ХРОНИКА.
1-Й МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР ПО ВОПРОСАМ ЭКОЛОГИИ,
БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКОНОМИКИ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

(остров Чеджудо, Республика Корея, 13 сентября 2015 г.)

Б.Н. Колбасов

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

1-й Международный семинар по вопросам экологии, безопасности и экономики термоядерной энергии состоялся 13 сентября 2015 г. на острове Чеджудо в Республике Корея. Он проводился в рамках кооперативной программы Международного энергетического агентства (МЭА) по соответствующим аспектам термоядерной энергии. В семинаре приняли участие около 40 специалистов из 12 институтов 10 стран. Были представлены доклады, посвящённые проблемам безопасности термоядерных установок (ТУ), их воздействию на окружающую среду, повышению коэффициента готовности ТУ, снижению риска, связанного с их эксплуатацией, и социально-экономическим аспектам термоядерной энергии. Наибольшее внимание было уделено различию в безопасности ТУ ИТЭР и ДЕМО и в требованиях к их лицензированию.

Ключевые слова: демонстрационная термоядерная установка, безопасность ТУ, воздействие ТУ на окружающую среду, экономика ТУ, Международное энергетическое агентство.

CHRONICLE.
1st INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENVIRONMENTAL,
SAFETY AND ECONOMIC ASPECTS OF FUSION POWER

(Jeju Island, Republic of Korea, 13 September 2015)

B.N. Kolbasov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The 1st International workshop on Environmental, Safety and Economic Aspects of Fusion Power (ESEFP) was held on 13 September 2015 at Jeju Island, Republic of Korea. The workshop was initiated in the frames of the International Energy Agency Implementing Agreement on a Co-operative Program of ESEFP. It was attended with about forty participants representing twelve institutions in ten countries. The presentations covered safety issues, environmental impacts, availability improvements, risk control, and socio-economic aspects of fusion power. Safety and licensing gaps between DEMO and ITER were discussed in depth.

Key words: fusion reactor DEMO, reactor DEMO safety, fusion environmental impact, fusion economics, International Energy Agency.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-3-99-104

ВВЕДЕНИЕ

Данный обзор написан на основе итогового отчёта о семинаре [1], подготовленного его организаторами и наиболее активными участниками.

Участники семинара пришли к единому мнению, что человечество будет нуждаться в термоядерной энергетике, если ТУ будут обеспечивать высокий уровень безопасности окружающего населения и персонала, слабо воздействовать на окружающую природу, иметь высокий коэффициент использования установленной мощности и замкнутый топливный цикл, а также быть экономически конкурентоспособными с другими системами, производящими энергию.

Опыт, приобретённый при разработке концепции безопасности реактора ИТЭР, претворение этой концепции в проект, обеспечивающий безопасность установки, анализы безопасности, проведённые под контролем представителей ядерных надзорных органов, обеспечение требуемого коэффициента готовности установки, рассмотрение мер по обращению с радиоактивными отходами и экономические оценки являются весьма полезным фундаментом для соответствующих разработок ТУ следующего за реактором ИТЭР поколения, обычно именуемых ДЕМО. Однако участники семинара отметили, что существует большой научный и технологический разрыв между программой сооружения реактора ИТЭР и будущими программами создания ТУ ДЕМО.

МЭА осуществляет программу, координирующую исследования и разработки в странах — участниках соглашения, которые способствуют получению лицензии на сооружение реактора ИТЭР и сооружению этой ТУ, а также проектированию энергетических ТУ следующего поколения. Программа МЭА по вопросам безопасности, экологии и экономики ТУ включает восемь задач:

- тритий внутри вакуумного корпуса;
- моделирование переходных теплогидравлических процессов и его поверочные испытания;
- продукты активации;
- база данных по частоте отказов;
- исследования, связанные с радиоактивными отходами;
- социальноэкономические аспекты термоядерной энергии;
- безопасность, связанная с магнитами;
- исследования энергетических ТУ.

В будущем МЭА намерено сконцентрировать усилия на устранении научного и технологического разрыва между установками ИТЭР и ДЕМО и на лучшем ознакомлении населения с термоядерными энергетическими программами.

Проведение семинара было предложено председателем исполкома программы МЭА И. Ву и единогласно поддержано членами исполкома, представляющими семь участников соглашения: Канаду, Китай, Республику Корея, Российскую Федерацию, США, Японию и Европейское сообщество по атомной энергии (Евратом).

Целями семинара были обмен информацией между учёными и инженерами разных стран по перечисленным задачам и расширение сотрудничества для решения стоящих проблем.

Члены исполкома стали одновременно членами оргкомитета семинара. На семинаре были представлены десять устных и девять стендовых докладов.

К. Алехалдре (C. Alejaldre), бывший заместитель генерального директора Международной организации ИТЭР (МО ИТЭР), сделал обзор опыта, полученного при обосновании безопасности реактора ИТЭР и его лицензировании [2]. Процесс лицензирования ИТЭР далеко ещё не закончен. Представители французского ядерного надзорного органа ASN рассматривают этот реактор как ядерную установку, обращая основное внимание на выполнение требований по безопасности к проекту установки, её строительной части, сборке, эксплуатации и выводу из эксплуатации. При анализе отчёта по безопасности реактора ИТЭР был достигнут дух взаимного доверия между МО ИТЭР и ASN. Продолжающееся обучение персонала МО ИТЭР и национальных агентств, участвующих в сооружении реактора ИТЭР, направлено на более глубокое понимание ядерной безопасности и лицензионного процесса, проходящего во Франции. Лицензионный процесс показал, что благодаря безопасности, присущей ТУ, требования, предъявляемые к методологии их анализа, менее жёстки, чем к методологии анализа ядерных установок деления. Главные усилия специалистов МО ИТЭР имели задачей убедить представителей ASN, что ИТЭР безопасен. Успех лицензионного процесса был основан на демонстрации проектной эффективности первого и второго барьеров удержания радиоактивности. Проектная безопасность реактора ИТЭР была подтверждена весьма малыми расчётными выходами радиоактивности при нормальной эксплуатации и авариях. Лицензирование ИТЭР будет ценным прецедентом для лицензирования будущих ТУ. При лицензировании ТУ особое внимание уделяется таким специфическим проблемам, как электромагнитные силы или взрывоопасность пыли внутри вакуумного корпуса.

Д. Перро (D. Perrault). Институт радиационной защиты и ядерной безопасности, Авиньон, Франция) сделал доклад о проблемах безопасности в проектах будущих ТУ [3]. Он подчеркнул, что безопасность ТУ должна рассматриваться уже на самых ранних стадиях проектирования с применением принципа ASARA (As Safe As Reasonably Achievable). Основное различие между ИТЭР и ТУ типа ДЕМО касается четырёх групп вопросов: дозы радиационного облучения, выхода радиоактивности, вредных отходов и возможных аварий. В ТУ типа ДЕМО будет более высокая термоядерная мощность, более длительная термоядерная реакция, большее количество трития, вblankете будет воспроизводиться тритий и, по-видимому, появятся новые материалы. Появятся дополнительные пути утечки трития и новые сценарии возможных аварий. Отличаться также будут вероятности аварий и их последствия. Докладчик предложил при проектировании ТУ ДЕМО определить, является ли отвод тепла радиоактивного распада функ-

цией безопасности (в ИТЭР эту функцию исключили из числа функций безопасности). Следует продолжить разработку систем дистанционного обслуживания и слабо активируемых материалов для уменьшения радиоактивного облучения персонала. Требуется пересмотреть сценарии аварий, принятые при проектировании ИТЭР, и определить новые сценарии аварий, характерные для ТУ типа ДЕМО. Должны быть рассмотрены возможные пути уменьшения количества трития в ТУ и основных утечек трития из установок.

И. Ву (Y. Wu. Китайская академия наук) сделал обзор проводимых в Китае НИОКР по безопасности ТУ, проиллюстрировав его графиком предстоящих работ. Эти работы охватывают расчёты нейтронных потоков и накопленной радиоактивности, теплогидравлические характеристики ТУ и ослабление последствий аварий, надёжность ТУ и уменьшение рисков, количество трития и воздействие на окружающую среду, а также социоэкономические аспекты термоядерной энергетики. Значительный прогресс достигнут в разработке вычислительной программы (ВП) SuperMC [4] и сооружении генератора термоядерных (D—T) нейтронов высокой интенсивности (HINEG — High Intensity Fusion Neutron Generator) [5]. Программа SuperMC принята в качестве справочной вычислительной программы МО ИТЭР. Она используется более чем в 600 институтах приблизительно 50 стран. HINEG-I с интенсивностью 10^{12} н/с начал эксплуатироваться. Завершён концептуальный проект установки HINEG-II с интенсивностью 10^{14} — 10^{15} н/с. НИОКР, проведённый по основной технологии HINEG-II, показал технико-экономическую осуществимость тритиевой мишени этой установки. Сооружается экспериментальная петля Dragon-V для исследований теплогидродинамических характеристик и обоснования технического проекта воспроизводящих тритий бланкетов на основе эвтектики Pb—Li с двумя теплоносителями (включая гелий), предназначенных как для модуля воспроизводящего тритий бланкета, который будет установлен в ИТЭР, так и для китайского проекта реактора ДЕМО. Докладчик рассказал также о ВП для оценки надёжности и вероятностных характеристик безопасности ТУ (RiskA 4.0), программе анализа тритиевых характеристик ТУ (TAS 3.0), экспериментах по миграции трития, разработке программы системного анализа и её применению.

Д. Панайотов (D. Panayotov. Fusion for Energy) сделал обзор исследований безопасности атомных электростанций и применяемой при этом методологии, которые приложимы к ТУ, а также основных проблем в этой области, с которыми может столкнуться проектирование ТУ. В частности, он рассмотрел применяемые и разрабатываемые компьютерные вычислительные программы и оценки их погрешностей. Опыт, приобретённый в ядерной энергетике, может и должен быть также использован при разработке основ надзорных требований к энергетическим ТУ, вероятностной оценке риска (или вероятностной оценке безопасности), а также вычислительным методам гидродинамики и их применению при проектировании ТУ. Большое значение имеют использование и сохранение экспериментальных данных при разработке ВП и методов обеспечения безопасности. Организация Fusion for Energy при анализе возможных аварий воспроизводящих тритий бланкетов ТУ продемонстрировала эффективность применения метода, использующего идентификацию явлений и таблицу ранжировки [6]. Докладчик призвал расширить технические контакты со специалистами по безопасности, работающими в области ядерной энергетики.

Б. Меррилл (B. Merrill. Национальная лаборатория в Айдахо, США) сделал обзор компьютерных ВП, разработанных в рамках исследований по безопасности ТУ в Национальной лаборатории в штате Айдахо, США. Особое внимание он уделит трём ВП. MELCOR, которая учитывает особенности реактора ИТЭР, — это полностью интегрированная ВП для теплогидродинамических компьютерных расчётов. ВП MELCOR 1.8.6, переработанная для ТУ [7], прошла стандартную проверку (benchmarking) и передана организациям, применяющим MELCOR, через Сандийскую национальную лабораторию в Нью-Мексико в августе 2015 г. Существенные изменения в американских проектах ТУ будут по просьбе Комиссии по ядерному регулированию (Nuclear Regulatory Commission) США отражены в новой версии программы MELCOR 2.x. MAGARC — это программа для расчётов электромагнитных характеристик, переноса энергии излучением и трёхмерных расчётов теплопроводности в магнитах и при плавлении. В частности, эта ВП позволяет рассчитать по уравнениям Максвелла напряжения и токи, при которых при неослабленной потере сверхпроводимости в магнитной катушке (квенче) образуются электрические дуги, внутренние пробои и пробои электрической изоляции. MAGARC будет включена в систему

ВП ANSYS по контракту с МО ИТЭР. TMAP — программа для расчётов миграции изотопов водорода, в частности, трития в материалах. Эта программа прошла поверку по термодесорбции трития на установке TPE (Tritium Plasma Experiment). После окончания проводящихся улучшений будет выпущена система программ MELCOR-TMAP 1.8.6 для ТУ.

Х. Гризолиа (Ch. Grisolia. Комиссариат по атомной энергии, Франция) посвятил свой доклад абсорбции трития в образующейся в токамаке вольфрамовой пыли и десорбции трития из этой пыли для оценки влияния этих процессов на работу токамака и его безопасность. Исследовались размер частиц пыли и их форма (удельная площадь поверхности частицы), химический состав пыли и допустимое с точки зрения безопасности количество пыли в вакуумном корпусе токамака. Рассматривались механизм образования частиц пыли, их характеристики и поведение частиц вольфрама в биологических средах. Количество трития в вольфрамовой пыли стабильно при комнатной температуре, но почти весь тритий выходит из пыли при приближении её температуры к 500 °С. Активность трития в вольфрамовой пыли превышает 1 ГБк/г, что в 100 раз больше соответствующей активности в твёрдом куске вольфрама. Скорость выхода трития из вольфрамовой пыли пропорциональна удельной площади поверхности частицы. Если все частицы трития в ИТЭР будут такими же, как в описываемых исследованиях, то в тонне вольфрамовой пыли, находящейся в вакуумном корпусе ИТЭР, будет содержаться около 50 г трития, что намного меньше предела по безопасности, принятого для ИТЭР. Однако если часть пыли при температуре около 100 °С контактирует с газообразным тритием (~10 Па), то количество трития в этой части пыли будет эквивалентно 1 ГБк/г менее чем через 1000 импульсов длительностью 10 с. Выход трития из вольфрамовой пыли, растворённой в водном растворе, происходит в течение 10—40 суток [8]. В кислотной среде этот процесс длится менее 10 суток. Вольфрамовая пыль, не содержащая трития, ограниченно воздействует на лёгочный эпителий человека. В настоящее время проводятся исследования совместного химического и радиологического воздействия наночастиц вольфрама, содержащих тритий, на человека.

М. Цуккетти (M. Zucchetti. Туринский политехникум, Италия) не смог присутствовать на семинаре, но его доклад, подготовленный специально для семинара, был распространён среди участников семинара. В докладе содержался обзор работ по обращению с радиоактивными отходами, проведённых в рамках Программы МЭА по вопросам безопасности, экологии и экономики ТУ, и излагалась оптимальная стратегия обращения с радиоактивными отходами ТУ. Эта стратегия предусматривает, по возможности, исключение захоронения радиоактивных отходов в глубинных геологических слоях Земли, максимальный рециклинг (возврат в производственный цикл ядерной промышленности) радиоактивных материалов и клиренс (вывод из-под контроля надзорных органов) и передачу на коммерческий рынок материалов, содержащих ничтожные количества радиоактивности [9]. В США изучались технические вопросы, связанные с рециклингом радиоактивных материалов. В Европейском Союзе и США проводилась оценка количества трития в извлечённых из ТУ материалах [10]. В Китае рассматривалась возможность захоронения радиоактивных отходов, содержащих тритий, и разрабатывались методы захоронения с минимальной выдержкой отходов. Некоторые исследования, проведённые в России, показали, что потенциальные потребности в бериллии для термоядерной энергетики могут превысить мировые ресурсы бериллия, если не будет реализован рециклинг бериллия. Концентрация урановых примесей в бериллии, производимом в настоящее время, такова, что радиоактивность облучённого бериллия будет определяться, главным образом, урановой примесью, в частности, урановая примесь исключает возможность условного клиренса облучённого бериллия и затрудняет его захоронение [11]. В последние годы материаловеды рассматривали рециклинг облучённых материалов в случаях охрупчивания конструкционных компонентов, эрозии компонентов, обращённых к плазме, и коррозии ферритных сталей в жидких металлах [12]. В США изучается возможность замены вольфрама в качестве материала, обращённого к плазме, другим материалом [13].

Т. Пинна (T. Pinna. Национальное агентство по новым технологиям, энергии и окружающей среде, Италия) рассмотрел основные проблемы, связанные с надёжностью и коэффициентом готовности ТУ при анализе рисков, соотношение между анализами надёжности и готовности, с одной стороны, и безопасности, с другой стороны, некоторые приёмы и методологии, применяемые при анализе рисков, например, анализы видов аварий и их последствий (Failure Mode and Effect Analyses), анализы последствий аварий и критичности (Failure Mode Effect and Criticality Analyses), дерево развития событий, блок-схему

надёжности (Reliability Block Diagrams), эксплуатационные характеристики (виды аварий, их частоту, среднюю продолжительность ремонта), принципы проведения анализа надёжности, готовности, ремонтпригодности и контролируемости (НГРК — Reliability, Availability, Maintainability and Inspectability) и программу обеспечения НГРК в ТУ ДЕМО и других будущих ТУ [14]. Целями исследований надёжности и готовности ТУ являются изучение событий и отклонений от нормальной работы, которые могут привести к прекращению работы ТУ, разработка технических решений, позволяющих избежать прекращения работы системы или установки, и определение вероятности того, что система или установка способна выполнять свои функции в течение определённого времени или определённого числа рабочих импульсов. Ожидается, что надёжность и готовность установки будут играть важную роль в вероятностном анализе безопасности при определении вероятностных критериев и при формулировке предположений, основанных на анализе надёжности. Частота отказов была определена на основе опыта эксплуатации ТУ. Принципы анализа НГРК будущих ТУ сформулированы на основе анализа НГРК существующих установок.

Д. Ван Хутте (D. Van Houtte. Комиссариат по атомной энергии, Франция) посвятил свой доклад необходимости увеличить коэффициент готовности (КГ) ТУ, остановившись на двух вопросах: почему необходимо повысить КГ и как это сделать? КГ современных ТУ около 15%, что намного меньше КГ, запланированного для ИТЭР (46%). Достигнутый в современных ТУ КГ близок к КГ, ожидаемому в ТУ типа ДЕМО на ранней стадии их эксплуатации, но чтобы энергетическая ТУ могла экономически конкурировать с другими источниками энергии, требуется КГ не менее 75%, так как надёжность компонентов и их ремонтпригодность существенно влияют на КГ ТУ. Поэтому в проектах ТУ типа ДЕМО следует стремиться к максимальному повышению этих характеристик. Кроме увеличения надёжности и длительности безаварийного функционирования систем ТУ, следует максимально сократить длительность ремонтных операций и обслуживания радиоактивных систем ТУ с применением дистанционного оборудования и горячих камер [15]. Поэтому задача достижения высокого КГ должна решаться уже на стадии концептуального проектирования установок ДЕМО и рассматриваться как основа коммерческого успеха будущих энергетических ТУ.

С. Кониси (S. Konishi. Киотский университет, Япония) рассмотрел социоэкономические аспекты термоядерной энергетики. Современные проекты энергетических ТУ, как правило, предполагают, что термоядерные электростанции (ТЭС) будут подключены к крупным электросетям. Однако у большинства будущих потребителей электроэнергии такие энергосистемы могут отсутствовать. Поэтому докладчик рассмотрел возможный сценарий работы ТЭС в электросетях малого размера с ограниченной устойчивостью. В этом случае следует применить аккумуляторы электроэнергии. Рассмотрение в проектах ТЭС социоэкономических вопросов должно способствовать внедрению термоядерной энергии в энергетический рынок. ТЭС должны предъявлять минимальные требования к электросетям (к их мощности, её изменению во времени, управляемости и устойчивости), быть способными производить альтернативное топливо (в частности, биотопливо) и значительно способствовать снижению эмиссии CO_2 в атмосферу. Термоядерная энергетика сможет найти применение в будущем только при жёстких требованиях относительно отсутствия воздействия на окружающую среду, например, если будет осуществлён сценарий А1Т, описанный в Special Report on Emission Scenario, выпущенном Межправительственной группой экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change — IPCC) [16]. Этот сценарий предусматривает, что население Земли достигнет максимума в середине текущего века, к этому времени произойдёт быстрый экономический рост и потребуется снижение эмиссии CO_2 .

ОБСУЖДЕНИЕ

Дискуссия на семинаре в основном касалась безопасности ТУ типа ДЕМО и различия в лицензионных требованиях к этому типу ТУ и ИТЭР. Участники семинара отметили:

- острый недостаток данных о частоте отказов оборудования;
- необходимость глубоко исследовать возможность взрывов водорода и пыли с целью сохранения герметичности барьеров удержания радиоактивности (вакуумного корпуса и стен реакторного здания);
- необходимость лучшего понимания электромагнитных сил, возникающих при срывах тока плазмы;
- возможность возвращения функции отвода тепла радиоактивного распада в число функций безопасности;

— необходимость всестороннего рассмотрения новых проектных условий, появляющихся при переходе от ИТЭР к ТУ ДЕМО;

— необходимость разработки надёжных мер безопасности, исключающих аварийный выход радиоактивности за пределы реакторной площадки;

— отсутствие доказательств, что предельная утечка трития из ИТЭР при нормальной работе не будет превышать;

— неопределённость предельной проектной утечки трития при нормальной работе для ТУ ДЕМО;

— необходимость увеличения доли трития, потребляемого при термоядерной реакции, для уменьшения общего количества трития в установке;

— необходимость разработки дистанционного обслуживания для уменьшения облучения персонала;

— необходимость дальнейшей разработки малоактивируемых материалов и лучшего понимания накопления трития в материалах.

Среди других важных проблем назывались:

— проверка и сертификация вычислительных программ;

— дальнейшая разработка методологии оценки безопасности ТУ;

— увеличение вовлечения промышленности в проектирование;

— более широкое применение методов обеспечения безопасности, применяемых на АЭС;

— недостаточно глубокое проектирование ТУ ДЕМО, чреватое большим числом неизвестных опасностей.

Исполком решил, что следующий 2-й Международный семинар по вопросам экологии, безопасности и экономики термоядерной энергии состоится в сентябре 2017 г. в Киото (Япония) в связи с 13-м Международным симпозиумом по ядерным аспектам термоядерной энергии.

REFERENCES

1. Wu Y., Stevens E., Kim K., Maisonnier D., Kalashnikov A., Tobita K., Jackson D., Alejaldre C., Perrault D., Panayotov D., Merrill B., Grisola C., Zucchetti M., Pinna T., Van Houtte D., Konishi S., Kolbasov B. Summary of the 1st International workshop on environmental, safety and economic aspects of fusion power. 13 September 2015, Jedu Island, Republic of Korea (to be published in Nuclear Fusion, NF-101195.R1).
2. Rodriguez-Rodrigo L. et al. — Fusion Science and Technology, 2009, vol. 56, № 2, pp. 809—813.
3. Perrault D. — Fusion Eng. Des. (in press), doi:10.1016/j.fusengdes.2015.10.012.
4. Wu Y. et al. — Annals of Nuclear Energy, 2014, vol. 82, pp. 161—168.
5. Wu Y. et al. — Intern. J. of Energy Research (in press).
6. Panayotov D. et al. — Fusion Eng. Des. (in press), doi:10.1016/j.fusengdes.2015.11.019.
7. Merrill B.J. et al. — Fusion Eng. Des., 2010, vol. 85, № 7, pp. 1479—1483.
8. Anik M. et al. — J. of the Electrochem. Soc., 2002, vol. 149, № 6, B224.
9. Kolbasov B.N. et al. — Fusion Eng. Des., 2014, vol. 89, № 9—10, pp. 2013—2017.
10. El-Guebaly L., Zucchetti M. — Fusion Science and Technol., 2015, vol. 68, pp. 484—491.
11. Kolbasov B.N. et al. — Fusion Eng. Des. (in press), doi:10.1016/j.fusengdes.2016.02.073.
12. El-Guebaly L. et al. — Fusion Science and Technol., 2015, vol. 67, № 1, pp. 107—124, 179—192.
13. Brooks J.N. et al. — Nuclear Fusion, 2015, vol. 55, № 4, p. 043002 (7 p.).
14. Pinna T. et al. — Fusion Science and Technol., 2015, vol. 67, № 3, pp. 531—534.
15. Van Houtte D. et al. — Fusion Eng. Des., 2012, vol. 87, № 5, pp. 652—656.
16. Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge, UK, Ed. by Nakicenovic N., Swart R. Cambridge University Press, 2000, p. 612.

AUTHORS

Kolbasov B.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; bkolbasov@yandex.ru

Received 27 June 2016

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 3, pp. 99—104.