

УДК 537.312.62:621.318.3:621.039.6

НЕОБХОДИМОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Д.П. Иванов¹, Б.Н. Колбасов¹, С.А. Лелехов¹, И.О. Анашкин¹, П.П. Хвостенко¹, П.Д. Вэн²,
А. Нисимура³, Ё.К. О⁴, В.Дж. Пан², С. Прадхан⁵, Ю.Т. Сон², А.Н. Шарма⁵

¹ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

² Институт физики плазмы Китайской академии наук, Хэфэй, Аньхой, Китай

³ Национальный институт термоядерных наук, Токи, Гифу, Япония

⁴ Национальный термоядерный исследовательский институт, Тэджон, Республика Корея

⁵ Институт исследований плазмы, Гандинагар, Гуджарат, Индия

Сверхпроводящие магниты (СМ) для термоядерных установок последних поколений, как правило, имеют принудительное охлаждение, позволяющее сделать надёжную изоляцию катушек, применяя технологию «вакуумирование—пропитка под давлением» (ВПД). Для СМ этого типа характерно большое количество гелиевых, токовых и диагностических коммуникаций вокруг магнита. При быстрых изменениях тока на них наводится высокое напряжение. Эти коммуникации расположены в вакууме криостата, который обеспечивает их изоляцию. Однако вакуум может быть нарушен, и тогда одновременно теряются его тепло- и электроизоляционные свойства. При этом магнит переходит в нормальное состояние, включается защитный вывод тока при высоком напряжении, которое вызывает пробой, переходящий в электрическую дугу. Пробой также может произойти, когда нарушение вакуума сопровождается переходом СМ в нормальное состояние по иной причине или когда напряжение на выводах магнита токамака наводится при получении плазмы, управлении её равновесием и формой, росте или срыве тока в ней. Подобные аварии произошли в шести СМ токамаков с принудительным охлаждением 17 раз. Причём все пробои начинались на коммуникациях, изоляция которых делалась обмоткой изоляционными лентами разных типов, но без применения технологии ВПД, используемой лишь в катушках. Столь многочисленные аварии показывают, что на всех внутренних коммуникациях СМ нужна такая же надёжная изоляция, как на самих катушках. Для этого над ними должны быть установлены вакуумно-плотные заземлённые чехлы из нержавеющей стали с зазором, заполненным твёрдым изоляционным материалом, например, по технологии ВПД или замёрзшим азотом. Это позволит сделать изоляцию внутренних коммуникаций СМ надёжной и не зависящей от условий в криостате, а также облегчит и ускорит её испытания. Кроме того, чехлы исключат течи гелия в криостат, создавая второй вакуумно-плотный барьер, позволяющий искать и устранять течи гелия на собранном магните, что значительно увеличит надёжность магнитной системы и позволит избежать необходимости испытаний всех катушек до сборки.

Ключевые слова: сверхпроводящий магнит, надёжность, термоядерная установка, принудительное охлаждение, электрическая изоляция.

NECESSITY OF RELIABILITY ENHANCEMENT FOR FORCED COOLED SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEMS

D.P. Ivanov¹, B.N. Kolbasov¹, S.A. Lelekhov¹, I.O. Anashkin¹, P.P. Khvostenko¹, P.D. Weng², A. Nishimura³,
Y.-K. Oh⁴, W.J. Pan², S. Pradhan⁵, Yu.T. Song², A.N. Sharma⁵

¹ NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

² Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui, China

³ National Institute of Fusion Sciences, Toki, Gifu, Japan

⁴ National Fusion Research Institute, Daejeon, Republic of Korea

⁵ Institute for Plasma Research, Gandhinagar, Gujarat, India

The latest superconducting magnets (SM) for fusion are generally forced-cooled. This allows to get a reliable magnet coil insulation using "vacuum — pressure impregnation" (VPI) technology. The SM of this type are surrounded with many cryogenic, electric and diagnostic communications. A high voltage is induced on them at fast current variations. They have a good insulation being placed in cryostat vacuum. However in the case of vacuum loss the heat-insulating and electrical insulating performances of the cryostat medium are being lost simultaneously. It results in SM transition into normal state, fast protective current dump at high voltage, breakdown and arc. The same can occur if vacuum loss would accompany SM transition into normal state by any other reason, or when high voltage on magnet leads is induced by plasma initiation or controlling as well as by plasma current rise or disruption. So far 17 such accidents took place in six forced cooled SM systems of tokamaks. All these breakdowns invariably began at the electrical leads, feeders and cryogenic or sensor lines, which always were insulated by simple wrapping with the insulation tapes of different type, but not using VPI technology, as it was for coils. These accidents have shown that to ensure proper reliability of the whole magnet system, the electrical strength of insulation of all the magnet communications must be enhanced to the same level, as on the coils. Thereto vacuum-tight grounded stainless steel casings with a gap filled with a solid insulation, e.g. using VPI technology or frozen nitrogen, must be placed over all the inner SM communications. Application of such casings is the best, if not the only, way to get reliable insulation of inner SM communications, independent on conditions in the cryostat as well as easily and fast testable. At the same time the casings practically exclude helium leaks into cryostat, providing the second vacuum tight barrier, admissible of He leaks detection and removing since their surface has no insulation. Thus they increase magnet reliability up to the level allowing avoidance of all the coil tests before assembly.

Key Words: superconducting magnet, reliability, fusion facility, forced cooling, electrical insulation.

ВВЕДЕНИЕ

Надёжная изоляция магнитных катушек благодаря возможности использования технологии ВПД является несомненным достоинством сверхпроводящих магнитов с принудительным охлаждением. Именно это было основной причиной того, что первый токамак со сверхпроводящей обмоткой Т-7 имел принудительное охлаждение. Его проектирование и подготовка к сооружению начались в 1968 г. Тороидальный магнит с большим радиусом $R = 1,2$ м, малым радиусом $a = 0,4$ м и индукцией магнитного поля на оси плазменного шнура $B_0 = 2,5$ Тл прошёл испытания в 1978 г. и работал в ИАЭ им. И.В. Курчатова в Москве до 1987 г. Затем после переделки в токамак НТ-7 эта установка с 1994 г. успешно работает в Институте физики плазмы Китайской академии наук в г. Хэфэй.

Среди токамаков с СМ второго поколения, построенных в 1980-х годах, только токамак Т-15 имел принудительное охлаждение. Это был первый токамак с большим тороидальным магнитом ($R = 2,5$ м, $a = 1,12$ м), использующим Nb_3Sn -шину, намотанную после отжига. Он был сооружён в ИАЭ им. И.В. Курчатова в 1978—1988 гг. и достиг проектной индукции магнитного поля на оси плазменного шнура $B_0 = 3,6$ Тл в 1991 г., однако после нескольких коротких экспериментальных кампаний с плазмой при токе до 1 МА в 1995 г. он был «заморожен» из-за прекращения финансирования. СМ двух других токамаков этого поколения TORE SUPRA и TRIAM-1M так же, как и основная винтовая обмотка японского стелларатора LHD (Large Helical Device), имели погружное охлаждение. Достоинствами этих магнитов были высокие эффективность охлаждения и степень стабилизации, но в начале эксплуатации токамака TORE SUPRA, несмотря на проведённые перед сборкой испытания всех катушек, в одной из них возникло межвитковое замыкание. После замены неисправной катушки установка достигла проектной индукции магнитного поля $B_0 = 4$ Тл и с тех пор работает весьма надёжно [1].

В конце 1980-х годов была разработана концепция принудительно охлаждаемого кабеля, названного «кабель в оболочке», которая казалась весьма привлекательной и была принята для международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР несмотря на то, что опыт её использования к тому времени был весьма ограничен. Такой кабель был применён в катушке компании «Вестингауз Электрик», испытанной в рамках проекта LCT (Large Coil Task) Международного энергетического агентства на установке IFSMTF (International Fusion Superconducting Magnet Test Facility) в Ок-Ридже, США, катушке DPC (Double-Pancake Coil), изготовленной в Массачусетском технологическом институте и прошедшей испытания в рамках эксперимента DPC (Demonstration Poloidal Coil) в Нака, Япония, а также для внутренней обмотки гибридного магнита на 45 Тл в Лаборатории сильных магнитных полей во Флориде, США. Эти испытания выявили серьёзные проблемы: высокую резистивность и деградацию ниобий-оловянного кабеля, ограничения скорости роста тока в нём и др. Кабель в оболочке предполагалось использовать и в американском проекте TPX (Tokamak Physics Experiment), осуществление которого началось в 1990 г. На нём планировалась проверка технологических решений, предлагавшихся для ИТЭР. Однако в 1995 г. этот проект был закрыт из-за переброски бюджета на инерционный синтез и мощный лазер. Тем не менее он оказал сильное влияние на выбор типа магнита и кабеля, а также других решений в азиатских проектах: в китайском токамаке EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak), южнокорейском токамаке KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research), индийском токамаке SST-1 (Superconducting Steady-State Tokamak), а также германском стеллараторе W-7X.

Учитывая сказанное, а также неприятность, которая произошла на токамаке TORE SUPRA, для всех токамаков третьего поколения была принята концепция СМ с принудительным охлаждением и кабелем в оболочке.

Опыт работы показал, что действительно во всех СМ с принудительным охлаждением никогда не было проблем с изоляцией магнитных катушек. Однако встретились другие трудности, снижающие надёжность этих магнитов, о которых пойдёт речь.

Мы рассматриваем в этой статье аварии, которые произошли при работе реальных установок или при испытаниях отдельных сверхпроводящих катушек, но не специальные исследования и эксперименты с должным набором диагностических средств. Поэтому база данных для анализа аварийных ситуаций в СМ и их интерпретации весьма ограничена, и выводы можно делать только на основе рассмотрения нескольких сходных событий на разных установках.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ СМ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Для уменьшения гидравлического сопротивления и увеличения эффективности охлаждения обмотки СМ с принудительным охлаждением должны иметь много параллельных охлаждающих каналов, число которых значительно превышает количество параллельных ветвей тока в катушках. Многочисленные выводы и коллекторы этих каналов, а также выводы электрического тока из катушек и фидеры (сверхпроводящие кабели, соединяющие токовые выводы катушек с холодными концами вводов тока в криостат от тёплых шин (далее «токовводов»)) расположены в вакууме внутри криостата. При быстром изменении тока все эти коммуникации оказываются под высоким напряжением. Поэтому гелиевые выводы должны быть отделены от заземлённых коллекторов криогенного теплоносителя и рефрижератора большим количеством проходных изоляционных разъемов (далее «изоляторов»).

В начале разработки СМ с принудительным охлаждением для токамаков существовало мнение, что внешние поверхности электрических, криогенных и диагностических коммуникаций вообще не нуждаются в изоляции, так как находятся в вакууме криостата, который является прекрасным изолятором, а без него магнит работать не может. Поэтому все выводы тока и гелия на катушках токамака Т-15 были без изоляции. Однако опыт работы показал, что возможность потери вакуума, когда в магнит уже введён ток, нельзя игнорировать. Впервые эта проблема встретилась и была осознана при испытаниях катушек токамака Т-15 в 1983 г., когда потеря вакуума происходила неоднократно по разным причинам (механические возмущения, деформация выводов от пондеромоторных сил и скачков давления при быстром выводе тока, десорбция газа с холодных поверхностей при остановке рефрижератора или нарушениях его режима или нагреве фидеров при переходе в нормальное состояние и т.д.). В нескольких случаях это привело к квенчу (переходу катушки из сверхпроводящего в нормальное состояние). Иногда потеря вакуума сопровождалась квенчу, когда он происходил из-за достижения критического тока катушки, роста давления в гелиевых коммуникациях, поломки изоляторов, механической нагрузки на выводы, встряски и других возмущений.

Квенч всегда сопровождался быстрым защитным выводом тока при напряжении $V \geq 1$ кВ. В шести случаях из-за потери вакуума это вызвало пробой и возникновение электрической дуги с серьёзными повреждениями [2]. Пришлось срочно (поскольку испытания катушек задерживали сборку установки) искать и пробовать способы изоляции поверхности всех выводов и их соединений. После первых двух пробоев на голых выводах проектант токамака Т-15 НИИЭФА им. Д.В. Ефремова срочно провёл пашеновские испытания (определение напряжения пробоя на изолированных образцах при разном давлении в криостате). Для предотвращения пробоев было предложено покрыть (обмотать) поверхность всех электрических, криогенных и диагностических коммуникаций несколькими слоями тефлоновой или композитной стекловолоконной и термоусадочной ленты. Такая изоляция выдерживала на образцах до 8 кВ. Однако на реальных катушках она оказалась недостаточной. Три пробоя произошли с промежуточными типами изоляции, выполненными до получения рекомендаций проектанта. Однако и после применения изоляции, выбранной на основе пашеновских испытаний на образцах, пробой при потере вакуума продолжались.

Один из них произошёл на катушке при напряжении всего 1 кВ, по-видимому, из-за десорбции замороженного газа. Два других произошли на собранной установке из-за неполадок в схеме системы питания и ошибки в схеме и управлении, приведших к перенапряжению до 5—8 кВ (по оценке, а не по измерению). Описание аварий на токамаке Т-15 приводится в статьях [2—6].

Ввиду того, что времени для поиска улучшенной изоляции не было, для предотвращения пробоев пришлось пойти на снижение напряжения защитного вывода тока из магнита с ± 1 кВ до ± 250 В за счёт увеличения времени вывода тока и допущения более высокой температуры «горячего пятна» (места начала перехода СМ в нормальное состояние) до 160 К. Впоследствии анализ изменения во времени температуры гелия на выходе из катушки, в которой возникал квенч, подтвердил допустимость такого замедления скорости вывода тока.

Аналогичная изоляция вводов и фидеров электрического тока по упрощённой технологии (обмоткой изоляционной лентой разных типов с небольшими изменениями) была применена на других СМ токамаков, сооружённых в конце 1980-х годов. Поэтому там встретились те же проблемы.

Один пробой произошёл на выводе диагностики при испытании одной из американских катушек в рамках программы LCT [7]. Хотя эта катушка была погружной, выводы диагностики из неё проходили через вакуум общего криостата так же, как в СМ с принудительным охлаждением. Поскольку пробой произошёл именно на этом участке, не типичном для погружных магнитов, мы относим этот случай к авариям на СМ с принудительным охлаждением. Исследование поведения изоляции вводов при аварийных ситуациях не было включено в программу этих многосторонних испытаний, так как его важность в то время ещё не была осознана.

Наиболее опасная и разрушительная авария произошла на токамаке HT-7 при его первых испытаниях в Китае в 1994 г. Пробой был инициирован несвоевременно распознанным квенчем (автоматическая система детектирования нормальной фазы и защитного вывода тока ещё не была готова к началу испытаний, и переход магнита в нормальное состояние детектировался визуально). После поднятия тока в магните до 5,3 кА (наивысший ток, когда-либо достигнутый в этом магните) вакуум в криостате стал падать. Это отвлекло внимание от наблюдения за детектором нормальной фазы и вызвало задержку ручного включения защиты. В результате после её включения произошёл пробой и образовалась электрическая дуга между токовыми вводами, находящимися в боксе, который имел общее с криостатом вакуумное пространство, хотя и находился на расстоянии 3 м от криостата. Дуга прожгла дыры в бачках для жидкого гелия на холодных концах тоководов, и около 50 л жидкого гелия вылилось в бокс тоководов. Видимо, испарение и нагрев гелия приняли на себя значительную часть энергии дуги, и это предотвратило повреждение магнита, хотя бокс тоководов был разрушен полностью.

АВАРИИ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТАХ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Аналогичная технология, использующая простую многослойную обмотку изоляционной лентой с некоторыми не принципиальными изменениями (каптон вместо тефлона, новые типы смол), применялась для изоляции вводов и фидеров СМ с принудительным охлаждением третьего поколения в установках, которые недавно начали эксплуатироваться (EAST, KSTAR) или всё ещё сооружаются (SST-1, W-7X).

К началу сооружения этих установок требования к изоляции вводов и фидеров СМ с принудительным охлаждением и к улучшению методов её испытаний уже были очевидны на основании десяти аварий на предшествующих СМ. Однако эти аварии рассматривались как случайные явления, и проектанты продолжали ориентироваться на упрощённую технологию изоляции выводов и фидеров и на те же методы её испытаний, как и раньше.

Эта проблема обсуждалась на 4-м заседании технического комитета МАГАТЭ по стационарной работе термоядерных установок с магнитным удержанием в Ахмедабаде, Индия, в 2005 г. На этом заседании было обращено внимание на недостаточность проведения испытаний изоляции отводов СМ только в хорошем вакууме и на необходимость, по крайней мере, испытаний Пашена. В качестве более надёжного решения предлагалось повысить электрическую прочность изоляции вводов и фидеров до того же уровня, который всегда обеспечивался для изоляции самих катушек, используя чехлы из нержавеющей стали, заполненные твёрдым изоляционным материалом с применением технологии ВПД [8].

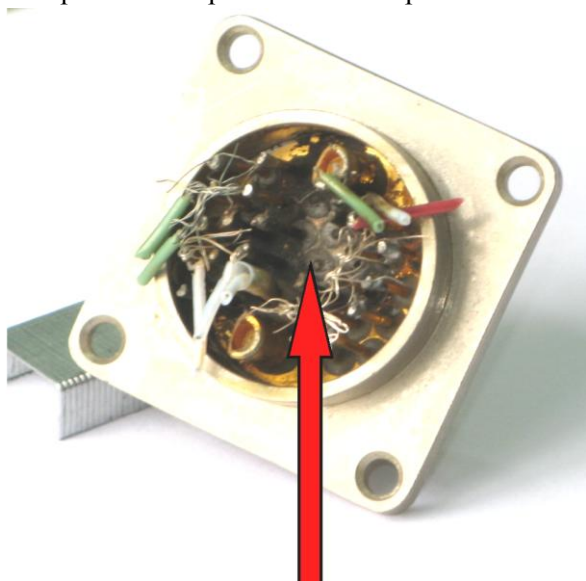
Однако в то время токамак SST-1 был уже собран, а узлы других токамаков третьего поколения начали изготавливаться. Поэтому руководители проектов опасались, что изменения конструкции и технологии изоляции чреваты большой задержкой выполнения программы сооружения установок. На стеллараторе W-7X к тому времени уже начались пашеновские испытания катушек. Следует отметить, что впоследствии они потребовали гораздо больше времени, чем если бы была применена усовершенствованная изоляция (технология ВПД в чехле) и не потребовались бы многократные повторения испытаний некоторых катушек и, тем более, испытания более 200 окончательных соединений после сборки, способ проведения которых, насколько нам известно, до сих пор не определён и, возможно, будет таким же, как на всех других больших термоядерных установках: 15 кВ постоянного напряжения только в хорошем вакууме, т.е. без гарантий от пробоя при нарушении вакуума.

В корейском токамаке KSTAR электрический пробой произошёл при испытаниях прототипной катушки тороидального поля не из-за неадекватной изоляции, а из-за недостаточной прочности опоры фидеров. При токе 33,5 кА (95% от проектного) одна из сверхпроводящих шин погнулась, коснулась дру-

гой шины и повредила её охлаждающий канал около соединения этой шины с выводом тока из катушки. Образовавшаяся дуга расплавила этот токовый вывод и его соединение с фидером настолько сильно, что ввод тока в катушку при последующих испытаниях оказался невозможным.

Изоляция вводов и фидеров токамака EAST была осуществлена простой намоткой трёх слоёв каптонной и стекловолоконной ленты, пропитанной свежей эпоксидной смолой. Она была испытана под напряжением 15 кВ, но только в хорошем вакууме. При испытаниях отдельных катушек произошли два пробоя. Один пробой был вызван потерей вакуума из-за отрыва охлаждающей трубки от опоры катушки.

На рис. 1 показаны последствия второго пробоя, произошедшего при испытаниях диверторной катушки токамака EAST. Пробой начался на стандартном выводе диагностики (потенциальных проводов детектора нормальной фазы) предположительно из-за появления в нём небольшой течи, создавшей локальное ухудшение вакуума, так как при предварительных испытаниях при 15 кВ в хорошем вакууме всё было нормально. В самом выводе разрушения не очень большие — расплавление трёх выводных штырей без разрушения самого изолятора вывода (как это случилось в аналогичном случае на T-15), но возникающая дуга распространилась на саму испытываемую катушку и серьёзно повредила её: расплавила два витка внешнего слоя обмотки, что потребовало её ремонта и повторных испытаний перед передачей на сборку.



Три штыря, соединяющие потенциальные (высоковольтные) провода, расплавлены

Электрическая дуга расплавила два витка внешнего слоя обмотки

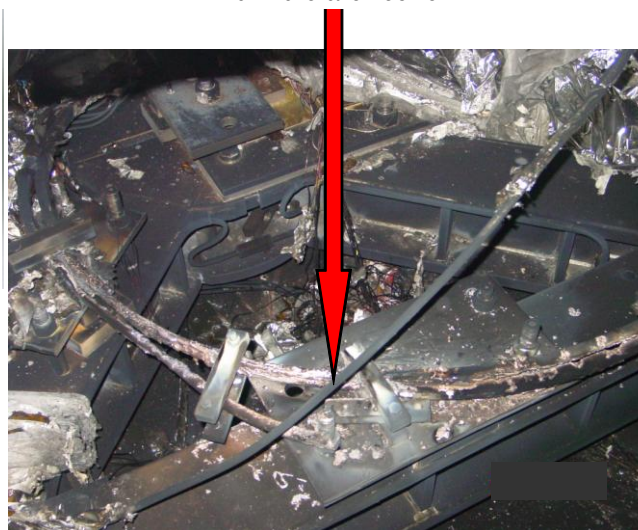


Рис. 1. Последствия второго пробоя, произошедшего при испытаниях диверторной катушки токамака EAST

В индийском токамаке SST-1 первый пробой произошел в 1998 г. при испытаниях модельной сверхпроводящей катушки. Его причиной было отсутствие изоляции на спиральном теплообменнике, расположенном около катушки и связанном с ней индуктивно. При квенче СМ ток, наведённый в теплообменнике, толкнул его на катушку и повредил её витки. Второй пробой произошёл в основной диверторной катушке PF3-U на полностью собранном магните при разряде индуктора во время попытки получить первую плазму в 2006 г. Последствия аварии показаны на рис. 2. Пробой начался между изготовленным из нержавеющей стали заземлённым фланцем, фиксирующим катушку, и выводом гелия из средних слоёв катушки. Однако изоляция вывода гелия после его прохода через толстую корпусную изоляцию катушки, сделанную по технологии ВПД (срез этой изоляции виден на рисунке), была выполнена



Рис. 2. Последствия аварии на диверторной катушке PF3-U токамака SST-1

просто тремя слоями стеклотенты, пропитанной смолой. Слабость этой изоляции при появлении даже небольшой течи в выводе гелия, видимо, и привела к пробоем с вывода на фланец. Образовавшаяся электрическая дуга прожгла большие дыры в оболочке двух смежных витков катушки, как это видно на рис. 2. К виткам рядом с местом повреждения после удаления изоляции приварена гайка, позволяющая оттянуть витки от катушки для ремонта. Повреждённые куски кабеля были вырезаны и соединены перемычками с четырьмя новыми спаями. Изоляция катушки, изготовленная по технологии ВПД, в зоне ремонта была удалена. Это заняло не более нескольких часов из трёх месяцев ремонта (вопреки мнению тех, кто вводит в заблуждение дирекцию ИТЭР утверждениями о невозможности ремонта фидеров, соединений и терминалов в случае их компаундирования). Катушка была демонтирована в связи с общей разборкой установки и после ремонта и испытаний поступила на повторную сборку.

Ещё два пробоя произошли на ССТ-1 на выводах электрического тока из запасной катушки тороидального поля во время испытаний на ней новых межгелетных соединений, потому что на этих выводах была не корпусная, а лишь межвитковая изоляция.

Таким образом, до сих пор на термоядерных установках с СМ с принудительным охлаждением произошло 17 пробоев (шесть — на отдельных катушках токамака Т-15 и два — на собранной установке Т-15, один — в рамках программы LCT, один — на токамаке НТ-7, два — на катушках EAST, один — на прототипной катушке KSTAR, три — на отдельных катушках токамака SST-1 и один — при испытаниях собранной установки SST-1). Почти все эти пробои (кроме двух на собранном токамаке Т-15) произошли при напряжении < 3 кВ.

Эти 17 пробоев были наиболее опасными и практически единственными серьёзными авариями на рассмотренных магнитах. Однако такое большое количество аварий свидетельствует о недостаточно высокой надёжности этих СМ термоядерных установок и необходимости её повышения.

Важно отметить следующие общие черты этих аварий:

1. В большинстве случаев пробои были вызваны потерей вакуума в криостате или сопровождались его нарушением.

2. Почти все эти пробои (кроме двух на Т-15) произошли при рабочем напряжении ≤ 3 кВ после испытаний в хорошем вакууме при напряжении постоянного тока 10—15 кВ, т.е. даже после успешного проведения высоковольтных испытаний в хорошем вакууме при его потере пробой возможен при 3 кВ, тем более при 5—7 кВ, которые предусматриваются в проектах EAST и KSTAR, и 12 кВ, планируемых для ИТЭР.

3. Хотя пробои всегда начинались на вводах и фидерах электрического тока или выводах криогенных и диагностических линий, но не внутри самих катушек, они иногда повреждали и сами катушки. В трёх случаях повреждения были настолько сильными, что катушки стали непригодными к дальнейшей работе. Так что рассматривать эти аварии, как относящиеся к несущественным и легко заменяемым узлам магнита, — недопустимое легкомыслие.

4. Катушки всегда были изолированы весьма тщательно, с применением технологии ВПД, в то время как электрические, криогенные и диагностические коммуникации всегда были изолированы намного хуже, простой многослойной намоткой, часто сделанной в спешке при окончании сборки установки.

Эти обстоятельства (особенно последнее) позволяют сделать вывод, что большое число пробоев — это не принципиальный недостаток СМ с принудительным охлаждением, а следствие недостаточного внимания к электрической прочности изоляции внутренних коммуникаций магнита и применения на них упрощённой технологии изоляции в отличие от изоляции самих катушек, а также недооценки вероятности потери вакуума в криостате, когда магнит уже заряжен.

Таким образом, проблема электрической прочности изоляции вводов и фидеров и её адекватных испытаний, а также уменьшения вероятности потери вакуума в криостате и его влияния на характеристики изоляции оказывается одной из важнейших для обеспечения надёжности СМ с принудительным охлаждением.

СИТУАЦИЯ С ПРОЕКТАМИ НОВЫХ БОЛЬШИХ УСТАНОВОК

К сожалению, та же недооценка важности качества изоляции вводов и фидеров повторяется в ИТЭР. Электрические и криогенные коммуникации и их изоляция рассматриваются как вспомогательные части

магнита и не пользуются необходимым вниманием со стороны проектантов. По нашему мнению, предусмотренная в проекте ИТЭР изоляция вводов и фидеров сверхпроводящих магнитов неудовлетворительна, так как она практически такая же, как на существующих установках, несмотря на то, что большие магниты требуют более высокого рабочего напряжения. Так, для ИТЭР требуется рабочее напряжение 12 кВ, а испытательное 29 кВ, тогда как в настоящее время даже рабочее напряжение на уровне 3 кВ освоено недостаточно и приводит к аварийным ситуациям.

Как это ни странно, возможность пробоев при потере вакуума была исключена из рассмотрения Группы по оценке рисков магнита ИТЭР (MRAG). В 2008 г. на совещании этой группы был представлен доклад о пробоях, произошедших на токамаке EAST [9], но в итоговом отчёте о работе группы он даже не был упомянут, как якобы не имеющий отношения к основной теме совещания, хотя в докладе было ясно показано, что дуга, начавшись на выводе диагностических проводов, распространилась на магнитную катушку и повредила её. Мы считаем этот факт опасным и недопустимым игнорированием опыта реальной эксплуатации токамаков со сверхпроводящими магнитами.

По нашему мнению, объём проведённых НИОКР по изоляции СМ совершенно не адекватен важности проблемы.

Единственной реальной попыткой создать изоляцию вводов и фидеров, способную работать при 23 кВ, был проект POLO [10]. При его осуществлении был разработан, изготовлен и успешно испытан на стенде TOSKA (Toroidale Spulentestanlage Karlsruhe) в Карлсруэ прототип сверхпроводящей катушки полоидального поля для токамака TORE SUPRA. К сожалению, эта катушка не была использована и не прошла длительной проверки в рабочих условиях. Эти работы не получили должной поддержки для их дальнейшего развития и использования в больших СМ токамаков следующего поколения. Лишь частично они использовались при испытаниях модельной катушки для ИТЭР, однако испытания изоляции в этом эксперименте не считались первостепенными и не были доведены до конца.

Практически электрическая изоляция вводов и фидеров СМ не была испытана в реальных условиях ИТЭР, в том числе в условиях, имитирующих достаточно вероятные аварийные ситуации, ни на каком-либо новом большом токамаке, ни на модельных катушках ИТЭР. Испытания модельной катушки тороидального поля TFMC (Toroidal Field Model Coil) для реактора ИТЭР на стенде TOSKA были успешными с точки зрения допустимой нагрузки по току. Однако даже сброс тока при ± 5 кВ и разных давлениях, планировавшийся в качестве испытаний Пашена этой катушки с неадекватным, но, по крайней мере, частичным моделированием влияния магнитного поля, проведён не был, так как один из вводов электрического тока закоротился на землю после установки магнита в криостат. Испытания при хорошем вакууме удалось провести при однополярном напряжении 0—4,4 кВ вместо запланированных ± 5 кВ, а при имитации потери вакуума напряжение не превышало 1 кВ [11].

На самом крупном стенде для испытания сверхпроводящих модельных катушек центрального соленоида ИТЭР CSMC (Central Solenoid Model Coil), сооружённом в Нака, Япония, был испытан огромный СМ диаметром 3 м с индукцией магнитного поля 13 Тл. Высоковольтные испытания проводились перед охлаждением и после него при постоянном напряжении 21 кВ. Затем несколько раз был проведён быстрый вывод тока при напряжении $V = 10$ кВ, но всё это было сделано только при хорошем вакууме ($p \approx 10^{-6}$ мбар). Воспроизведение возможных и достаточно вероятных, как было показано ранее, аварийных ситуаций не проводилось.

По нашему мнению, разработчики новых больших сверхпроводящих магнитов продолжают игнорировать необходимость мер по предотвращению пробоев и усилению электрической прочности изоляции, а также по упрощению и повышению надёжности испытаний изоляции окончательных соединений вводов и фидеров, предусматривающих возможную потерю вакуума.

ИСПЫТАНИЯ ПАШЕНА

Вместо улучшения изоляции и снижения вероятности потери вакуума в некоторых проектах предпочтение отдаётся более жестким испытаниям — высоковольтной проверке электрической прочности изоляции на всех катушках в зависимости от давления в криостате (испытаниям Пашена). Такие испытания предлагаются как основные для сверхпроводящих катушек ИТЭР. Однако эти испытания воспроизводят

только изменение давления, но не все реальные эксплуатационные условия, в частности, наличие магнитного поля, влияние которого может быть очень сильным в зависимости от его конфигурации, а также абсорбцию/десорбцию газа на холодных поверхностях. Полное воспроизведение реальных эксплуатационных условий, включая конфигурацию магнитного поля для разных плазменных сценариев, практически невозможно, но без него эти сложные и дорогие испытания не могут дать надёжных результатов.

Кроме того, заключительные испытания Пашена с проверкой изоляции соединений после сборки магнитов, когда сотни соединений должны быть испытаны одновременно в рабочем криостате установки, настолько сложны, трудоёмки и опасны, что на их проведение до сих пор не решился никто. Ни на термоядерных установках последнего поколения, ни на больших модельных катушках CSMC их не было. Везде окончательные испытания проводились при постоянном напряжении 15—21 кВ, но всегда только в хорошем вакууме (при $p < 10^{-6}$ мбар), хотя такие испытания не гарантируют безопасную работу в случае потери вакуума даже при 3 кВ, тем более при 12 кВ, необходимых в ИТЭР.

Главное же состоит в том, что пашеновские испытания полезны только при технологических испытаниях изоляции галет и катушек до их помещения в корпуса, т.е. когда их поверхность открыта окружающему пространству (вакууму или газу низкого давления). В этом пространстве и происходит образование свободных электронов, необходимых для развития пробоя, которые потом концентрируются возле дефектов изоляции и проникают сквозь них, поддерживая ток пробоя и позволяя визуально определять место дефекта.

Однако в реальных рабочих условиях для уменьшения вероятности пробоя нужно, чтобы такого пространства — генератора электронов, способствующего развитию пробоя, по возможности не было. Для этого поверхность изоляции не должна быть открытой в вакуум криостата, а должна быть отделена от него заземлённым проводящим покрытием, исключаяющим вакуумный промежуток с электрическим полем из возможного пути пробоя. Это уже много раз предлагалось, в том числе магнитной группой ИТЭР, неоднократно декларировавшей намерение сделать на всей изоляции магнита проводящее заземлённое покрытие. Однако технология, позволяющая последовательно реализовать это решение, до сих пор не отработана и нигде не проверена. Видимо, это происходит, в частности, потому, что психологически трудно размещать заземлённый кожух вблизи высоковольтного кабеля, поскольку это противоречит повседневному опыту работы на воздухе, т.е. на правой ветви кривой Пашена, а не на левой, как это имеет место при малых давлениях.

Первая известная нам попытка применить проводящий заземлённый чехол сделана на токамаке EAST намоткой фольги вокруг изоляции мест соединений при заключительной сборке магнита. Провода, обеспечивающие заземление, выведены из криостата и соединены с землёй через сопротивления, чтобы измерять токи утечки. Однако эта работа до сих пор не закончена. Испытания чехла (или магнитной обмотки, когда чехол заземлён) с измерением тока утечки пока не проведены. Планируется их сделать при различном давлении в криостате. Изоляция тех соединений, где ток утечки окажется больше заданного при каком-либо давлении, должна быть переделана, затем снова закрыта чехлом и измерена опять. Нам представляется, что было бы неплохо выполнять такую процедуру шаг за шагом по всей длине фидеров. По-видимому, это позволит уменьшить опасность пробоев лучше, чем испытания Пашена.

Видимо, то же самое целесообразно сделать и на токамаке KSTAR. Установленные там над последними соединениями боксы G-10 вряд ли могут быть эффективными без установки над ними проводящего чехла, который может быть сделан так же, как на токамаке EAST. Работать и, тем более, увеличивать рабочее напряжение без проводящего чехла рискованно. Фактически в настоящее время EAST и KSTAR работают при напряжении до ~3 кВ без испытаний изоляции, соответствующих аварийным ситуациям. Поэтому их поведение при потере вакуума непредсказуемо, и пробой на выводах коммуникаций в этом случае не исключён.

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ТЕЧЕЙ ГЕЛИЯ И ПОТЕРИ ВАКУУМА

Предъявление к изоляции внутренних коммуникаций СМ только требования относительно её электрической прочности (как это делают сейчас разработчики ИТЭР) не учитывает весьма важного аспекта надёжности магнита — необходимости предотвращения течей гелия в криостат.

Изоляция, выполненная простой намоткой, даже когда поверх неотверждённой компаундированной стеклоленты наматывается уплотняющая термоусадочная лента, не может предотвратить течи гелия. Более того, она делает практически невозможными нахождение и устранение течи под изоляцией. Это было очень наглядно продемонстрировано на токамаке KSTAR во время испытания его магнита в 2008 г. Изоляция фидеров, подводящих ток к катушкам, была сделана несколькими слоями каптона и стекловолоконной лентой, пропитанной свежей эпоксидной смолой, уплотнённой термоусадочной оболочкой. Однако она оказалась недостаточно герметичной. Во время захлаживания магнита при ~ 200 К в одном из фидеров катушек полоидального поля появилась небольшая течь гелия. Для сохранения вакуума в боксе полоидальных тоководов для продолжения захлаживания оказалось необходимым установить один за другим четыре дополнительных насоса, так как течь увеличивалась по мере охлаждения. При подходе к температуре 5 К, когда свободных люков для дополнительных насосов уже не осталось, давление снова поднялось до 10^{-4} мбар. Пришлось понизить давление гелия в фидере, в котором появилась течь, с 5 до 1,5 бар (т.е. вопреки предписанному регламенту перейти на охлаждение двухфазным гелием). Только после этого удалось обеспечить вакуум в боксе тоководов, необходимый для работы без угрозы пробоа (на уровне $7 \cdot 10^{-6}$ мбар). Это позволило успешно завершить испытания магнита и вовремя в соответствии с графиком получить первую плазму. Найти место течи после отогрева магнита до комнатной температуры не удалось в течение 3 месяцев, так что пришлось заменить шину с течью на новую.

Сварные межгалетные соединения меди с нержавеющей сталью в катушках индийского токамака SST-1 были покрыты стекловолоконной лентой, пропитанной эпоксидной смолой FG (food grade). Это не позволило найти и устранить течь, возникшую при захлаживании магнита, и явилось одной из основных причин неудачи первого пуска установки.

Течь, появившаяся при охлаждении, но недоступная для обнаружения после отогрева, не позволила применить упрочняющее стеклотекстолитовое покрытие поверх хрупких керамических изоляторов ещё на токамаках T-7 и T-15.

Замена проходных изоляторов, в которых после некоторого времени работы возникали небольшие течи, на токамаках T-7 и T-15 была рутинной операцией. Конечно, благодаря предварительной отбраковке и замене некоторых изоляторов в ходе длительной работы, а также технологическим улучшениям такие нарушения нормальной работы стали более редкими. Тем не менее после шести захлаживаний токамака EAST два изолятора на гелиевых коммуникациях пришлось заменить [12].

Таким образом, опыт показывает, что полностью исключить течи традиционными способами и тщательным контролем качества изоляции вряд ли возможно. Тем более если учесть, что на токамаках сложная сеть коммуникаций вокруг принудительно охлаждаемых СМ подвержена воздействию ударов и вибрации при импульсных разрядах, особенно сильных при срывах тока плазмы и вертикальных смещениях плазменного шнура. В результате этого в ней возникают новые течи, даже если перед сборкой были проведены тщательный контроль качества и холодные испытания всех катушек.

Это означает, что, кроме требований к электрической прочности изоляции коммуникаций магнитов, к ней следует предъявить дополнительные проектные требования. Она должна предотвращать гелиевые течи, которые могут возникнуть при работе установки, несмотря на тщательную проверку, меры по обеспечению качества и даже холодные испытания всех катушек перед сборкой. Изоляция, по крайней мере, должна не мешать обнаружению и устранению течей, что происходит при простой намотке изолирующей ленты, которая, как правило, не бывает вакуумно-плотной. Это дополнительное требование не менее важно для надёжности установки, чем обеспечение электрической прочности изоляции.

РЕКОМЕНДАЦИИ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мы считаем, что нужно существенно улучшить технологию изоляции магнитных коммуникаций и исключить вероятность течей. Изоляция вводов и фидеров должна быть надёжно отделена от вакуума криостата, и её электрическая прочность не должна быть меньше, чем у изоляции катушек. Для этого вокруг всех токовых, криогенных и диагностических выводов, фидеров и тоководов нужно установить вакуумно-плотные заземлённые чехлы (разрезанные продольно, а затем плотно прижатые с обеих

сторон к фидеру, обмотанному каптоном и сухой стеклолентой, и сваренные снова после установки трубы из нержавеющей стали с отводами для последующей откачки и пропитки). Над местами соединения фидеров с выводами катушек и с тоководами и между частями фидеров такие же чехлы должны быть установлены на месте после сборки, чтобы они покрывали всю длину электрических коммуникаций от терминалов катушек до выхода из криостата. Выводы гелия должны также быть покрыты чехлами, включая их проходные изоляторы, после которых чехлы могут быть приварены к заземлённым коллекторам.

Зазоры между чехлами и токовыми или гелиевыми выводами с проходными изоляторами, фидерами, тоководами и диагностическими кабелями следует заполнить твёрдым электроизолирующим материалом, например, применить технологию ВПД или залить их жидким азотом, который затвердеет при охлаждении. Большая теплоёмкость азота повысит стабильность фидера, а время на его охлаждение будет всё-таки меньше, чем для всего магнита, но это, конечно, потребует НИОКР, в то время как применение технологии ВПД практически не требует специальных НИОКР, так как необходимая технология уже разработана для изоляции самих катушек. Если же нужна её доработка, то она должна быть практически одна и та же для обоих применений.

Чехлы устранят зависимость электрической изоляции выводов от условий в криостате, а также упростят и ускорят её испытания, что позволит обеспечить мониторинг качества изоляции при работе установки перед каждым импульсом плазмы. Кроме того, они практически исключают возможность течи гелия в криостат, создавая второй вакуумно-плотный барьер, который позволяет поиск и устранение течи гелия на собранном магните и в процессе профилактического обслуживания установки, поскольку они не покрыты изоляцией как сам кабель. Таким образом, чехлы обеспечат надёжность работы магнита и позволят обойтись без испытаний всех его катушек перед их сборкой.

Конечно, рекомендованный метод улучшения изоляции коммуникаций сложнее простой обмотки изоляцией, но применение технологии ВПД для изоляции самих катушек ещё намного сложнее, хотя оно не встречает возражений, так как очевидна и всеми признана его необходимость. Те, кто считает, что рекомендуемые меры не являются необходимыми для вводов и фидеров электрического тока, видимо, надеются вопреки опыту на надёжность сохранения вакуума.

Снижение гибкости фидера при применении чехла способствует поддержке кабеля и его надёжному соединению с выводом тока из катушки, поскольку чехол, приваренный к корпусу терминала и через него к корпусу катушки, образует с ними надёжную поддерживающую структуру. Вообще опоры фидера в стальной трубе проще и надежнее, чем для голого гибкого кабеля. В то же время компенсаторы уменьшения длины при охлаждении, имеющие S-образную форму и требующие гибкости фидера, могут и должны быть удалены из криостата и размещены в тёплой зоне за подвижным блоком тоководов или заменены коленчатой трассировкой фидеров, как это делается на существующих установках. Предлагаемые сейчас компенсаторы сложны в изготовлении и испытаниях, но не надёжны, и их размещение в криостате представляется недопустимым.

Заполнение чехла эпоксидной смолой по технологии ВПД не исключает возможности ремонтных работ, но требует для этого лишь немного ($\leq 1-2\%$) больше времени, как показал ремонт третьей катушки полоидального поля в токамаке SST-1, замена катушек в токамаке T-15 и другие работы с катушками, изоляция которых была пропитана смолами по технологии ВПД.

Невозможность использовать чехол из нержавеющей стали вблизи быстродействующих катушек полоидального поля и катушек центрального соленоида ИТЭР касается лишь небольшой ($\leq 2\%$) части полной длины его фидеров. В таких местах нержавеющая сталь должна быть заменена другим материалом, однако это не отрицает возможности применения чехлов из нержавеющей стали на большей части вводов и фидеров. При этом нужно отметить, что предложенные сложные системы подвода и крепления фидеров к катушкам полоидального поля, и даже центрального соленоида, сами имеют достаточно много узлов и деталей из нержавеющей стали, и чехол не так много добавит к ним.

В случае течи некоторое количество гелия может накопиться в щелях, но при отеплении это не может привести к разрыву стального чехла, так как количество накопившегося гелия весьма мало ($\lesssim 1 \text{ см}^3$). Такое количество газа не может иметь энергию, достаточную для серьёзного повреждения чехла.

ВЫВОДЫ

Применяемая в настоящее время и предлагаемая для ИТЭР электрическая изоляция внутренних коммуникаций магнитов принудительного охлаждения не обеспечивает необходимой надёжности и должна быть доработана.

Применение чехла из нержавеющей стали — лучшая, если не единственная, возможность создать надёжную, действительно твёрдую изоляцию, не зависящую от условий в криостате. Испытания её электрической прочности весьма просты и не требуют большого времени. Поэтому они позволяют провести мониторинг качества изоляции даже перед каждым плазменным импульсом.

Чехлы практически исключают течь гелия в криостат, являясь вторым вакуумно-плотным барьером в дополнение к оболочке кабеля, изоляторам на системе выводов гелия и другим слабым местам системы гелиевых коммуникаций, где течи гелия могут возникнуть от механических возмущений, встрясок и вибрации при работе установки даже после тщательного контроля качества и проведения холодных испытаний всех катушек до сборки магнита. В случае, если течь возникнет и в этом барьере, он доступен для ремонта на собранной установке, поскольку его поверхность не покрыта изоляцией.

Обеспечивая надёжную изоляцию и отсутствие течи, чехлы позволяют сократить время испытаний в процессе изготовления и отменить холодные испытания всех катушек до сборки. Это вполне компенсирует некоторую потерю времени, которое потребуется для монтажа чехлов вокруг всех коммуникаций магнита, и в результате позволит сократить, а не увеличить время реализации всего проекта.

Таким образом, чехлы с заполнением изоляционным материалом по технологии ВПД увеличивают надёжность магнитов до уровня, который позволяет удовлетворить требования, предъявляемые к СМ экспериментального реактора.

Авторы выражают признательность коллективам эксплуатационных бригад, токамаков Т-7, Т-15, ИТ-7, EAST и KSTAR, которые обеспечили успешную работу этих установок, несмотря на трудности, о которых шла речь в настоящей статье.

Российский коллектив авторов работал в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 годы».

REFERENCES

1. **Bessette D. et al.** Story of damage BT-17 coil of the TF superconducting magnet of TORE SUPRA. CEA-1308, France, 1986.
2. **Ivanov D.P., Kurbatov D.K., Pashkov A.Yu.** Analysis of possible accidents in ITER cryostat. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 1996, issue 1, pp. 3—18 (in Russian).
3. **Kolbasov B.N., Kurbatov D.K., Ivanov D.P., Pashkov A.Yu.** Analysis of possible accidents in ITER cryostat. — Fusion Technology, 1996; Proc. of the 19th Symposium on Fusion Technology. Lisbon, Portugal, 1997, pp. 1807—1810.
4. **Kolbasov B.N., Kurbatov D.K., Ivanov D.P., Pashkov A.Yu.** Qualitative analysis of possible accidents in ITER cryostat system. — Plasma Dev. Oper., 1997, vol. 5, pp. 143—160.
5. **Ivanov D.P., Kolbasov B.N., Kurbatov D.K., Pashkov A.Yu.** Analysis of possible accidents in ITER magnets. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 1997, issue 1—2, pp. 14—22 (in Russian).
6. **Ivanov D.P., Kolbasov B.N., Kurbatov D.K., Lelekhov S.A., Pashkov A.Yu.** Qualitative analysis of accidents possible in ITER magnets. — Plasma Dev. Oper., 1999, vol. 7, pp. 205—217.
7. **Beard D.S. et al.** The IEA large coil task. — Fus. Eng. Des., 1988, vol. 7, № 1—2, p. 240.

8. **Ivanov D.P.** Insulation of the Leads for Force-cooled Superconducting Magnets. Presentation at 4 IAEA Technical Meeting on Steady-State Operation of Magnetic Fusion Devices. Achmedabad, India, 2005 (proceedings on CD).
9. **Weng P.D.** Report at the first Magnet Risks Assessment Group meeting. Cadarache, Jan. 2008.
10. **Darweschad M. et al.** Development and test of the poloidal field prototype coil POLO at the Forschungszentrum Karlsruhe. — Fus. Eng. Des., 1997, vol. 36, pp. 227—250.
11. **Ulbricht A. et al.** The ITER toroidal field model coil project. — Fus. Eng. Des., 2005, vol. 73, pp. 189—327.
12. **Wu Y.** Experience and operating safety of EAST superconducting magnets. — IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2010, vol. 20, № 3, pp. 431—437.

AUTHORS

Ivanov D.P. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Ivanov_DP@nrcki.ru

Kolbasov B.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Kolbasov_BN@nrcki.ru

Lelekhov S.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Lelekhov_SA@nrcki.ru

Anashkin I.O. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; anashkin_IO@nrcki.ru

Khvostenko P.P. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Khvostenko_PP@nrcki.ru

Weng P.D. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui, China;
pdweng@mail.ipp.ac.cn.

Nishimura A. National Institute of Fusion Sciences, Toki, Gifu, Japan; nishi-a@nifs.ac.jp.

Oh Y.-K. National Fusion Research Institute, Daejeon, Republic of Korea; ykoh@nfri.re.kr.

Pan W.J. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui, China; wjpan@ipp.ac.cn.

Pradhan S. Institute for Plasma Research, Gandhinagar, Gujarat, India; pradhan@ipr.res.in.

Song Yu.T. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui, China; songyt@ipp.ac.cn.

Sharma A.N. Institute for Plasma Research, Gandhinagar, Gujarat, India; aashoo.sharma@yahoo.com.

Received 31 August 2011
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2012, issue 1, pp. 5—16.