.

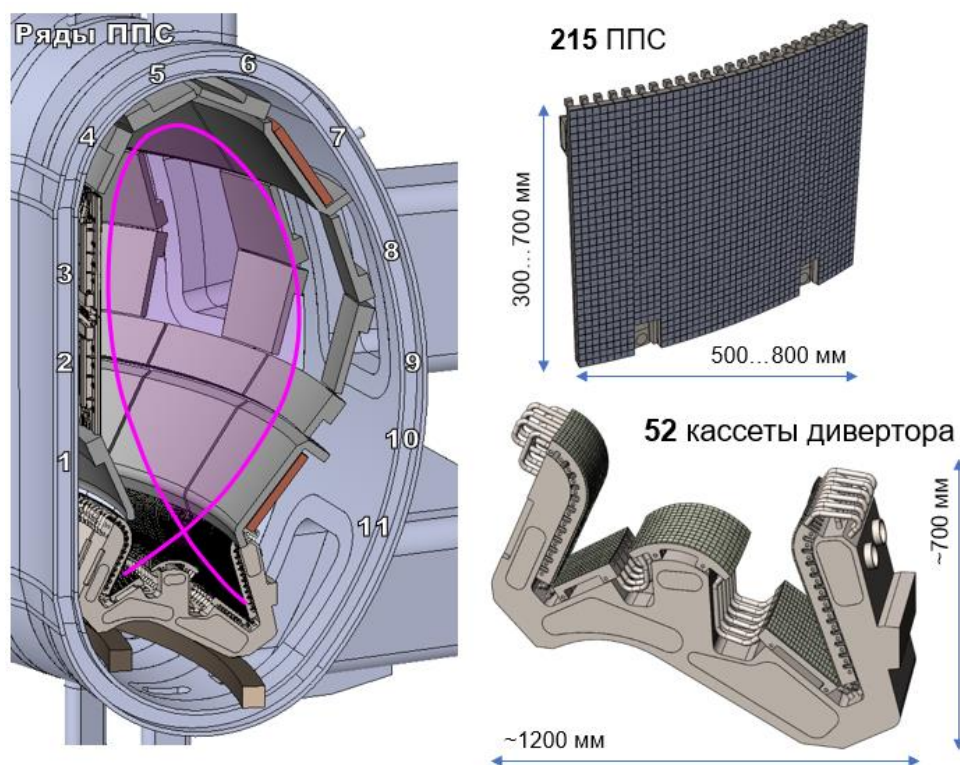


Рисунок 3 – Конструкция КОП для национального проекта ТРТ

При непосредственном участии членов коллектива разработаны, апробированы и внедрены в производство технологии получения и контроля надежных неразъемных

соединений разнородных материалов в конструкции КОП с вольфрамовой и бериллиевой защитной облицовкой (рисунок 4). Все разработанные технологии для использования в международном проекте ИТЭР успешно прошли квалификационные испытания и были внедрены при изготовлении полномасштабных прототипов, подтвердив надежность и повторяемость в достижении высокого уровня качества.

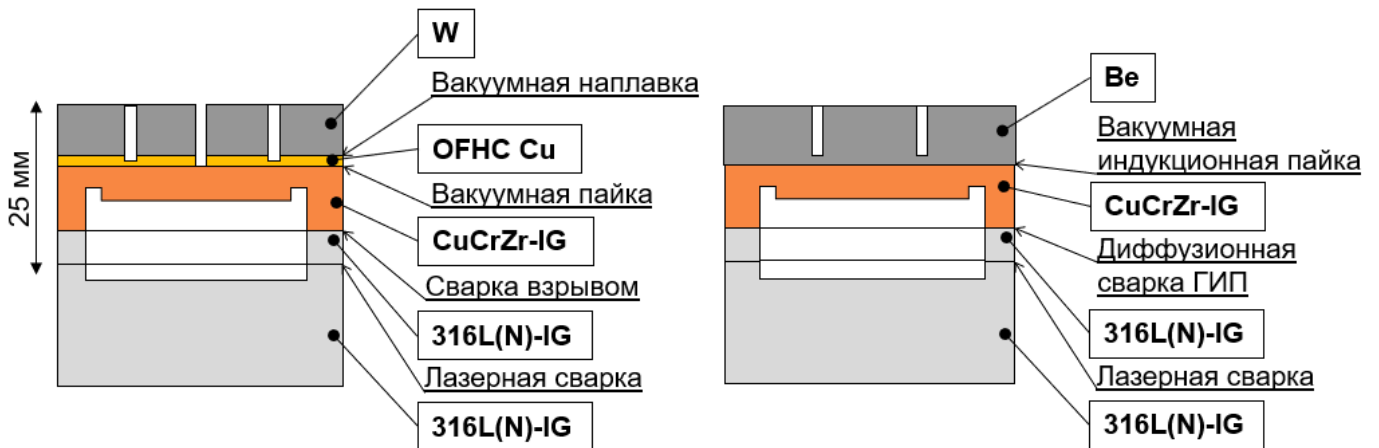


Рисунок 4 – Состав многослойных структур КОП с вольфрамовой и бериллиевой защитной облицовкой и используемые технологии соединения материалов

В частности, технология вакуумной индукционной пайки бериллиевой облицовки позволяет получать термостойкое соединение с высокой усталостной прочностью, которое превосходит по надежности и повторяемости результата альтернативные технологии присоединения бериллиевой облицовки, используемые специалистами других стран в проекте ИТЭР, что подтверждается опубликованными результатами. Изготовленные по данной технологии изделия продемонстрировали достижение беспрецедентного ресурса при термоциклических испытаниях мощными тепловыми потоками (30000 циклов нагрев-охлаждение при $4,7 \text{ МВт/м}^2$ плотности поглощенной мощности). По результатам данных испытаний не произошло критических ухудшений качества паяного соединения и критичных повреждений поверхности (оплавление, выкрашивание и пр.), а также и аварий в виде потери герметичности канала охлаждения. Внешний вид поверхности бериллиевых плиток после 30000 циклов представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Поверхность бериллиевых плиток после 30000 циклов при $4,7 \text{ МВт/м}^2$

Технология индукционной пайки, а также метод производства КОП с бериллиевой облицовкой защищены патентами на изобретение. Используемая уникальная специальная оснастка и приспособления защищены патентами на полезную модель. Все результаты интеллектуальной деятельности внедрены в производство, что подтверждено актами о внедрении. В АО «НИИЭФА» создан участок вакуумной индукционной пайки облицовки, основанный на разработанных собственными силами промышленных вакуумных индукционных печах (рисунок 6).

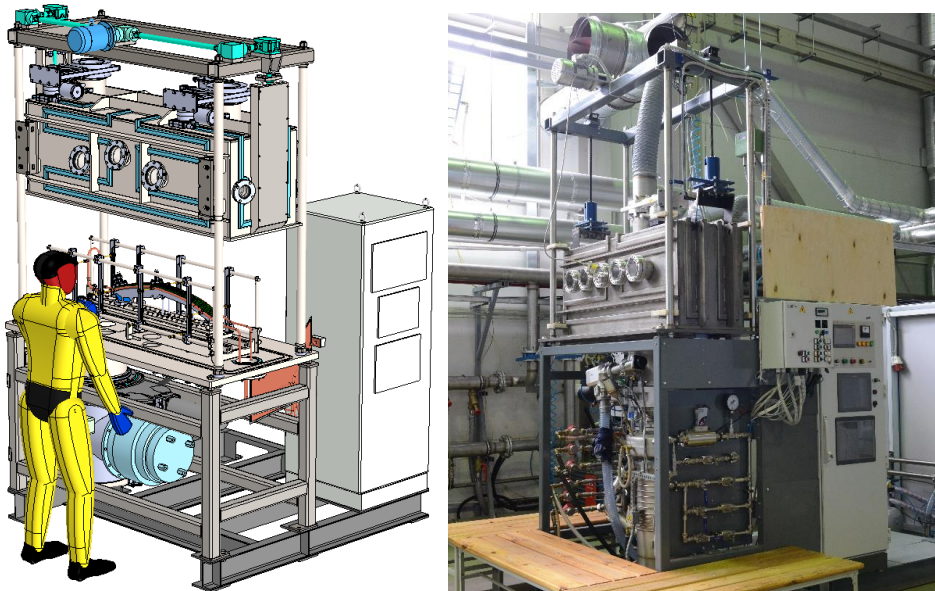


Рисунок 6 – Конструкция разработанной вакуумной индукционной печи (слева) и фотография первой изготовленной опытной печи (справа)

Также разработана, оптимизирована и внедрена в производство технология получения и контроля вакуум-плотных биметаллических (бронза/сталь) соединений методом диффузионной сварки горячим изостатическим прессованием (ГИП).

Полученные соединения работают в условиях сверхвысокого вакуума при термоциклировании и охлаждении водой под давлением и имеют очень высокую герметичность. При испытаниях прототипов ЦСД и ППС, опрессованных изнутри горячим (250 °С) гелием давлением 40 атмосфер, продемонстрирован рекордно низкий уровень натекания в вакуум: $\leq 10^{-10}$ Па \times м³/с при ~ 200 погонных метров сварных швов (в том числе биметаллических). Разработанные для данной технологии методы подготовки изделий и специальная оснастка оформлены как ноу-хау и защищены режимом коммерческой тайны. Реализованные при отработке технологии предложения по улучшению (ППУ) позволили повысить производительность и достичь экономического эффекта около 10 млн. руб. в рамках партии биметаллических заготовок. Изготовленные по разработанной технологии изделия успешно прошли все квалификационные испытания и исследования неразрушающими и разрушающими методами контроля и подтвердили достижение высокого уровня качества.

Также разработана и внедрена технология высокотемпературной вакуумной пайки в печах сопротивления со сложными тепловым циклом, сочетающим пайку облицовки и термообработку на восстановление свойств бронзы. Разработаны и внедрены технологии сварки взрывом разнородных материалов и технология лазерной сварки прочных вакуум-плотных швов сталь/сталь толщиной от 5 до 12 мм. Качество сварных швов полностью соответствуют уровню В по стандарту EN ISO 13919-1. Для проведения неразрушающего контроля сварных и паяных соединений в многослойных структурах изделий сложной геометрической формы созданы оборудование и методики роботизированной ультразвуковой томографии.

Для выполнения имитационных тепловых испытаний изделий и макетов, повторяющих стационарные и квазистационарные условия теплового воздействия в термоядерном реакторе, в АО «НИИЭФА» созданы стенды и методики тепловых испытаний. Для создания поверхностной тепловой нагрузки используется мощная электронно-лучевая пушка, генерирующая пучок ускоренных электронов и позволяющая в режиме сканирования заданной формы растра нагружать поверхность объекта испытаний.

В целом в рамках международного проекта ИТЭР получены уникальный опыт и компетенции в области разработки конструкции, разработаны и освоены уникальные технологии изготовления, методики контроля и испытаний, созданы производственная и экспериментальная стендовые базы, налажена кооперация среди ключевых участников производственного процесса. Перечисленные наработки и достижения являются надёжной базой для старта и реализации будущих национальных проектов в области разработки и создания обращенных к плазме компонентов для установок управляемого термоядерного синтеза.

Изготовленные макетные образцы перспективных КОП для национальных проектов ТРТ и ТИН показали хорошие результаты по итогам проведенных испытаний. Например, при испытаниях макета перспективной конструкции вертикальной мишени дивертора достигнуты рекордные значения плотности поглощенной мощности до $35,6 \text{ МВт/м}^2$ при термоциклических испытаниях до разрушения, а также 1000 циклов нагрева-охлаждения при постоянной мощности 25 МВт/м^2 (рисунок 7).

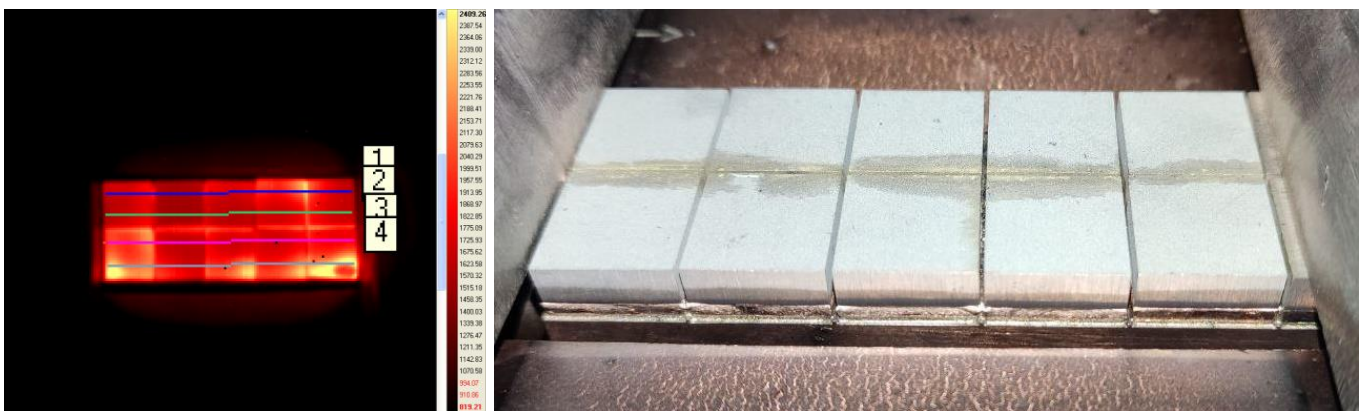


Рисунок 7 – Тепловизионное изображение поверхности облицовки (слева) и фотография облицовочных плиток (справа) после 1000 циклов при 25 МВт/м^2

Испытания указанного макета мишени дивертора были остановлены по критерию локального перегрева облицовки, но не произошло ни одного критического повреждения в виде потери герметичности канала охлаждения или потери облицовочной плитки, что гарантирует надежность при возможных нештатных процессах в реакторе. Необходимо отметить, что активно используемая другими странами альтернативная конструкция типа «вольфрамовый моноблок на бронзовой трубке» демонстрирует похожие результаты по воспринимаемым нагрузкам, но ресурсные испытания завершаются, как правило, нарушением герметичности канала

охлаждения (прорыв трубки). Подобная авария на термоядерном реакторе может привести к длительной остановке реактора и крайне дорогостоящему ремонту.

Оригинальные концептуальные идеи, заложенные в разработанные конструкции и технологии, неоднократно представлялись к обсуждению на научно-технических конференциях и заседаниях секций отраслевого научно-технического совета. Имеется более 10 статей, опубликованных в отечественных и зарубежных рецензируемых научных журналах. Разработанные для проекта токамака ТРТ конструкции оформлены в виде ноу-хау и защищены режимом коммерческой тайны. Разработанные технологии и методы производства защищены патентами на изобретение и полезные модели, оформлены как ноу-хау и защищены режимом коммерческой тайны. По тематике разработки получено и внедрено 2 изобретения, 6 полезных моделей, 7 ноу-хау.

Разработанные в АО «НИИЭФА» конструкции и технологии демонстрируют рекордную надежность и повышенный ресурс эксплуатации изделий. На текущий момент еще не определены окончательные параметры эксплуатации будущего энергоэффективного термоядерного реактора, но для оценки в масштабах реактора ИТЭР, экономический эффект, полученный в результате реализации предложенных в работах авторов мероприятий, может достигать более 650 млн. рублей ежегодно, при этом уровень эффекта определяется масштабом внедрения разработок. Например, представленные значения достигаются за счет достижения двухкратного ресурса эксплуатации первой стенки, обусловленного применением разработанных технологий. В свою очередь повышение надежности за счет уменьшения вероятности критических аварий, в виде протечки теплоносителя в области диверторного устройства в камеру, может позволить еще более увеличить экономический эффект (зависит от условий эксплуатации реактора).

Разработанные АО «НИИЭФА» инновационные конструкции и технологии энергонапряженных многослойных структур позволяют решить одну из ключевых задач обеспечения необходимого ресурса КОП термоядерного реактора и приблизиться к достижению перспективной цели создания безопасной и эффективной термоядерной энергетики, глобального лидерства и независимости Российской Федерации в отрасли.