УДК 621.039.623:621.039.58

МАКСИМАЛЬНАЯ ПРОЕКТНАЯ АВАРИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ДЕМО-ТИН

Б.Н. Колбасов

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

При анализе безопасности ядерных, в том числе термоядерных, установок обязательно должна рассматриваться максимальная проектная авария, при которой ожидается наибольший выброс активности. Такой аварией обычно является авария с отказом систем охлаждения наиболее теплонапряжённых компонентов реактора (для термоядерной установки — дивертора и первой стенки). Анализ безопасности реактора ИТЭР и энергетических термоядерных установок, в том числе гибридных установок синтеза-деления, показал, что исходным событием для максимальной проектной аварии является крупный разрыв трубы системы охлаждения дивертора или первой стенки за пределами вакуумного корпуса установки. При этом наибольшее беспокойство вызывает возможность образования водорода, прорыва воздуха в вакуумную камеру (ВК) с образованием гремучей смеси и последующего детонационного взрыва. Чтобы предотвратить взрыв, рекомендуются экстренное принудительное прекращение термоядерной реакции, установка в системах охлаждения дивертора и первой стенки/бланкета отсечных клапанов, чтобы сократить до минимума количество воды и воздуха, которые могут прорваться в ВК, инъекция азота или инертного газа в ВК для уменьшения концентрации водорода и кислорода и другие меры. Благодаря непрерывному выводу жидкосольевой топливной смеси из бланкета установки ДЕМО-ТИН с периодом выведения 10 сут выброс активности при аварии в основном будет определяться тритием (до 360 ПБк). Активность продуктов деления в установке будет около 50 ПБк.

Ключевые слова: максимальная авария, детонационный взрыв, отказ систем охлаждения, потеря вакуума.

MAXIMAL DESIGN ACCIDENT OF THE FUSION NEUTRON SOURCE DEMO-TIN

B.N. Kolbasov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Consideration of the maximal design accident, at which the largest release of activity is expected, is obligatory in the safety analyses of any nuclear (including fusion) facility. The initial event for such accidents in fusion and hybrid (fission-fusion) facilities can be a large-scale break of a pipe of the systems cooling the divertor or the first wall outside the facility vacuum vessel. The greatest concern is caused by a possibility of hydrogen formation and air inrush into vacuum chamber (VC) with formation of detonating mixture and following explosion. For the explosion prevention we recommend: an emergency forced termination of the fusion reaction; placing of shut-off valves in the divertor and first wall/blanket cooling systems to minimize water and air inrush into the VC; injection of nitrogen or inert gas into the VC to reduce hydrogen and oxygen concentration, and other measures. Owing to the continuous feed-out of the molten salt fuel mixture from the DEMO-TIN blanket with the removal period of 10 days maximum radioactivity release at the accident will be determined mainly by tritium (up to 360 PBq). The activity of fission products will be up to 50 PBq.

Key words: maximal accident, detonation explosion, cooling system failure, loss of vacuum.

ВВЕДЕНИЕ

Первой основной функцией обеспечения безопасности любой ядерной установки, в частности ТИН, является удержание радиоактивных и других вредных веществ в границах, установленных в проекте таким образом, чтобы при нормальной эксплуатации и проектных авариях не превышались максимально допустимые значения выбросов и сбросов, определённые в федеральных нормативных документах, действующих в области использования атомной энергии, а при запроектной аварии были максимально ослаблены её радиационные последствия и, по возможности, не достигались уровни выбросов, приводящие к необходимости эвакуации населения. В связи с этим при анализе безопасности ядерной, в том числе термоядерной, установки обязательно рассматривается наиболее опасная проектная авария, при которой ожидается наибольший выброс активности. Это так называемая «максимальная» проектная авария. Такой аварией для ядерных установок является авария с отказом систем охлаждения наиболее теплонапряжённых компонентов реактора (для термоядерной установки — дивертора и первой стенки).

Второй основной функцией обеспечения безопасности является защита населения и персонала от ионизирующего излучения.

Выполнение основных функций обеспечения безопасности при возникновении исходного события зависит от эффективности и надёжности исполнения совокупности вспомогательных функций обеспечения безопасности, к которым относятся:

- аварийная остановка реактора;
- аварийный отвод тепла радиоактивного распада;

- предотвращение взрывов гремучей смеси (водорода и кислорода) и пыли;
- сброс избыточного давления;
- недопущение воздуха в места скопления водорода;
- предотвращение выделения энергии, запасённой в магнитном поле;
- переключение нормальной вентиляции на аварийную при необходимости.

В реакторе ИТЭР при авариях давление в ВК не должно превышать 200 кПа. Думаю, что в ДЕМО-ТИН ограничение на давление в вакуумном корпусе должно быть такого же порядка. В проекте установки ДЕМО-ТИН должны быть предусмотрены средства снижения опасности нарушения герметичности ВК: система сброса давления (например, при течах трубок с теплоносителем внутри ВК), ограничение образования водорода и поступления воздуха, а также недопущение взрыва, связанного с образованием гремучей смеси, и поддержание достаточно низкой температуры при выделении тепла радиоактивного распада.

ИСХОДНЫЕ СОБЫТИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОЕКТНОЙ АВАРИИ

Максимальной (наиболее опасной) проектной аварией ядерной установки обычно является авария с отказом всех систем охлаждения компонентов ядерной установки, в которых тепловыделение, в том числе остаточное, максимально.

Причиной аварии с потерей потока теплоносителя (так называемой LOFA) может стать отказ энергоснабжения. Поэтому на установке обычно предусматриваются источники электроснабжения четырёх классов:

- к 4-му классу относятся источники переменного тока, отказ которых не наносит ущерба безопасности населения или персонала;
- при отказе внешнего энергоснабжения системы безопасности, подключённые к источникам энергоснабжения 3-го класса, через 3—5 мин должны начать получать переменный ток (до 5 кВ, 15 МВт) от резервных дизель-генераторов, соединённых с газовыми турбинами, главным образом для того, чтобы безопасно прекратить работу установки, а также для того, чтобы обеспечить работу энергоисточников 1-го и 2-го класса;
- системы безопасности, требующие надёжного непрерывного снабжения переменным током (до 380 В), будут получать энергию от инверторов или мотор-генераторов (источников энергоснабжения 2-го класса);
- источники энергоснабжения 1-го класса — это постоянно работающие батареи, которые непрерывно подпитываются энергоисточниками 3-го класса через выпрямители и обеспечивают энергией те системы, которые должны функционировать непрерывно (например, освещение реакторного здания) [1].

Более серьёзным возможным исходным событием для максимальной проектной аварии гибридной установки синтеза-деления является крупный разрыв трубопровода (или нескольких трубопроводов) систем охлаждения наиболее теплонапряжённых компонентов установки, например, дивертора и первой стенки. При такой аварии большую опасность представляет возможность взрыва водорода и пылевидных продуктов эрозии бериллия, из которого предполагается сделать защитные покрытия диверторных пластин и первой стенки установки ДЕМО-ТИН.

ВОЗМОЖНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ГРЕМУЧЕЙ СМЕСИ И ЕЁ ВЗРЫВА

Чтобы в случае аварийного накопления водорода в ВК и прорыва в ВК воздуха не произошло детонации смеси водорода и воздуха (гремучей смеси), способной вызвать взрывную волну с давлением более 200 кПа, количество водорода в ВК не должно превышать 4 кг, количество воздуха, прорвавшегося в ВК, не должно быть больше 50 кг. При этом следует учитывать, что в нормальных условиях количество изотопов водорода (третия и дейтерия) в ВК (включая водород, адсорбированный пылью и контактирующими с плазмой поверхностями, а также водород в крионасосах и инжекторах быстрых атомов) может достигать 1,5 кг. Поэтому с учётом присутствия изотопов водорода в ВК и соединённых с ней компонентах установки при

нормальной работе установки образование водорода при аварийном взаимодействии пыли и обращённых к плазме поверхностей с водой не должно превышать 2,5 кг [2, 3]. Для этого количество прореагировавшего бериллия не должно превышать 13,5 кг.

Авария, чреватая возможностью взрыва гремучей смеси, может произойти по следующему сценарию. В боксе теплообменного оборудования, находящемся при атмосферном давлении, происходит большой разрыв трубы, например, системы охлаждения дивертора (рис. 1) [3]. В этом случае термоядерная плазма в момент аварии может «не сразу догадаться» о прекращении охлаждения компонентов, контактирующих с плазмой, и термоядерная реакция будет продолжаться.

Предполагается, что диверторные мишени в ДЕМО-ТИН будут представлять собой трубки из бронзы CuCrZr толщиной 1 мм, покрытые защитным слоем бериллия толщиной 3 мм. При максимальной проектной тепловой нагрузке 15 МВт/м² такие трубки расплавятся через 1,4 с. Возможно, что после разрыва трубы с теплоносителем в блоке теплообменного оборудования термоядерная реакция вскоре прекратится. Однако исключить возможность разрушения трубок охлаждения в диверторе при рассматриваемом исходном событии нельзя.

Вода, оставшаяся в трубах охлаждения, выльется в ВК и превратится в водяной пар, который будет взаимодействовать с раскалённым бериллиевым покрытием диверторных мишеней, а также пылью, скопившейся к моменту аварии в ВК, производя водород. Реакция взаимодействия бериллия с водяным паром

сильно экзотермическая.

Ожидается, что основная масса пыли скопится в диверторе, особенно в местах, экранированных от плазмы и относительно холодных (рис. 2). Через разрушенную с двух сторон трубу в ВК может поступать воздух, образуя гремучую смесь.

Рис. 1. Авария с разрывом контура охлаждения дивертора за пределами герметичной вакуумной камеры

Рис. 2. Места в диверторе (*), где ожидается наибольшее скопление пыли [2]

Рис. 3. Поперечное сечение первой стенки установки ДЕМО-ТИН

Рис. 4. Сравнение средних скоростей реакции Be с водяным паром (увеличение веса в мг за 1 мин, отнесённое к 1 г исходной массы Be-образца) для различных видов образцов: коммерческих бериллиевых порошков CBR-30 (1,0—1,2 м²/г) (Δ) и CBR-56 (0,66—0,69 м²/г) (∇), дистиллированного бериллиевого порошка DBP-30 (1,0 м²/г) ($\square$), таблеток размером 2 мм (0,12 м²/г) ($\circ$) и 0,2 мм (0,24 м²/г) ($\diamond$), пористых образцов малой плотности, полученных спеканием порошков INEL92-Porous (0,27 м²/г) (+) и аналогичных плотных образцов в виде дисков INEL96-disc ($\blacksquare$) и INEL92-disc ($\blacklozenge$) и цилиндров ($\star$) (<0,001 м²/г). В скобках указана удельная эффективная контактирующая с паром площадь поверхности [5]

Рис. 5. Распределение давления в вакуумном корпусе ИТЭР после детонационного взрыва смеси 20 кг водорода с воздухом

Аналогичные расчёты были проведены для случая отказа охлаждения первой стенки установки ДЕМО-ТИН. Конструкция первой стенки [4] показана на рис. 3. При пиковой тепловой нагрузке 5 МВт/м² трубка из бронзы CuCrZr расплавится через ~4,4 с, бериллиевое защитное покрытие в наиболее узком месте — через 6,5 с после прекращения охлаждения, если термоядерная реакция будет продолжаться. В этом случае вода и водяной пар будут также взаимодействовать с бериллием, покрывающим первую стенку и мишени дивертора, и пылью. Скорость образования водорода при этом сильно зависит от температуры (рис. 4).

В 2009 г. Дж. Ксяо с коллегами опубликовал результаты проведённых в Карлсруэ расчётных и экспериментальных исследований последствий возможных взрывов в ВК реактора ИТЭР [6].

Авторы доклада предположили, что при исходном давлении в ВК 500 Па в неё прорывается вода с расходом 40 кг/с и образуется 20 кг водорода. Так как труба охлаждения после разрушения открыта с обоих концов, через отверстие площадью 2 дм² в ВК прорывается воздух. Смесь водорода и кислорода может воспламениться, если концентрация компонентов более 5% (об.). При большей концентрации H₂ и O₂ дефлаграция (процесс дозвукового горения) переходит в детонационный взрыв. При неблагоприятных условиях давление ударной волны в откачном тракте через 6 мс может достичь 1,5 МПа (рис. 5).

Имеется немало опытных данных о взрывах гремучей смеси, в том числе сопровождающихся взрывами углеродной и вольфрамовой пыли. Однако мне не известны данные об экспериментальных взрывах бериллиевой пыли, хотя неэкспериментальный взрыв бериллиевой пыли имел место на Ульбинском металлургическом заводе в Казахстане.

Эксперименты в Технологическом институте Карлсруэ [7] показали, что смесь водорода, воздуха и вольфрамовой пыли становится взрывоопасной при концентрации кислорода 8—9% (об.). Аналогичная смесь водорода, воздуха и углеродной пыли взрывается при концентрации кислорода около 15% (об.). При наличии внешнего возбудителя, например искры, взрыв может произойти ранее (при наличии углеродной пыли при 10% (об.) кислорода).

Возникающее при взрыве смеси водорода, воздуха и углеродной пыли давление взрывной ударной волны является линейной функцией объёмной концентрации кислорода. При росте этой концентрации от 10 до 20% оно увеличивается от 400 до 700 кПа (рис. 6 [7]).

При совместном взрыве водорода и пыли давление ударной волны больше, чем при взрыве только водорода. Так, при 11% (об.) водорода давление при взрыве смеси H_2 и O_2 без пыли более 4 бар, при взрыве той же смеси и 200 г/м^3 углеродной пыли оно около 7 бар (рис. 7 [7]).

Для предотвращения образования гремучей смеси и её детонационного взрыва рекомендуются следующие меры:

- применение системы экстренного принудительного прекращения термоядерной реакции;
- установка на трубах систем охлаждения дивертора и первой стенки/blankета отсечных клапанов, чтобы сократить до минимума количество воды и воздуха, которые могут прорваться в ВК;
- инъекция азота или инертного газа в ВК для уменьшения концентрации водорода и кислорода;
- применение пассивных каталитических рекомбинаторов водорода;
- сжигание водорода до образования его критической концентрации.

Как следует из рис. 4, заметное образование водорода, особенно при взаимодействии водяного пара с бериллиевой пылью, происходит уже при температуре 350°C . Скорость образования водорода в нормальных литрах, соответствующих стандартным условиям (10^5 Па , $273,15 \text{ К}$), при этом взаимодействии при температуре ниже 500°C можно оценить как

$$302 \exp(-13,465/T) \text{ норм. л./м}^2 \cdot \text{с},$$

где T — абсолютная температура в К [8].

Надзорные органы Франции потребовали, чтобы при отказе систем охлаждения дивертора, первой стенки и blankета в реакторе ИТЭР и устанавливаемых в нём испытательных модулях blankета, если удастся предотвратить водородный взрыв в первые секунды аварии, в дальнейшем температура находящихся внутри вакуумного корпуса компонентов из-за выделения тепла радиоактивного распада не превысила 300°C . Обеспечить выполнение этого требования в проекте ИТЭР удалось за счёт отказа от использования корпуса криостата в качестве барьера удержания радиоактивности и ввода в криостат воздуха через 3—10 дней после начала аварии (рис. 8).

ВОЗМОЖНЫЙ ВЫБРОС АКТИВНОСТИ

В результате рассмотренной максимальной аварии установки ДЕМО-ТИН можно ожидать выброса трития, продуктов деления, актинидов, радиоактивных продуктов эрозии (пыли и аэрозолей).

В ИТЭР из соображений безопасности установлены административные пределы максимального содержания трития в зависимости от ожидаемой его мобилизации (т.е. выхода из удерживающих его материалов) при авариях. Так, суммарное количество трития в ВК и её продолжениях (криогенных насосах и инжекторах быстрых атомов) не должно превышать 1 кг [2, 3]. Максимальное содержание трития в

Рис. 6. Зависимость избыточного давления при взрыве смеси водорода, воздуха и графитовой пыли от объёмной концентрации кислорода: $\square$ — расчёт; $*$ — эксперимент

Рис. 7. Рост давления $P_{\text{взр}}$ при инициированном искрой взрыве 11% (об.) водорода (—), углеродной пыли плотностью 200 г/м^3 (—) и смеси водорода 11% (об.) с углеродной пылью (200 г/м^3) (—) [7]

Рис. 8. Изменение температуры дивертора (—), первой стенки (---) и вакуумного корпуса (— · —) при потере всех потоков охлаждающей воды и вводе воздуха в криостат через 10 сут после аварии

соединённом с ВК криогенном насосе, а также в инжекторе быстрых атомов должно быть менее 120 г. При приближении к этому пределу крионасос должен быть отключён от ВК и поставлен на регенерацию. Соответственно при приближении суммарного количества трития в ВК к 1 кг должны быть приняты меры к удалению большей части трития из ВК.

При дейтерий-тритиевом эксперименте в токамаке JET был обнаружен любопытный изотопный эффект: в ВК удерживалось 40% инжестируемого трития и только 12% вводимого в ВК дейтерия [9]. Этот экспериментальный факт даёт основания предположить, что в ВК количество удерживаемого трития может оказаться больше, чем дейтерия.

Можно ожидать, что для максимального количества трития в ВК установки ДЕМО-ТИН будет установлен такой же предел, как для ИТЭР (1 кг), с суммарной активностью 360 ПБк. Меньшая скорость накопления трития по сравнению с ИТЭР позволит реже останавливать установку на детритизацию.

Тритий, накапливаемый разными путями в термоядерной установке, весьма сильно различается по вероятности его мобилизации. Например, тритий, образующийся в результате ядерных реакций в бериллии, практически не выходит из бериллиевых деталей, если эти детали не будут серьёзно разрушены. Применение различных методов детритизации компонентов установки JET после дейтерий-тритиевых экспериментов показало, что удалить весь тритий, инжестированный в ВК, крайне трудно. Тем не менее целесообразно консервативно предположить, что при максимальной проектной аварии весь тритий может выйти в окружающую среду.

Предполагается, что бланкет в установке ДЕМО-ТИН будет жидкосолевым на основе ториевой топливной смеси 71% ${}^7\text{LiF}$ + 27% ThF_4 + 2% BeF_2 [10]. Для подавления деления топливная смесь, содержащая продукты деления и актиниды, будет непрерывно выводиться из бланкета с периодом выведения 10 сут [11].

В реакторе, работающем на быстрых нейтронах, тепловой мощностью 2,9 ГВт с загрузкой топлива 50 т при достижении глубины выгорания топлива 33 ГВт·сут/т накапливаются продукты деления и актиниды активностью 16 и 1,3 ЭБк соответственно, т.е. накопление продуктов деления и актинидов происходит со скоростью 9,7 и 0,8 ТБк/(МВт·сут) соответственно. Если предположить, что накопление продуктов деления и актинидов в установке ДЕМО-ТИН будет идти с той же скоростью, то при мощности бланкета ДЕМО-ТИН 500 МВт и периоде выведения ${}^{233}\text{U}$, протактиния, а также растворимых продуктов деления из ДЕМО-ТИН, равном 10 сут, активность продуктов деления и актинидов в установке ДЕМО-ТИН будет 50 и 4 ПБк соответственно, т.е. в 56 раз меньше, чем в быстром реакторе, имеющем такую же тепловую мощность.

Для установок с твёрдотельным ядерным топливом обычно предполагают, что при максимальной проектной аварии могут выйти все газообразные и летучие продукты деления и актиниды и до 10% остальных продуктов деления и актинидов. Для жидкосолевого бланкета, по-видимому, следует допустить возможность выхода при максимальной проектной аварии всех продуктов деления и актинидов.

Максимальное количество бериллиевой пыли может быть до 800 кг. Активность этой пыли около 8 ПБк [12].

ВЫВОДЫ

Исходным событием для максимальной проектной аварии термоядерной установки является отказ систем охлаждения наиболее теплонапряжённых компонентов реактора (дивертора и первой стенки).

Наибольшую опасность представляет возможность образования водорода, прорыва воздуха в вакуумную камеру с образованием гремучей смеси и последующего детонационного взрыва. Установлено, что количество водорода в ВК не должно превышать 4 кг, а количество воздуха, прорвавшегося в ВК, не должно быть больше 50 кг. В этом случае детонация гремучей смеси, способная вызвать взрывную волну с давлением более 200 кПа, не произойдёт.

В проекте должны быть предусмотрены меры, предотвращающие такой взрыв:

- экстренное принудительное прекращение термоядерной реакции;
- установка на трубах систем охлаждения дивертора и первой стенки/бланкета отсечных клапанов;

— инжекция азота или инертного газа в ВК для уменьшения концентрации водорода и кислорода и др.

При максимальной проектной аварии установки ДЕМО-ТИН выброс наибольшей активности обусловлен тритием (до 360 ПБк).

Благодаря непрерывному выводу жидкосолевой топливной смеси с периодом выведения 10 сут активность продуктов деления и актинидов, находящихся в этой смеси, будет в 56 раз меньше, чем в реакторе, работающем на быстрых нейтронах той же мощности.

REFERENCES

1. Kolbasov B., Barnes C., Blevins J., Brunnader H., Epifanov A., Flanagan C., Hosobuchi H., Iida H., van der Krogt C., Kveton O., Leger D., Maisonnier D., Perkins J., Robinson D. ITER Plant Systems. ITER Documentation Series, № 35. — Vienna: IAEA, December 1991. 128 p.
2. Taylor N., Baker D., Cattaglia S. et al. Key Issues in the safety and licensing of ITER. — In: 9th International Atomic Energy Agency (IAEA) Technical Meeting on Fusion Power Plant Safety, 13—17 July 2009, IAEA Headquarters, Vienna, Austria, CD-ROM proceedings, Thursday, 2009-07-16.
3. Kolbasov B.N. 3rd IAEA technical meeting on the first generation of fusion power plants: design and technology (Vienna, 13—17 July 2009) and 9th IAEA technical meeting on fusion power safety (Vienna, 15—17 July 2009). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2009, issue 3, pp. 70—78. Electron version: http://vant.iterru.ru/vant_2009_3/14.pdf and <http://elibrary.ru/download/98331124.pdf>. [хрон8_4.doc](#) (in Russian).
4. Kuteev B.V., Alekseev P.N., Gladush G.G., Golikov A.A., Golubeva A.V., Goncharov P.R. et al. Sketch project of a demonstration fusion neutron source (FNS) with a D-T fusion capacity of not less than 10 MW. — Moscow, NRC «Kurchatov Institute», Inv. № 230-15/6971 of 5 December 2012 (in Russian).
5. Anderl R.A., Pawelko R.J., Smolik G.R., Scaffidi-Argentina F., Davydov D. Steam chemical reactivity of Be pebbles and powder. — Fusion Technology, 2000, vol. 38, № 3, pp. 283—289.
6. Xiao J., Travis J.R., Breitung W., Jordan T. Analysis of hydrogen risk mitigation measures for ITER. — In: 9th International Atomic Energy Agency (IAEA) Technical Meeting on Fusion Power Plant Safety, 13—17 July 2009, IAEA Headquarters, Vienna, Austria, CD-ROM proceedings, Thursday, 2009-07-16.
7. Gulden W. EU Safety activities for ITER licensing. — Ibid.
8. Biryukov A.Yu., Brikov V.A., Butsky V.D., Davydov D.A., Filatov V.V., Karpov D.A., Kolbasov B.N., Kozhevnikov V.M., Kurbatov D.K., Makhankov A.N., Makhonina E.V., Mazul I.V., Molchanov G.M., Petrov V.S., Pozdnyakov O.F., Romanov P.V. Dust Assessment. ITER Final Report of the RF Design Office. Task D3, August 1999, Efremov Institute, St. Petersburg. 83 p.
9. Scaffidi-Argentina F., Ciattaglia S., Coad P., Penzhorn R.D., Philipps V. et al. First wall material issues and related activities at JET. — J. of Nucl. Mater., 2002, vol. 307—311, pp. 1411—1417.
10. Azizov E.A., Alekseev P.N., Kuteev B.V., Belyakov V.A., Kalashnikov A.N., Lebedev S.V., Lopatkin A.V., Risovanyy V.D., Cherkovets V.E. The project of the trial hybrid reactor based on the tokamak (TGR) and the basic characteristics of the installations. Report on the Meeting on projects of Trial hybrid reactor (TGR) and Demonstration fusion neutron source (DEMO-FNS). Moscow: NRC «Kurchatov Institute», 17—18 February 2014 (in Russian).
11. Ignat'ev V.V. Needs in research for justification of molten-salt blanket FNSG. — In the same place (in Russian).
12. Kuteev B.V., Alekseev P.N., Golikov A.A., Golubeva A.V., Goncharov P.R., Gurevich M.I. et al. Technical project development of fusion neutron source (FNS) with capacity of not less than 10 MW. Report on the scientific research and experimental design work. State contract of 13.05.2013 № H.4x.44.90.13.1100. NRC «Kurchatov Institute», Inv. № 230-15/7014-13 of 5 December 2013 238 p. (in Russian).

AUTHORS

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

Received 9 June 2014

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2014, vol. 37, issue 3, pp. 31—37