



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 18 за 2009 г.



Масленников М.В., Орлов Ю.Н.

Сравнительный анализ
перспективных концепций
реакторных камер ИТС

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Масленников М.В., Орлов Ю.Н. Сравнительный анализ перспективных концепций реакторных камер ИТС // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2009. № 18. 24 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2009-18>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Российской Академии наук**

М.В. Масленников, Ю.Н. Орлов

**Сравнительный анализ перспективных концепций
реакторных камер ИТС**

Москва - 2009

М.В. Масленников, Ю.Н. Орлов. Сравнительный анализ перспективных концепций реакторных камер ИТС. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2009, 24 страницы, 3 рисунков, библиография: 29 наименований.

Рассматриваются варианты реализации инерциального термоядерного синтеза как энергетической концепции в контексте перспектив развития атомной энергетики. Анализируются возможные конструкции реакторных камер в современных проектах ИТС.

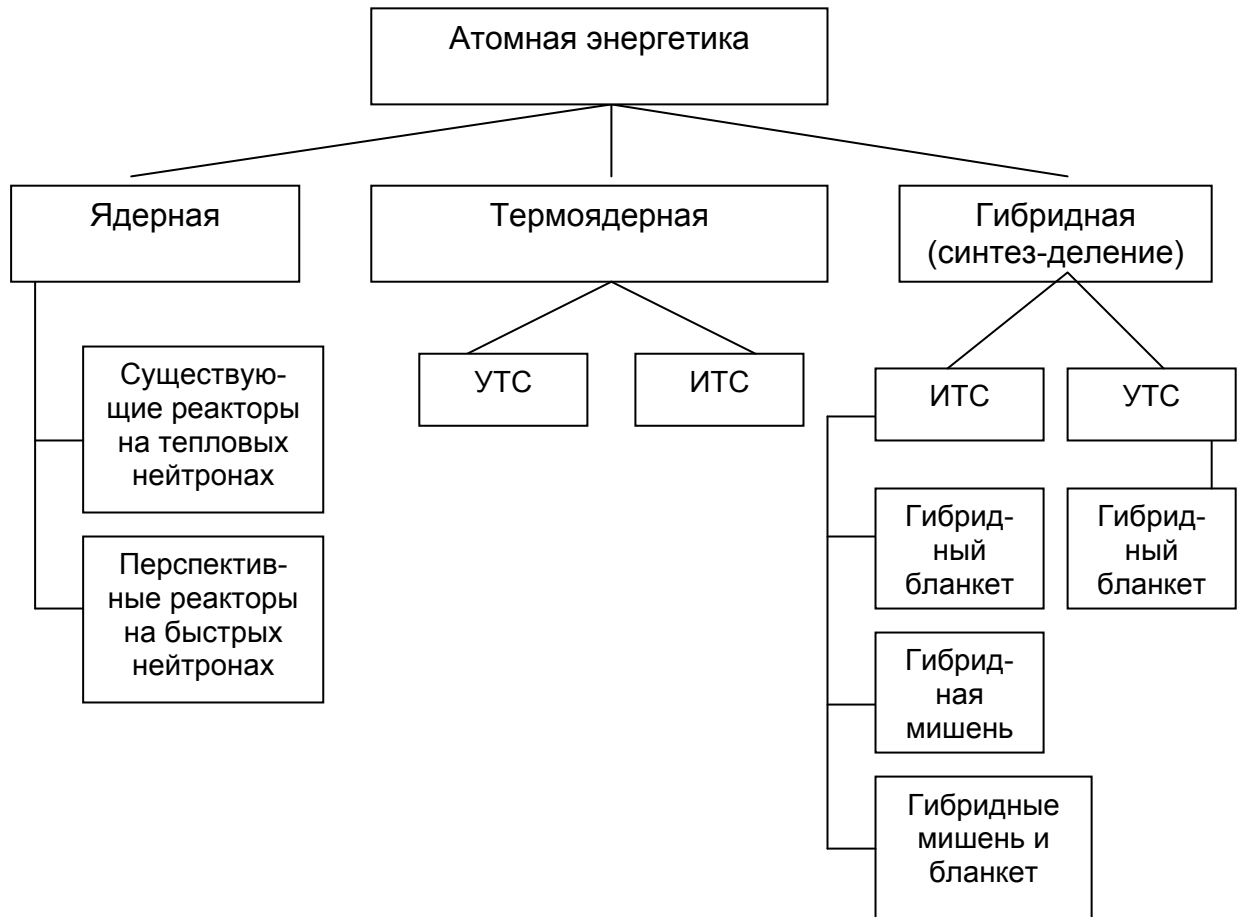
M.V.Maslennikov, Y.N.Orlov. Comparison of perspective reactor chamber concepts for IFE. Preprint, Inst. Appl. Mathem., Russian Academy of Sciences, 2009, 24 Pages, 3 Figures, 29 References.

The variants of perspective inertial fusion energy concept realization are discussed in the frame of developing of nuclear energy. The current construction projects of reactor chambers for IFE are analyzed.

1. Современные программы развития атомной энергетики

Настоящая работа представляет собой обзор современных разработок реакторных камер в концепциях инерциального термоядерного синтеза (ИТС). Эти разработки рассматриваются как перспективные для будущего развития атомной энергетики в целом. Схематично место ИТС в будущей атомной энергетике (АЭ) показано на рис. 1.

Рис. 1. Варианты энергоустановок в АЭ



Роль и место термоядерных реакторов, как чистых, так и гибридных, будет во многом определяться развитием собственно ядерных реакторов деления.

Ядерно-термоядерным гибридным энергетическим реактором называется перспективная установка, предназначенная для преобразования энергии, выделенной в ней ядерными (деление) и/или термоядерными (синтез) источниками, в электроэнергию или, возможно, в тепло.

Конструкция реактора и процессы, происходящие в нём, определяются особенностями источников энергии. В ядерном реакторе это энергия деления тяжелых элементов (урана, плутония), в термоядерном – энергия синтеза легких элементов (гелия из дейтерия и трития), в гибридном реакторе – комбинация этих двух процессов, способная при определенных технических решениях усиливать каждый из них.

Следует сказать, что развитие УТС (управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием) и ИТС происходит в условиях начавшегося ренессанса собственно атомной энергетики. Этот ренессанс смягчает остроту ожидания рождения термоядерной энергетики и, как следствие, приводит к перераспределению общественной и государственной поддержки между АЭ и УТС в пользу АЭ.

Справка о состоянии атомной энергетики в России:

за 18 лет и 1 месяц между 12.12.1971 (запуск блока № 3 ВВЭР-440 Нововоронежской АЭС) и 13.01.1990 (запуск блока № 3 РБМК-1000 Смоленской АЭС) всего было введено в строй 28 энергоблоков общей электрической мощностью в 20242 МВт, из них 6 блоков ВВЭР-440, 6 блоков ВВЭР-1000, 11 блоков РБМК-1000, 4 блока ЭГП-6 и 1 блок БН-600;

за следующие 10 лет XX века (01.01.1991 – 31.12.2000) был запущен только один энергоблок: ВВЭР-1000, Балаковская АЭС, 11.04.1993;

в XXI веке (01.01.2001 – 31.12.2007) запущен один энергоблок: ВВЭР – 1000, Волгодонская АЭС, 30.03.2001.

Ренессанс АЭ вызван истощением запасов углеводородного топлива, ростом энергопотребления и, отчасти, политическими обстоятельствами. К тому же развитие систем безопасности АЭ повышает общественное доверие к АЭ. Однако пока единственным проявлением этого ренессанса стали международные и национальные программы развития АЭ.

Среди международных чаще всего упоминаются следующие три программы.

1. INPRO (Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles Programme) является долгосрочным проектом, начавшимся по инициативе МАГАТЭ (Международное Агентство по Атомной Энергии) в 2000 г. Его цель – разработка новых типов ядерных энергетических установок (ЯЭУ) и установок по переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В последние годы INPRO финансируется за счёт бюджета МАГАТЭ. В проекте занято 28 участников – государств-членов МАГАТЭ.

2. GEN IV (Generation IV Nuclear Energy Systems Ten-Year Program Plan). Проект создан по инициативе США в 2004 г. Департамент Энергетики США (DOE) разработал Стратегию Реализации GEN IV, которая ориентирует GEN IV на достижение двух важнейших (для США) целей:

- спроектировать АЭС следующего поколения, которая обеспечила бы в среднесрочной перспективе экономически эффективное производство водорода и электроэнергии;

- создать реактор на быстрых нейтронах для вовлечения в топливный цикл природного урана и переработки ОЯТ.

Для достижения этих целей принимается решение провести в ближайшие десять лет обширные НИОКР над шестью новыми типами ЯЭУ:

- высокотемпературный тепловой ядерный реактор в комбинации с соответствующим открытым ядерным топливным циклом (ОЯТЦ);

- три типа быстрых реакторов с замкнутыми ядерными топливными циклами (ЗЯТЦ): газоохлаждаемый реактор и два реактора с разными жидкометаллическими теплоносителями (Na и Pb);

- тепловой реактор с перегретой выше критической точки водой в качестве теплоносителя;

- реактор с циркулирующим жидким топливом (расплавленные соли) и непрерывной его очисткой от продуктов деления.

Сообщество стран-участников этого проекта сложилось до оформления Ten-Year Program Plan, в 2001 г. Это сообщество получило название GIF (Generation IV International Forum). Сначала в GIF вошли США, Англия, Франция, Канада, Япония, Аргентина, Бразилия, Южная Корея и ЮАР. Эти страны подписали Хартию GIF – документ, констатирующий интерес к GEN IV, но не обязывающий подписавших принимать участие в работах по его планам. Затем к Хартии присоединились Швейцария (2002), Евратом (2003), Китай и Россия (2006). Было создано Рамочное Соглашение (FA). Участники, подписавшие FA, обязываются участвовать в разработке одного или нескольких из шести упомянутых выше реакторов. Из тринадцати участников Хартии пять (Англия, Россия, Аргентина, Бразилия и ЮАР) пока не входят в FA.

3. Проект GNEP (Global Nuclear Energy Partnership) создан по инициативе США в 2006 г. Его цель – двустороннее международное сотрудничество в области ядерной энергетики. США заключили соглашения с Японией, Россией, Китаем и Австралией. Основой каждого соглашения является Двусторонний План Действий. В частности, План Действий США – Россия подписан в декабре 2006 г. и состоит из семи разделов:

- Global Nuclear Energy System Concept Development;
- Transuranic Fuels Development and Testing;
- Exportable Small and Medium Power Nuclear Power Plants;
- Methodology for Establishing International Fuel Centers;
- Advanced Monitoring, Control and Accounting Technologies Throughout the Nuclear Fuel Cycle;
- Fast Spectrum Reactor;
- Advanced Spent Fuel Processing and Waste Management.

В России действует ФЦП «Развитие атомного промышленного комплекса России на 2007-2011 гг. и на перспективу до 2015 г.», которая была принята 06.10.2006 г. Перечень мероприятий ФЦП включает, в том числе, следующие:

1. «Развитие мощностей атомных электростанций».

Планируется реализация проекта серийного энергоблока с реактором типа ВВЭР.

Планируется достройка энергоблоков ВВЭР-1000 (по одному на Ростовской и Калининской АЭС) и ввод их в эксплуатацию в 2009 г. и 2011 г. соответственно.

Начиная с 2007-2008 гг. планируется строительство ежегодно двух энергоблоков АЭС с реакторами типа ВВЭР, в том числе новых серийных, цикл строительства которых составляет 5 лет (отметим, что ни одного нового блока пока не введено).

Таким образом, к окончанию срока реализации Программы на АЭС планируется ввести в эксплуатацию 10 новых энергоблоков общей электрической мощностью не менее 9,8 ГВт, еще 10 энергоблоков будут находиться на различных стадиях строительства.

2. «Развитие и реконструкция производственных мощностей организаций ядерного топливного цикла».

3. «Развитие мощностей по обращению с ОЯТ и радиоактивными отходами (РАО) на атомных электростанциях и подготовка к выводу из эксплуатации энергоблоков атомных электростанций».

4. «Переход к инновационным технологиям развития атомной энергетики».

В рамках этого пункта предполагается строительство на Белоярской АЭС энергоблока № 4 с реактором типа БН-800, предназначенного для отработки технологии ЗЯТЦ, обеспечение этого реактора уран-плутониевым МОКС-топливом (Mixed Oxide Fuel). Предполагаемый срок ввода в эксплуатацию – 2012 г.

Очень важным моментом в перспективах АЭ является **обеспечение безопасности** при производстве энергии и хранении отходов. По словам академика В.И. Субботина «... опасная ядерная энергетика не имеет права на существование». И хотя при работе в штатном режиме экологическое воздействие от АЭС существенно меньше, чем от тепловых станций, но вероятность аварий с тяжелыми последствиями может свести на нет это преимущество. В этой связи создание концепции ядерного реактора с повышенным уровнем безопасности представляет большую важность. Такая концепция могла бы быть построена на основе гибридной схемы, когда термоядерная реакция является источником быстрых нейтронов для подкритического blankets с делящимися элементами. В этой связи устойчивость функционирования термоядерного реактора является одной из центральных задач. Сравнительному анализу различных вариантов таких реакторов в рамках ИТС и посвящена данная работа.

2. Современные проекты реакторов ИТС

В настоящее время разработан целый ряд концептуальных проектов реакторов для ИТС, согласованных с лазерным драйвером, легкоионным или тяжелоионным ускорителями, а также с мощными импульсными диодами.

При компоновке взаимосогласованного ансамбля «драйвер-мишень-реактор» наибольшие преимущества демонстрируют концепции реакторов, построенных на основе тяжелоионного драйвера. В них требуется наименьшее количество окон ввода излучения в камеру, а магнитные фокусирующие линзы не находятся под прямым воздействием нейтронов. В

проектах таких реакторов в качестве многофункционального теплоносителя используются жидкие литий-содержащие эвтектики с рабочей температурой порядка 500 °С. Подробные концептуальные проекты энергетических термоядерных установок на основе ионных пучков представлены в отчетах Kernforschungszentrum (Германия) по проектам HIBALL-II [1] и LIBRA [2]. Отдельные важные узлы энергетических установок разрабатывались в проектах OSIRIS [3], PROMETHEUS-H [4], LIBRA-SP [5], NYLIFE-II [6], SOMBRERO [7] и ряде других, описанных в обзоре [8].

Нашей задачей является описание отклика первой стенки камеры реактора на микровзрыв, в связи с чем в вышеуказанных проектах мы уделим основное внимание именно этой составляющей концепции.

Реактор ИТС представляет собой прочную камеру, окруженную бланкетом для утилизации тепла термоядерного микровзрыва, который, в свою очередь, окружен бетонной радиационной защитой. Стенки реактора имеют необходимое число отверстий для инъекции мишеней, ввода пучков, откачки газов, ввода и вывода теплоносителя. Конструктивный облик реактора определяют следующие факторы: тип драйвера, защита стенки и тип бланкета. Также на конструкцию реактора оказывают существенное влияние способы очистки полости реактора от паров и капель (частиц) материала, образующего поверхность первой стенки.

Среди методов защиты первой стенки рассматриваются преимущественно два подхода: покрытие пористой поверхности стенки жидкой пленкой теплоносителя и струйный жидкий бланкет, внутри которого создается динамическая полость для организации микровзрыва. Выбор между этими подходами затруднен, так как не накоплен еще необходимый объем данных об эффективности защиты и стойкости конструкции первой стенки. Другие методы защиты разработаны слабо и, кроме того, трудно реализуемы.

Обеспечение защиты первой стенки тесно связано с проблемой эвакуации продуктов взрыва и испарения первой стенки из полости реактора. Оценки показывают, что может быть осуществлена быстрая конденсация паров. Однако, реальное время очистки полости реактора, по-видимому, определяется удалением микрокапель, заполняющих полость реактора в результате распыления жидкой пленки или струи под ударным воздействием рентгеновского излучения и, возможно, потока ионов. В этом случае время очистки реактора за счет гравитационного осаждения капель может быть очень большим, порядка 1с. Пока не предложено эффективных активных методов очистки реактора от капель за исключением единственного проекта NYLIFE-II со струйным жидким бланкетом [6].

Конструктивная схема бланкета, наряду с защитой первой стенки, определяется поглощением энергии нейтронов и наработкой трития. В принципе эти три функции могут быть обеспечены единым теплоносителем, например, расплавами эвтектики $Li_{17}Pb_{83}$ или соли Li_2BeF_4 . В этом случае в конструкции бланкета, как правило, применяются одни и те же материалы,

совместимые с теплоносителем. Возможно обеспечение этих функций различными наборами теплоносителей и материалов для каждой из зон энерговыделения. Рассмотрим основные варианты таких конструкций.

В проекте NYLIFE-II [6] blanketом служит динамическая струйная структура, образующая объем жидкости с внутренней полостью. Стенки жидкого объема имеют толщину достаточную для поглощения нейтронов. Эта схема привлекательна тем, что в полости предположительно отсутствуют микрокапли, препятствующие транспорту пучка к центру полости, где происходит микровзрыв мишени.

Полость образуется посредством соединения и разъединения двух струй, истекающих из поворачивающихся сопел. Положительным моментом этой схемы является минимальное облучение нейтронами конструктивных элементов камеры реактора.

Протяженность камеры реактора NYLIFE-II достаточно велика, чтобы позволить многократное расширение жидкой структуры вследствие испарения после микровзрыва. Инжекция ионных пучков осуществляется через решетку горизонтальных и вертикальных струй. Фокусировка пучков обеспечивает не прямой поджиг мишени.

Следует отметить, что пока нет данных экспериментов или моделирования по поведению жидкой структуры blanketа и его воздействию на конструкцию камеры, схема NYLIFE-II представляется слабо обоснованной. Ключевыми вопросами здесь, по-видимому, являются: возмущение внутренней поверхности полости различными гидродинамическими эффектами, опасными с точки зрения распыления капель в полости, и генерация ударных волн в истекающих струях, воздействующих на конструкцию сопел. В последних публикациях по проекту NYLIFE-II [9] сплошные струи, образующие динамический blanket, заменены эквивалентным множеством струй достаточно тонких, чтобы воздействие ударных волн было минимальным. При этом, однако, возникают новые вопросы: о защите большого количества сопел и динамике образования полости из множества нестационарных струй.

Недостатком реактора с жидким blanketом является малый перепад температур теплоносителя и, соответственно, большой расход теплоносителя в реакторе. В результате 80% расхода теплоносителя байпасируется в обход промежуточного теплообменника, т.е. возвращается в реактор при максимальной температуре подогрева. Тем не менее, разработки реактора с жидким струйным blanketом представляют значительный интерес, так как активная очистка полости для микровзрыва позволяет увеличить частоту и поглощение нейтронов в жидкости, что обеспечивает минимальную активацию и максимальный ресурс конструкционных материалов.

В другом проекте Cascade [10] вместо жидкости в качестве подвижного текучего blankets рассматривалось использование гранулированной керамики из Li_2O . Достаточно толстый слой гранул удерживается на конической поверхности за счет центробежных сил при ее вращении. Камера реактора имеет биконическую геометрию. Вращающийся слой гранул движется по коническим стенкам к среднему наибольшему сечению камеры и сыпается в приемный коллектор. При микровзрыве происходит абляция гранул, расположенных на поверхности, и нейтронный прогрев вращающегося слоя гранул. Температура керамики на выходе камеры предполагается высокой (порядка 1440К), что должно обеспечить высокий к.п.д. энергоустановки. Схема реактора Cascade представляется экзотичной из-за существенных технологических трудностей организации транспорта сыпучего теплоносителя в контуре установки при огромном перепаде давлений в теплообменниках и камере. Кроме того, не рассмотрен вопрос об очистке полости камеры от пыли, образующейся при абляции гранул, а также не приведены оценки времени восстановления регулярного вращающегося слоя после микровзрыва.

Реактор со смоченной первой стенкой.

В данном типе реакторов используется защита первой стенки жидкой пленкой теплоносителя. Жидкая пленка поглощает сверхмощные потоки энергии рентгеновского излучения и ионов материала мишени в тонком поверхностном слое в процессе абляции – испарения и дробления на капли. Защитная пленка создается на пористой поверхности первой стенки за счет перепада давления в подводящих каналах и полости камеры реактора. Выделение энергии нейтронов происходит в blankets с проточным теплоносителем. Пленочная защита рассматривалась как в отечественных разработках [11], [12], так и в зарубежных [1], [2], [3], [5], [6]. Наиболее детально конструктивная схема реактора разработана в концептуальных проектах HIBALL-II [1] и LIBRA [2].

Камера реактора LIBRA имеет цилиндрическую геометрию. В этом проекте цилиндрическая часть blankets образована из отдельных трубок с теплоносителем. Трубки изготовлены из пористого матерчатого материала на основе SiC. Теплоносителем является эвтектика $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$, которая под давлением выдавливается на поверхность, где образует жидкую пленку. Смоченная поверхность труб имеет большую площадь, что способствует конденсации паров испарившейся в результате микровзрыва части пленки. Стекающий по стенкам теплоноситель собирается на дне цилиндрической камеры, образуя жидкий blanket.

Существенно проблематичным в этом проекте представляется конструктивное оформление blankets в верхней крышке цилиндрической камеры. Здесь первая стенка изготовлена из пористого матерчатого материала SiC, образующего радиальные фалды на конической поверхности

крышки камеры. Несущая часть blankets имеет коробчатую конструкцию с протоком теплоносителя.

Иное конструктивное решение верхней стенки камеры рассмотрено в **проекте LIBRA-SP** [5]. Особенностью этого проекта является то, что над цилиндрической частью камеры надстроена дополнительная полость в виде шарового сектора. Шаровой купол камеры расположен достаточно далеко от точки микровзрыва, так что абляционная эрозия сухой стенки может быть незначительной. Увеличение общего объема дает дополнительный положительный эффект: уменьшается установившееся давление паров теплоносителя в полости камеры в процессе испарения–конденсация.

Трубки blankets выполнены из стали и имеют изогнутую вогнутую форму. На передней части трубок проточены щелевые продольные отверстия для организации струйной завесы, защищающей первую стенку от воздействий рентгеновского излучения и потока ионов. Эта завеса должна быть «сплошной» в том смысле, что капли или фрагменты струй, её образующие, должны перекрывать друг друга так, чтобы излучение не попадало на стенку. Для того чтобы импульс, передаваемый трубам жидкостью в результате микровзрыва, был не слишком большим, необходимо, чтобы завеса была достаточно тонко диспергированной. Решение этой проблемы требует специальных разработок для определения способа конфигурирования такой завесы, ее массы и расхода теплоносителя.

Укажем также оригинальный подход к разработке схемы реактора, примененный в **проекте Osiris** [3]. Здесь применена полостная структура blankets с трехзаконным (от вершины blankets к его основанию) протоком теплоносителя Li_2BeF_4 . Первая стенка выполнена из углеродной ткани, пристроенной к продольным перегородкам. Теплоноситель, протекающий вдоль тыльной поверхности стенки, просачивается на огневую поверхность, образуя защитную пленку. В нижней части камеры реактора осуществляется впрыск диспергированных струй теплоносителя, что сильно развивает поверхность для конденсации испарившейся части пленки.

Конструктивная схема реакторной камеры Osiris могла быть более привлекательной по сравнению с трубчатыми blankets проектов HIBALL-II, LIBRA и LIBRA-SP. Однако применение ткани в качестве первой стенки, а также для проточных каналов требует рассмотрения поведения этого материала в условиях переменных нагрузок, обусловленных импульсным энерговыделением на поверхности первой стенки и в объеме blankets.

Укажем также **проект PROMETHEUS-H** [4], в котором рассматривается пленочная защита на жесткой пористой стенке. Первая стенка выполнена из SiC, жидкая пленка – свинец. Полость камеры имеет цилиндрическую геометрию с полусферическим верхом и низом. Blanket имеет модульную конструкцию, охлаждаемую гелием. Нарботка трития

осуществляется в керамике Li_2O . Внутренний объем и поверхность камеры невелики. Это может способствовать увеличению максимального давления паров, и, следовательно, повышенным нагрузкам в конструкции камеры, а также увеличению времени конденсации.

Реактор с сухой первой стенкой.

Применение сухой стенки в камере реактора возможно только в том случае, когда полость камеры заполнена достаточно плотным газом. Этот газ должен поглощать энергию рентгеновского излучения и потока ионов, а переизлучение тепла на стенку должно быть достаточно малым, чтобы термическая эрозия поверхности была незначительной. Газовая атмосфера может быть в реакторах лазерного ИТС.

В проекте SOMBRERO [7] полость камеры заполнена ксеноном при давлении ~ 100 Па. Геометрия камеры – цилиндрическая, с коническими верхом и низом. Стенки камеры имеют 60 отверстий для ввода лазерных пучков, обеспечивающих сферически симметричное облучение мишени. Радиус стенки (6,5 м) выбран таким образом, чтобы первая стенка, выполненная из углеродного композитного материала, нагревалась до максимальной температуры не более 2200°C при циклическом нагреве от минимальной температуры 1500°C импульсом с длительностью фронта порядка 10 мкс. При этом унос материала за счет испарения не превышает 0,1 нм. Поскольку углеродный композит выполнен из тонких нитей, то опасность откольного разрушения поверхности за счет термических напряжений, по-видимому, не велика. Критическим обстоятельством в обеспечении стойкости такой стенки является создание композита с достаточно высокой теплопроводностью, предотвращающей перегрев поверхности выше допустимых значений.

Бланкет в проекте SOMBRERO выполнен из материала на основе графита и охлаждается гелием с взвешенными в потоке гранулами Li_2O . Однако применение гетерогенного теплоносителя проблематично с точки зрения эрозии стенок.

Реактор с сухой первой стенкой и камерой с атмосферой ксенона разработан также в проекте SIRIUS-P [13]. Камера имеет сферическую полость. Первая стенка выполнена из профилированных труб с постоянным по длине проходным сечением. Трубы расположены на поверхности первой стенки меридианально. Теплоносителем является порошок TiO_2 , стекающий по трубам сверху вниз под действием силы тяжести. Максимальная температура поверхности труб, изготовленных из C/C композита, составляет 1500 К.

На схеме рис. 2 приведена резюмирующая классификация реакторов ИТС по трем признакам (тип драйвера, защита первой стенки, тип blankets), а в таблице 1 приведены энергетические параметры и конструктивные характеристики наиболее проработанных и представительных проектов реакторных камер ИТС.

Рис. 2. Классификация реакторов ИТС

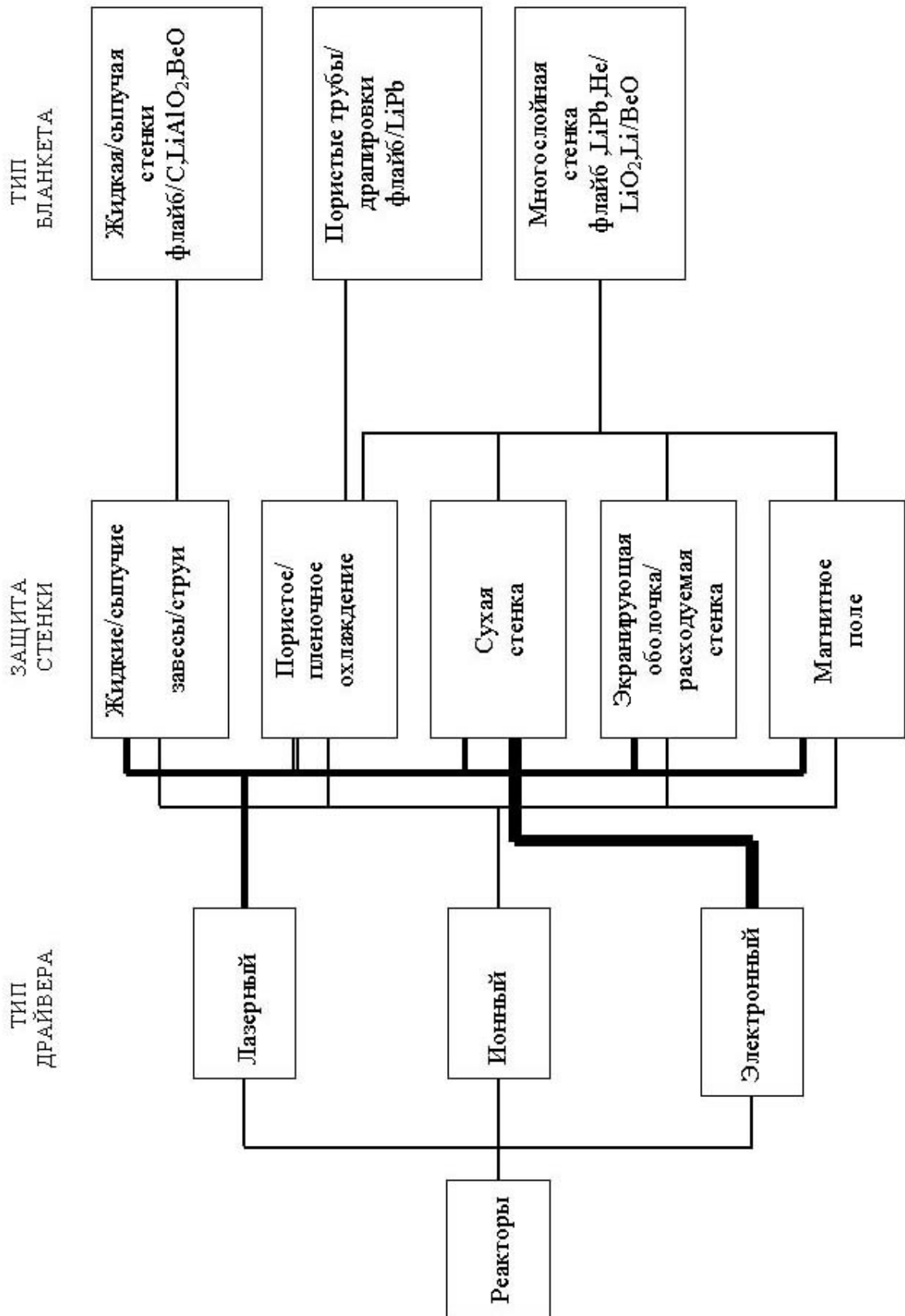


Табл. 1. Характеристики реакторов ИТС

Проект	HYLIFE-II	HIBALL-II	LIBRA-SP	Osiris	Prometheus-H	SOMBRERO
Разработчик	LLNL	KfK, UWM	UWM	W.JShafer Associates	McDonnell Douglas	Ind. Team, UWM
Параметры пучков	Hg ⁺ 10GeV	Bi ⁺ 10GeV	Li ⁺ 30MeV	Xe ⁺ 3,6GeV	Pb ⁺⁺ 4GeV	KrF лазер
Термояд. энергия, Мдж	350	400	576	432	719	401
Частота, Гц	6	5	3.7	4.6	3.54	6.7
Радиус первой стенки, м	0,5	5	4	3.5	4.5	6.5
Первая стенка	Струи Li ₂ BeF ₄	Пленка Li ₁₇ Pb ₈₃ , порис. SiC	Завеса Li ₁₇ Pb ₈₃ , сталь	Пленка Li ₂ BeF ₄ , композит C/C	Пленка Pb, порист. SiC	Композит C/C (сухая)
Начальное давление, Па	0,5	10 ⁻²	10 ⁻²	0,5	10 ⁻²	10 ² (Xe)
Температура начальная, К	923	773	823	923	802	1700
Теплоноситель бланкета	Li ₂ BeF ₄	Li ₁₇ Pb ₈₃	Li ₁₇ Pb ₈₃	Li ₂ BeF ₄	He (923K)	He+LiO ₂ (973K)
Материал бланкета	Струи Li ₂ BeF ₄	Ткань SiC (трубы)	Сталь (трубы)	Ткань C/C	SiC/Li ₂ O (модули)	Композит C/C (каналы)

3. Качественный анализ воздействия микровзрыва на первую стенку камеры реактора ИТС

Выделяющаяся в результате микровзрыва термоядерная энергия распределяется между тремя видами потоков энергии в следующих пропорциях:

- рентгеновское излучение 0,1-0,2;
- энергия ионов 0,1-0,2;
- энергия нейтронов 0,7-0,8.

Конкретные значения потоков энергии зависят от конструкции мишени. Для легких мишеней доля рентгеновского излучения выше доли энергии ионов, а для тяжелых мишеней может иметь место обратное соотношение.

Воздействие потоков энергии рентгеновского излучения и ионов на первую стенку существенно зависит от способа защиты. Для жидких и смоченных стенок рентгеновское излучение вызывает испарение и дробление поверхностного слоя жидкости. Энергия ионов поглощается продуктами разрушения жидкой пленки и только частично может переизлучаться плазмой на стенки. Энергия нейтронов поглощается в объеме blankets.

В камере реактора с сухой стенкой гидродинамика воздействия рентгеновского излучения и потока ионов принципиально иная. Заполняющий камеру буферный газ существенно поглощает эти потоки энергии, и поверхность камеры подвергается радиационному нагреву за счет вторичного переизлучения плазмы. Радиационный тепловой поток отводится посредством теплопроводности через первую стенку камеры к теплоносителю.

Характерные значения тепловых потоков на стенке представляют расчеты по проекту SOMBRERO [7]: первая стенка должна воспринимать тепловые потоки до $3,5 \cdot 10^8$ Вт/м² в течение 10^{-4} с.

Воздействие потоков энергии на стенки камеры порождает также сложный гидродинамический сценарий отклика камеры. Этот сценарий состоит из множества различных процессов, интерферирующих между собой. При рассмотрении гидродинамики отклика камеры реактора удобно сортировать эти процессы по характерному времени их протекания собственно в камере, первой стенке и blankets.

Поглощение рентгеновского излучения в защитной пленке сопровождается объемным энерговыделением, которое приводит к частичному испарению пленки и характеризуется, в основном, тремя параметрами:

- поверхностной плотностью полного потока энергии Q [Дж/м²];
- характерной экспоненциальной глубиной поглощения;
- характерным временем импульса энерговыделения.

Процесс энерговыделения за счет поглощения рентгеновского излучения можно считать изохорическим, поскольку, как правило, характерное время

импульса энерговыделения много меньше времени пробега акустических возмущений на характерной глубине поглощения. Диффузия тепла не оказывает влияние на процесс энерговыделения, так как время тепловой диффузии, обратно пропорциональное квадрату температуропроводности, на много порядков превосходит время энерговыделения. В этом приближении на основе баланса энергии можно получить оценку величины испаренного материала, что было сделано в [1], а также в [14].

В реакторах со смоченной жидкой стенкой толщина испаренного слоя жидкой пленки составляет несколько длин поглощения l , что соответствует поверхностной плотности массы испаренной жидкости порядка $0,05 \text{ кг/м}^2$. Так, в проекте NIBALL-II масса испарившейся жидкости оценивается в 13 кг. Испаренное вещество расширяется внутрь полости камеры реактора. При этом в пленке жидкости возникает импульс отдачи.

Задача о воздействии рентгеновского излучения на стальную стенку для проекта LIBRA-SP была решена с помощью современного гидродинамического кода BUCKY [15]. Расчет был выполнен для незащищенной (сухой) стенки при величине $Q = 10^6 \text{ Дж/м}^2$. Давление в волне импульса отдачи на участке сжатия составляет $\approx 1 \text{ Мбар}$. Такого же порядка отрицательное давление наблюдается и на участке разрежения.

Разгрузка материала в знакопеременном импульсе отдачи может привести к отколу слоев жидкости от стенки. В результате откола в полость реактора со стенки должен происходить выброс некоторой массы жидкости, раздробленной на множество капель. Оценка полной массы капель и, тем более, их спектров, чрезвычайно затруднена. Это обусловлено тем, что к разрушению пленки может вести не только эффект откола, но также различного вида гидродинамические неустойчивости, развивающиеся на поверхности жидкости.

Выброс капель со стенки может быть весьма важной частью гидродинамического сценария отклика первой стенки на импульсы рентгеновского излучения и потока ионов. В частности, капельная завеса может оказать сильное экранирующее действие, защищающее конструкционный материал первой стенки от воздействия переизлучения плазмы испарившегося вещества и потока ионов. Данные о выбросе капель с первой стенки должны быть получены в модельных экспериментах при параметрах, близких к натурным.

Формирование потока ионов соответствует свободному расширению вещества в вакуум. Это, по-видимому, имеет место на первом этапе разлета вещества мишени в реакторах с тяжелоионным драйвером, поскольку вследствие высокого вакуума в камере масса мишени существенно превышает массу паров теплоносителя, заполняющих камеру перед микровзрывом. Оценки показывают, что тяжелые ионы полностью поглощаются в паровом слое, образовавшемся у первой стенки. Результирующая температура плазмы оценивается в проекте NIBALL-II в несколько эВ. Под действием излучения плазмы происходит доиспарение

жидкости. Конечная масса испаренной жидкости может быть весьма велика. Это относится к схемам реактора, в которых поверхность охлаждаемых стенок мала по сравнению с располагаемой поверхностью конденсации. Такое соотношение поверхностей имеет место в реакторе Osiris, где конденсация происходит на дисперсных струях теплоносителя и первой стенке. Полная испаренная масса жидкости может достигать в реакторах со смоченной стенкой сотен килограммов на один микровзрыв. После охлаждения плазмы начинается интенсивная конденсация паров.

Конденсация является одним из завершающих этапов в цикле между двумя последовательными микровзрывами. Оценки времени конденсации конструируются на основе модели кинетического режима поверхностной конденсации. Этот режим является существенно более быстрым, чем диффузионный режим. Использование такого подхода в проектах HIBALL-II и LIBRA дает характерные времена конденсации паров порядка 0,1 с. Это время существенно меньше времени осаждения капель на вертикальном отрезке длиной в несколько метров. В случае выброса капель именно время их осаждения будет ограничивать частоту микровзрывов. В реакторе NYLIFE-II предусматривается принудительная очистка полости от капель, и в нем частота микровзрывов лимитируется гидродинамикой струй.

В реакторе с сухой стенкой SOMBRERO происходит циклический радиационный нагрев стенки в интервале температур 1700-2400 К. Максимальная температура на поверхности стенки зависит от теплопроводности композита, из которого изготовлена первая стенка.

В проекте SOMBRERO при максимальной температуре поверхности 2400К термическая абляция композита C/C составляет 10^{-10} м на один микровзрыв. Это ничтожная абляция, величина которой находится на грани применения физической модели абляции, и ею, по-видимому, можно пренебречь. Механическая эрозия композита также несущественна в силу того, что тонкие нити композита успевают разгрузиться в течение радиационного нагрева.

Следует подчеркнуть, что приведенные в данном разделе характерные значения некоторых параметров воздействия микровзрыва на первую стенку камеры реактора ИТС представляют собой результаты применения различных кодов. Отметим, что при этом не проводилось сквозного расчета зажигания и взрыва мишени с последующим разлетом плазмы, а из априорных оценок величины воздействия на стенку рассчитывалась необходимая конструкция. Нашей задачей является расчет воздействия микровзрыва на первую стенку в различных концепциях с помощью сквозного расчета. Это позволит привести различные проекты ИТС «к одному знаменателю».

Ниже в табл. 2 приведены оценки характерных времен протекания процессов в реакторе ИТС.

Табл. 2. Характерные масштабы времени протекания процессов в реакторе ИТС

Зона реактора	Масштаб времени			
	Наносекунда	Микросекунда	Миллисекунда	Квaziстационарные процессы
Первая стенка (жидкая пленка)	Поглощение рентгеновского излучения	Абляция пленки Передача импульса давления		
Бланкет	Поглощение нейтронов	Нагрузка/разгрузка материалов		Теплопроводность Гидравлика теплоносителя
Полость камеры		Поглощение Ионов Диспарение	Конденсация паров теплоносителя	Осаждение капель

4. Концепция FIFIF инерциального синтеза на тяжелых ионах

В этом разделе мы опишем концепцию энергетической установки на базе инерциального термоядерного DT-синтеза с использованием быстрого поджига цилиндрической мишени с помощью мощного тяжелоионного драйвера (концепция FIFIF, Fast Ignition Heavy Ion Fusion). Изложение концепции FIFIF необходимо для того, чтобы подчеркнуть важность данного проекта и его место в ряду других концепций инерциального синтеза, приведенных в разделе 2, а также обозначить его сравнительные преимущества. Основные положения этой концепции, касающиеся драйвера и мишени, были сформулированы и обоснованы в работах [16-19].

При разработке концепции FIFIF была предложена конструктивная схема реакторной камеры, в которой происходит микровзрыв, а также общая структура blankets, поглощающего нейтронное излучение. Описание камеры и первые качественные оценки ее отклика на тепловое и динамическое воздействие термоядерного микровзрыва содержатся в [20, 22]. Оценки основных параметров такой установки, увязанные в единую, согласованную систему, позволяют получить целостное представление об энергетической концепции, которую можно развить на этой основе.

1. Тяжелоионный ускоритель. Драйвер формирует и доставляет в точку нахождения термоядерной мишени пучок однозарядных ионов платины с энергией 100 ГэВ. Средняя мощность пучка 0,1 ПВт, длительность профилированного энерговыделения 75 нс, полное энерговыделение 7,1 МДж. Метод формирования профилированного по времени пучка с необходимыми энергетическими характеристиками был предложен Д.Г. Кошкаревым в работах [16]. Пучок представляет собой тонкостенную трубку внутренним диаметром 0,4 см, получаемую вращением выходящего пучка с частотой 10^9 Гц. Толщина «стенки» трубки (т.е. диаметр пятна пучка) 250 мкм. Этот пучок осуществляет обжатие термоядерного топлива. Для поджига сжатого топлива используется второй пучок мощностью 2 ПВт и длительностью 0,2 нс, поставляющий энергию 0,4 МДж в центральную зону мишени. КПД драйвера оценивается величиной 0,25.

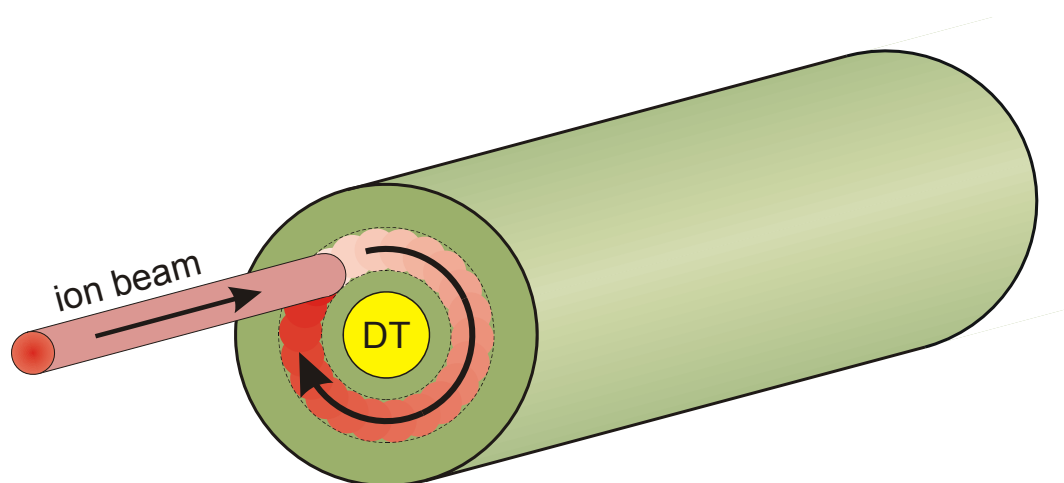
2. Цилиндрическая мишень. С тяжелоионным драйвером естественно сочетается мишень с цилиндрической симметрией. Центр радиальной части мишени заполнен эквимолярной DT-смесью, которую окружает свинцовая оболочка (рис. 3). Длина цилиндра (0,71 см) выбирается так, чтобы на этом пути ионы нагревающего пучка полностью затормозились в материале оболочки. В результате последующего расширения оболочки происходит кумулятивное сжатие центральной зоны (топлива) до достижения параметра ρr , достаточного для инициирования волны горения путем быстрого поджига топлива. Этот сценарий сжатия был предложен М.Д. Чуразовым, А.Г. Аксеновым и Е.А. Забродиной в работе [18].

Начальные параметры DT-топлива: плотность $\rho_f = 0,18 \text{ г/см}^3$, радиус цилиндра $r_1^0 = 0,118 \text{ см}$, масса $m_f = 5,6 \text{ мг}$.

Начальные параметры оболочки: масса однородной свинцовой оболочки $m = 4,44 \text{ г}$, ее внешний радиус $r_2^0 = 0,4 \text{ см}$, плотность $\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$. Торцы цилиндра закрыты свинцовыми заглушками толщиной $0,45 \text{ мм}$.

Отметим, что существуют и гибридные варианты [23-25] описываемой концепции, когда DT-топливо в мишени окружается слоем делящегося вещества, и/или бланкет может содержать расплав, например, природного урана.

Рис. 3. Цилиндрическая мишень в концепции FIHIF



3. Энерговложение. Драйвер вносит энергию $7,1 \text{ МДж}$ в кольцевой промежуток от $0,19 \text{ см}$ до $0,31 \text{ см}$, как показано на рис. 3. Из-за эффекта просветления, описанного М.М. Баско в [26], в мишени «полезным образом» поглощается $5,3 \text{ МДж}$. В результате последующего расширения центральной зоны топливо сжимается до значения $\rho_f r_1 = 0,5 \text{ г/см}^2$, при этом в оболочке достигается $\rho r = 7 \text{ г/см}^2$.

4. Энерговыведение. Согласно расчетам [26], полное энерговыведение в рассматриваемой мишени составляет 750 МДж , т.е. коэффициент усиления мишени приблизительно равен $G \approx 100$. Распределение энергии между продуктами синтеза следующее:

- Рентгеновское излучение – 17 МДж .
- Осколки мишени (ионы) – 153 МДж .
- Нейтроны – 580 МДж .

Поскольку «теплосодержание» DT-топлива равно 340 МДж/мг , то выгорание мишени в этом варианте составляет 39% .

Итак, концепция FIHIF энергетического реактора на основе быстрого поджига DT-топлива содержит целый ряд новых компонент. Базовыми элементами концепции являются мощный тяжелоионный драйвер и

цилиндрическая оболочечная мишень, для создания которых к настоящему моменту уже имеются достаточно подробно прописанные и ясные конструкторские решения. На основе расчетно-теоретического анализа процессов сжатия и горения такой мишени в работах [20, 22] были получены оценки энергетических потоков, воспринимаемых первой стенкой камеры, в которой происходит микровзрыв. Эти оценки послужили основой для создания принципиальной концепции реакторной камеры и blankets, который является связующим звеном между производством энергии в термоядерной реакции и преобразованием ее в электрическую энергию.

5. Камера реактора в концепции FINIF. Разработка конструктивной схемы реакторной камеры опирается на уже известные конструкторские решения, описанные выше в п. 2. За основу взята камера, представленная в проекте LIBRA [2]. Для нее основными проблемами являются поддержание необходимого вакуума в камере (т.е. быстрая релаксация полости камеры к состоянию до микровзрыва) и недопущение предельных термомеханических напряжений в конструкционных материалах.

Первая из указанных проблем непосредственно в камере такой конструкции решена быть не может, т.к. не хватает свободной поверхности для конденсации испарившейся массы теплоносителя. Для этой цели необходим дополнительный объем (конденсационная полость), куда будет отводиться часть пара. Такая полость была предложена в проекте LIBRA-SP. Однако без дополнительных технологий увеличение объема камеры приведет лишь к незначительному ускорению конденсации в силу уменьшения концентрации пара. Требуется же на несколько порядков увеличить поверхность конденсации, что может быть сделано, например, с помощью распыления спрея. Спрей был предложен в проекте NYLIFE-II [6] с целью защиты первой стенки камеры реактора. В проекте FINIF предлагается использовать его для увеличения поверхности конденсации испаренного материала защитной пленки. Таким образом, конструкция FINIF является дальнейшим развитием более ранних концепций ИТС, представленных в зарубежных проектах LIBRA и NYLIFE.

Опишем кратко общую конструкцию камеры термоядерного реактора в концепции FINIF. Рассматривается цилиндрический дизайн камеры с тонкой жидкой защитной пленкой, продавливающейся через пористую первую стенку. Этот выбор мотивирован тем, что пленочная защита хорошо отработана в современных высокотемпературных технологиях, а канальная схема аккумуляции нейтронного энерговыделения подробно прорабатывается в установках и проектах УТС с магнитным удержанием [27, 28]. Толщина защитной пленки выбрана равной 2 мм.

Геометрическая конфигурация камеры реактора должна обеспечить компромисс между двумя противоположными требованиями к проведению микровзрыва: минимизации пути транспортировки пучка от фокусирующих магнитов к мишени, и уменьшения поверхностной плотности потока энергии взрыва на стенку камеры. Второе из этих требований, как показывает

дальнейший анализ, может быть несколько ослаблено. Критерий минимально допустимого радиуса камеры состоит в том, чтобы под действием рентгеновского излучения испарялась бы, во-первых, не вся защитная пленка; во-вторых, нагружение первой стенки импульсом отдачи при испарении пленки не должно превышать предела упругости конструкционных материалов; в-третьих, время релаксации теплофизических параметров камеры должно быть на порядок меньше интервала вбрасывания мишеней внутрь камеры. Частота микровзрывов в рассматриваемой концепции принята равной 2 Гц.

С целью обеспечения достаточно быстрой конденсации паров область камеры разделена на две части: первая – относительно небольшая, в которой происходит собственно микровзрыв, и объемный поддон, в котором пар конденсируется на распыляемых струях теплоносителя. Радиус камеры принят равным $R = 4$ м, высота – 8 м, радиус конденсационной полости – 10 м, ее высота – 8 м. Каналы, по которым течет теплоноситель, выполнены из ванадиевого сплава V-4Cr-4Ti. Стенки корпуса реактора выполнены из стали НТ-9. Эти материалы выбраны из-за их высоких прочностных и антикоррозийных свойств [29]. Справа от стенки корпуса реактора расположена защита из бетона толщиной 2 м.

В качестве теплоносителя берется эвтектика $Li_{17}Pb_{83}$ при температуре 823К. Этому значению отвечает равновесная концентрация его паров в камере 10^{18} м^{-3} (данные [8]).

6. Бланкет. В экваториальной плоскости (т.е. в горизонтальной плоскости, проходящей через точку микровзрыва) бланкет представляет собой систему полых цилиндров, промежутки между которыми заполнены теплоносителем.

Оценочный расчет напряжений в конструкционных материалах бланкета, возникающих при импульсном тепловыделении, проводился в [14, 20, 21, 22] в одномерной осесимметричной постановке. Было показано, что при рассматриваемой нагрузке пределы упругости конструкционных материалов не превышаются.

Качественные оценки отклика камеры и бланкета на микровзрыв показали, что для предлагаемой нами конструкции камеры необходимая частота повторений микровзрывов, диктуемая требованиями, предъявляемыми к энергетической установке, согласуется с временами релаксации системы.

Расчет плотности тепловыделения в бланкете является основой для создания тепловой схемы электростанции.

7. Схема термоядерной электростанции.

Тепловая схема электростанции состоит из трех контуров.

Теплоноситель: в первом контуре – $Li_{17}Pb_{83}$, во втором – Na, в третьем – водяной пар.

Верхняя и нижняя температуры первого контура приняты равными 823К и 623К. Температуры второго контура определяются автоматически

через температурный перепад 773К и 573К. Температура острого пара в третьем контуре определяется через перепад 40К и равна 743К. Температура промежуточного перегрева также равна 743К.

Тепловая мощность реактора – 1,5 ГВт, электрическая – 626 МВт. Это приемлемо как с энергетической, так и с экономической точек зрения.

Основные параметры электростанции приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры тепловой схемы термоядерной электростанции FINIF

Первый контур	
Теплоноситель	LiPb
Расход, кг/с	13063
Насосы, кВт	11584
Второй контур	
Теплоноситель	Na
Расход, кг/с	6402
Насосы, кВт	3768
Паровой цикл	
Расход, кг/с	548,7
Вход. давление, МПа	18
Давление перегрева, МПа	3

Давление конденсаторе, МПа	в	0.009
Кпд турбины		0.875
Кпд парового цикла		0.417
Реактор		
Мощность, МВт		1500
Драйвер, МВт		60
Доля нейтронов		0,773
Усиление вblankете		1.117
Электростанция		
Кпд по теплу		0.407
Кпд нетто		0.374
Выходн. мощн., МВт		626

Таким образом, мы рассмотрели и систематизировали основные варианты построения реактора ЯЭУ на основе инерциального термоядерного синтеза. Концепция камеры с пленочной защитой первой стенки представляется наилучшей на уровне экспертной оценки по совокупности параметров согласованности драйвера и мишени, драйвера и камеры, энергетических характеристик реактора, оценок времен релаксации камеры, а также вследствие технологической реализуемости схем подачи теплоносителя в камеру и его отвода.

Следующим этапом работ будет проведение расчетов, аналогичных сделанным при оценке нагрузок на первую стенку в проекте FINIF, для ряда зарубежных проектов ИТС.

Благодарности

Мы глубоко признательны академику **В.И. Субботину**, инициировавшему эти исследования в Совете РАН по анализу энергетических систем, за постоянное внимание к работе, важные замечания и предложения. Авторы считают также своим приятным долгом поблагодарить докторов физ.-мат. наук С.А. Медина и С.Л. Недосеева за многочисленные плодотворные обсуждения концепций реакторов ИТС.

Литература

1. Badger B. et al. HIBALL-II – An improved conceptual heavy beam driven fusion reactor. / Report KfK 3840. Karlsruhe, Germany: Kernforschungszentrum. 1984.
2. Badger B. et al. LIBRA – A Light Ion Beam Fusion Conceptual Reactor Design. / Report KfK 4710. Karlsruhe Kernforschungszentrum. 1980.
3. Bourque R. F., Meier W. R. and Mousler M. J. Overview of the Osiris IFE Reactor Conceptual Design. // Fusion Technology, 1992. Vol. 21. P.1465.
4. Meier W. R., Waganer, L. M. Recent Heavy-Ion Fusion Power Plant Studies in the US. // Nuovo Chimento, 1993. Vol. 106 A. No.12. P.1983.
5. Kulcinski G.L., et al. Evolution of light ion driven fusion power plants leading to the LIBRA-SP design. // Fusion Technology, 1994. Vol. 26. P. 849.
6. Moir R. W., et al. HYLIFE-II: A Molten Salt Inertial Fusion Power Plant Design – Final Report. // Fusion Technology, 1994. Vol. 25. P. 5.
7. Kulcinski G.L. et al. Dry Wall Chamber Issues for the SOMBRERO Laser Fusion Power Plant. // Fusion Engineering and Design, 2002. Vol. 60. P. 3.
8. Hogan W. J. (ed). Energy From Inertial Fusion. IAEA, Vienna, 1995.
9. Peterson P.F. Design Methods for Thick-Liquid Protection of Inertial Fusion Chambers. // Fusion Technology, 2001. Vol.39. No.2. P. 702.
10. Pitts J.H. Cascade: A Centrifugal-Action Solid-Breeder Reaction Chamber. // Nucl. Technol. Fusion, 1983. Vol.4. P.967.
11. Басов Н.Г., Белоусов Н.И. и др. Гибридный реактор на основе лазерного термоядерного синтеза. // Квантовая электроника, 1987. Т.14. №10. С. 2068.
12. Басов Н.Г., Крохин О.Н. и др. О перспективах создания лазерной термоядерной электростанции. // Изв. АН СССР, Сер. Энергетика и Транспорт, 1979. №2. С. 3.
13. Sviatoslavsky I.N. et al. A Near Symmetrically Illuminated Direct Drive Laser Fusion Power Reactor – SIRIUS-P. // Fusion Technol., 1994. Vol. 26. P. 868.
14. Medin S.A. et al. Reactor Chamber and Balance-of-Plant Characteristics for Fast-Ignition Heavy-Ion Fusion Power Plant // Fusion Science and Technology, 2003. V.43. No.3. P.437-446.
15. Peterson R.R. et al. Chamber dynamic research with pulsed power. // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 2001. V.464. P. 172-179.
16. Koshkarev D.G. Charge-Symmetric Driver for Heavy-Ion Fusion. // IL Nuovo Chimento, 1993. Vol.106 A. No.11. P.1567-1573.
17. Кошкарев Д.Г., Бархударян А.В., Талызин А.Н. Новая схема продольного сжатия пучка для НИФ драйвера. / Препринт ИТЭФ. № 145. 1998.
18. Чуразов М.Д., Аксенов А.Г., Забродина Е.А. Зажигание термоядерных мишеней пучком тяжелых ионов. // ВАНТ, Сер. Математические модели физических процессов, 2001. Вып. 1. №20.
19. Yudin L.A. et al. Linac for Charge-Symmetric Four-Isotopic Heavy-Ion Driver. // Fus. Eng. and Design, 1996. Vol. 32-33. P.355-358.

20. Medin S.A. et al. Evaluation of a power plant concept for fast ignition heavy ion fusion // *Laser and Particle Beams*, 2002. V.20. P.419-423.
21. Медин С.А., Орлов Ю.Н. Концепция камеры реактора ИТС на тяжелых ионах // *ВАНТ, сер. Термоядерный синтез*, 2005. Вып. 2. С. 3-14.
22. Medin S.A., et al. Conceptual Analysis of Energy Conversion in Power Plant for Fast Ignition Heavy Ion Fusion / 30-th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics. Russia, S-Petersburg, July 7-11, 2003.
23. Алексеев Н.Н., Баско М.М., Долголева Г.В., Жуков В.Т., Забродин А.В., Забродина Е.А., Имшенник В.С., Кошкарёв Д.Г., Масленников М.В., Орлов Ю.Н., Субботин В.И., Чуразов М.Д., Шарков Б.Ю. Разработка энергетической установки, сочетающей процессы синтеза и деления на основе микромишеней прямого действия и мощного тяжелоионного драйвера // *Атомная энергия*, 2004. Т. 97. Вып. 3. С. 200-210.
24. Субботин В.И., Долголева Г.В., Орлов Ю.Н. и др. Энергетическая установка тяжелоионного DT-синтеза с мишенями, содержащими делящиеся материалы // *Атомная энергия*, 2005. Т. 99. Вып. 3. С. 190-198.
25. Субботин В.И., Медин С.А., Орлов Ю.Н., Шимкевич А.Л. Энергетические характеристики гибридной ЯЭУ на основе тяжелоионного термоядерного синтеза / Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 47, 2006. – 28 с.
26. Basko M. M., Churazov M. D. and Aksenov A. G. Prospects of heavy ion fusion in cylindrical geometry. // *Laser and Particle Beams*, 2002. V.20. P.411-414.
27. Moir R.W. Liquid inertial fusion energy power plants. // *Fusion Eng. and Des.*, 1996. Vol. 32-33. P. 93-104.
28. Основы концепции демонстрационного термоядерного реактора ДЕМО-С. / РИЦ «Курчатовский институт» ИЯС, М., 2000.
29. Zinkle S.J. Status of recent activities by the APEX material group. / APEX Study Meeting, SNL, July, 1998. P. 18.