

УДК 541

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА В СОСТАВЕ ГИБРИДНОГО РЕАКТОРА ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ: КРИТЕРИИ И ВОЗМОЖНОСТИ

В. А. Грибков, М. Шольц,

Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза, 00-908 Варшава,
п/я 49, Бемово, ул. Геры 23, Польша

М. Г. Тягунов

Московский энергетический институт (Технический университет), Москва, Россия

Любой новый источник энергии при использовании его в базовой энергосистеме должен быть рассмотрен в тесной связи со всей современной базой энергетики и при учете прогнозов ее развития. В ряду тех проблем, которые решаются в современной энергетике с применением различных физических принципов, одной из важнейших является проблема аккумулирования вырабатываемой энергии, в особенности в связи этой проблемы с вопросом неравномерности графиков потребления (нагрузки) энергосистем. В данной работе рассматривается схема энергетического блока, который включает в себя ядерный реактор деления и гибридный ядерный реактор синтеза, построенный на основе установки типа "плазменный фокус". В данной статье обсуждаются достоинства схемы в свете вышеуказанной проблемы по сравнению с известными ядерными источниками энергии и современными аккумулирующими станциями. Проводится анализ вопросов как технических, так и физических, которые должны быть решены на пути реализации данной схемы. Намечаются пути преодоления имеющихся трудностей.

Разработка любых новых (в том числе использующих ядерный синтез) источников энергии, предназначенных для промышленного использования, должна основываться на тех особенностях, которыми обладают энергетические системы, используемые в настоящее время. Это необходимо как для учета уже накопленного опыта, так и в целях минимизации весьма больших в этой отрасли хозяйства капитальных затрат, которые необходимы всегда при переходе к новой технике. При этом следует также учитывать прогнозы развития традиционных энергосистем на момент возможного подключения к ним термоядерных энергетических установок. Такая целевая ориентация разработок данного типа позволяет исключить из рассмотрения или перенести на более отдаленное будущее ряд некото-

рых трудно разрешимых теоретических и практических проблем термоядерной энергетики и в то же время предложить реальные пути решения тех задач, которые станут первоочередными при составлении конкретных энергетических проектов, направленных на использование в них реакторов ядерного синтеза в обозримой перспективе.

Одним из важных факторов, которые должны быть учтены при разработке новой энергосистемы, является возможность осуществления в ней такого режима работы, который диктуется графиками электропотребления (мы будем здесь рассматривать в основном установки, производящие именно электроэнергию, так как ее доля в общем энергобалансе постоянно возрастает и поскольку этот вид энергии является наиболее адекватным ядерно-физическим энергетическим установкам). В зависимости от задач, решаемых конкретной энергоустановкой, от ее состава и структуры, как правило, по разному формулируются требования к роли того или иного элемента системы и к его параметрам, как техническим, так и экономическим. Данное обстоятельство весьма важно на стадии обоснования не только возможности технической реализуемости проекта в имеющихся условиях, но и общей экономической целесообразности того или иного энергетического комплекса в целом. В связи со сказанным энергетические и технические проблемы, равно как и перспективы использования промышленных энергоустановок, основанных на применении в качестве центрального элемента мощного нейтронного источника на основе устройства типа "плазменный фокус (ПФ)" [1], рассмотрим на специальном примере гипотетической электростанции. Этой электростанции мы придадим строго определенное целевое назначение, которое позволит выявить ряд принципиальных достоинств ПФ в таких схемах по сравнению с другими, в том числе и термоядерного происхождения нейтронными источниками. Эти достоинства могут оказаться настолько значительными, что позволят установкам ПФ уже в обозримом будущем занять важное место в некоторых областях энергетического использования управляемого ядерного синтеза.

Отправная точка краткого системного исследования, проводимого на стадии выбора генерального направления разработки энергоустановки на основе ПФ, была выбрана так, чтобы решение наиболее важных задач промышленной энергетики с использованием этого пути позволило бы рассматривать данную проблему в реально обозримой перспективе. Это значит, что в структуре современных действующих энергетических систем не предусматривается принципиальных изменений. Ожидать такие изменения в больших системах, обладающих значительной инерционностью развития, в ближайшие 20—40 лет нет никаких оснований. На это же указывают и долгосрочные энергетические программы, принятые в большинстве стран мира и рассчитанные до 2050 г. [2], т. е. на тот период, к концу которого наряду с традиционными источниками — станциями, работающими на химическом топливе, гидростанциями и атомными станциями деления — в базовой энергетике, как ожидается, уже смогут быть использованы термоядерные установки типа "Токамак".

Опубликованные долгосрочные программы как промышленно развитых, так и развивающихся стран мира предусматривают, наряду с развитием энергосберегающих технологий, покрытие роста электропотребления за счет преимущественного ввода мощностей, генерируемых на атомных электростанциях. Несмотря на некий спад энтузиазма в этой области в начале 90-х годов вследствие аварий на Три Майл Айленд и в Чернобыле и на сильную обеспокоенность общественности экологическими аспектами таких станций, развитие событий в последние три—пять лет показали, что в ближайшие десятилетия альтернативы атомной энергетике нет. Но именно уроки аварий на ядерных объектах, произошедшие в 70—80-х гг., заставляют обращаться к рассмотрению все новых и новых ядерно-энергетических схем, которые бы позволили принципиально полностью исклю-

чить опасность каких-либо серьезных инцидентов с ядерными энергетическими станциями [2, 3]. При этом, как показал анализ наиболее серьезных техногенных катастроф последнего времени, большинство из них произошло из-за халатности либо вследствие недостаточной квалификации обслуживающего персонала. А это означает, по образному выражению президента АН СССР А. П. Александрова, что всякая новая техника должна проектироваться не "с расчетом на дурака" — теперь этого уже недостаточно, а "с расчетом на преступника", т. е. чтобы и при злом умысле невозможно было с помощью новой техники вызвать катастрофические для окружения последствия. В ряду таких ядерно-энергетических схем рядом авторов возлагаются большие надежды на гибридные или симбиотические станции, в основе которых лежит использование источника, генерирующего мощные нейтронные вспышки "безопасным" (в сравнении с нейтронными реакторами на основе делящихся материалов) образом за счет реакций ядерного синтеза. Одним из наиболее перспективных кандидатов на роль такого источника является ПФ [4—6]. Будучи окружен глубоко подкритическим бланкетом из делящихся материалов, такой реактор принципиально не имеет возможности пойти "в разнос", предъявляет значительно сниженные требования к энергетическому КПД источника по сравнению с его использованием в чисто термоядерных схемах, а способен производить наработку оружейных делящихся материалов [5—7], не также может обладать рядом других важных специфических преимуществ, находящихся в строгой зависимости от того, в какой именно энергосистеме он будет использован и выполнение какой конкретной функции в ней будет на него возложено. К рассмотрению задачи в такой формулировке мы теперь приступаем.

Несмотря на усилия, предпринимаемые в энергохозяйстве по выравниванию суточных, недельных и других графиков потребления электроэнергии, прогноз перспективных графиков нагрузки электростанций указывает на их ожидаемую неравномерность. При этом отношение максимальной рабочей мощности электростанций к минимальной прогнозируется равным 30—40 %, что остро ставит проблему обеспечения перспективных энергоустановок средствами достаточно глубокого регулирования мощности. Работающие на химическом топливе станции, как известно, обладают большой инерционностью. Гидростанции могут оперативно покрывать пики потребления, но их доля в общем энергобалансе невелика, а строительство новых станций этого типа невозможно либо по экологическим причинам, либо из-за отсутствия в регионе гидроресурсов, либо по причине чрезмерных капитальных затрат, которые неразумно нести по объектам ограниченного использования. Известно, что используемые типы атомных электростанций хотя и допускают снижение нагрузки в течение суток, но имеют достаточно узкий регулировочный диапазон, над увеличением которого сейчас работают многие энергетики мира. Кроме того, часто режим снижения мощности в атомных электростанциях (если он производится путем введения в активную зону поглотителей нейтронов) не уменьшает расхода ядерного горючего, т. е. использование последнего в таком случае оказывается неэффективным.

Один из путей решения этой проблемы — использование аккумуляторов электроэнергии различного вида и разной физической природы. Кроме аккумулялирования электроэнергии без ее превращений в другие виды, на практике используются либо рассматриваются в литературе также пневматические, химические и гидравлические аккумуляторы. Среди них широкое распространение получили гидроаккумулирующие электростанции, использующие избыточные мощности для создания резервов в виде потенциальной энергии воды и затем отдающие ее (в период наивысшего потребления) снова в виде электроэнергии. Их преимуществом по сравнению, например, с дополнительными (резервными) тепловыми электростанциями, является возможность быстрого (за времена, измеряемые

минутами) включения требуемых мощностей на потребителя. Возможность использования аналогичного принципа, но с заменой потенциальной энергии воды на аккумуляцию избыточной энергии атомных станций в виде ядерной же энергии, нарабатываемой за счет процесса обогащения природного урана, происходящего в бланкете гибридного реактора "синтез-деление", позволило рассмотреть новое, более доступное на современном уровне технологии направление использования ПФ в энергетике.

Предлагаемый нами здесь вариант энергетической установки с использованием плазменного фокуса представляет собой энергетический комплекс, состоящий из атомной электростанции деления и аккумулятора энергии на основе гибридного реактора ядерного синтеза с урановым бланкетом (рис. 1). Рассматриваемая схема предполагает использование ПФ в качестве энергоемкого потребителя, забирающего электроэнергию для своего питания от атомной станции в периоды провалов нагрузки и использующего ее для наработки ядерного топлива с помощью облучения бланкета из природного урана нейтронами 14 МэВ от ПФ непосредственно в производственных помещениях этой станции.

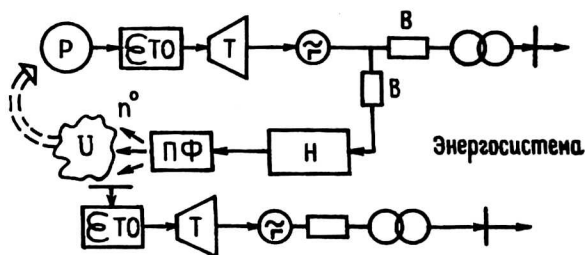


Рис. 1. Принципиальная схема гибридного ядерного энергетического комплекса:

Р — ядерный реактор деления; ТО — теплообменник;
Т — паровая турбина; Г — генератор; В — выключатель;
Н — накопитель электроэнергии; ПФ — установка плазменного фокуса; U — урановый бланкет

Описания проектов различных возможных типов энергетически выгодных электростанций на основе гибридных реакторов с использованием ПФ можно найти в работах [4—6, 8, 9]. А priori ясно, что для нашего проекта необходим ПФ значительно меньшего масштаба, т. к. он будет только нарабатывать ядерное горючее за счет той энергии, которая обычно теряется в атомных станциях. Нарботанное топливо будет использоваться в реакторе атомной станции, входящей в состав этого комплекса. Частным критерием целесообразности использования такой установки является не ее обязательно положительный энергобаланс, а достигаемый в ней КПД в сравнении с аналогичной цифрой по применяемым в современной энергетике классическим аккумуляющим устройствам (типичное значение КПД современных аккумуляющих станций — 60 %). Для ориентировки в масштабах основных величин приведем здесь полученные в вышеуказанных статьях и важные для нашего рассмотрения цифры (относящиеся к одному из гораздо более сложных и объемных по сравнению с предлагаемым здесь вариантов — к экономически выгодной станции, производящей электрическую энергию на основе гибридного реактора "синтез-деление", использующего ПФ) [4]:

средняя частота срабатывания установки — 13 Гц;
средняя снимаемая электрическая мощность — 270 МВт;
общая схема бланкета из делящихся материалов — 4 т.

В схеме по рис. 1 неравномерность электропотребления (см. рис. 2) компенсируется дополнительным потреблением энергии, используемым для питания ПФ,

что позволяет теоретически полностью выровнять график генерации энергии атомной электростанцией. Здесь, правда, казалось бы, возникает встречная проблема, связанная с неравномерностью энергообеспечения самого нейтронного источника, работающего на основе ядерного синтеза. Однако ПФ демонстрирует основное из своих преимуществ по сравнению с другими термоядерными источниками, связанное с его относительно высокой нейтронной эффективностью на малых мощностях энергопитания.

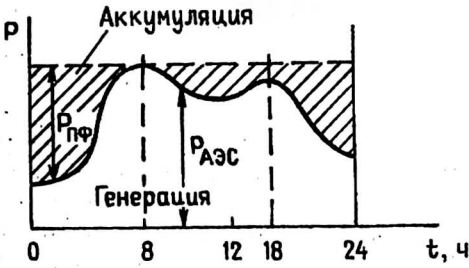


Рис. 2. Схема регулирования мощности гибридного ядерного энергетического комплекса путем аккумуляции электроэнергии с использованием плазменного фокуса

Действительно, электрогенерирующая часть атомной станции связана в нашей схеме с нейтронным источником, работающим на основе ПФ, через емкостный или индукционный накопитель электроэнергии постоянной емкости, способный к потреблению той мощности, которая предназначена для аккумуляции.

Типичная величина этой мощности оказывается сравнимой с мощностью, необходимой для питания такого ПФ, масштаб которого является оптимальным для данной схемы.

Таким образом, использование этого накопителя в качестве инерционного звена позволит не только обеспечить бесперебойную работу ПФ, но и выровнять режим работы последнего. При этом различные требуемые в разные периоды времени мощности аккумуляции (см. рис. 2) при постоянной энергоемкости накопителя вызовут лишь изменение длительности единичного цикла срабатывания реактора синтеза, включающего в себя период накопления электроэнергии, разряд накопителя на ПФ и нейтронное облучение blankets, т. е. в конечном счете изменят лишь частоту срабатывания плазменного фокуса, но не его энергозапас и выходную мощность в течение цикла (которые определяют, соответственно, нейтронный выход ПФ и эффективность наработки топлива в blankets).

Весьма важным обстоятельством, выгодно отличающим аккумулирующую станцию на основе ПФ от других таких станций классического и термоядерного типов, является то, что ее включение (т. е. начало потребления этой станцией энергии) является практически безынерционным и не требует дополнительного расхода энергии.

Рассмотренная схема данной энергетической установки характерна тем, что ПФ в ней не предназначен для непосредственной выработки электрической или тепловой энергии. «Паразитное» время работы ПФ на blankets из обедненного урана, которое раньше стремились уменьшить из-за «бесполезности» установки в этот период [5], в предлагаемой схеме может быть соотнесено с временем работы входящего в данный комплекс ядерного реактора, для которого, собственно, и производится наработка топлива.

Главный показатель эффективности гибридной установки на основе ПФ определяется не ее собственной сомокупаемостью (которая в сравнении с другими термоядерными источниками оказывается пренебрежимо мала — основную стои-

мость в гибридной части комплекса будет составлять его бланкетная часть), а экономическими показателями всего энергетического комплекса в целом, включая средства обеспечения безопасности работы и экологической чистоты. Следует подчеркнуть, что именно последние оказываются наиболее существенными составляющими эффективности установки с ПФ, так как эти показатели весьма выгодно отличают ее от бридеров и симбиотических станций, в которых предполагается использовать другие термоядерные нейтронные источники. Причинами, обеспечивающими преимущество установок на основе ПФ, являются:

экологическая чистота самого ПФ, не требующая спецхранилищ для этого устройства в период его бездействия или транспортировки, его безопасность в отношении терактов в отличие от бридеров и других мощных источников нейтронного излучения на основе делящихся материалов;

принципиальная невозможность для ПФ "ухода в разнос" во время его эксплуатации;

использование в гибридном варианте блока на основе ПФ глубоко подкритического blankets (максимально доступный коэффициент умножения по нейтронам в нем может быть выбран заранее в зависимости от вида загружаемого в него исходного материала — в случае blankets из природного или обедненного урана по работам [5, 7, 10] он составлял величину не более 250 при среднем значении 100) весьма малого веса (в указанных работах обсуждались варианты с четырех- и полутонными blankets — ср. с 1000-тонным blanketом в случае токамака [11]);

легкая интегрируемость ПФ в современные энергокомплексы (малые габаритные размеры этой установки по сравнению с токамаками, открытыми ловушками, сильноточными ускорителями и другими термоядерными установками с магнитным или инерциальным удержанием плазмы, отсутствие повышенных требований к чистоте помещений, как это требуется в случае мощных лазерных инициаторов термоядерного горения, сравнительно малая номинальная мощность энергоблока на основе ПФ, сравнимая с мощностью типичного энергоблока атомных станций, в отличие от минимально возможной мощности гибридных реакторов на основе токамака либо лазерного УТС, более чем на порядок превышающих мощность современной атомной станции), позволяющая использовать помещения современных электростанций.

Кроме того, представляет интерес рассмотрение возможностей использования части телесного угла выхода потока 14 МэВ-нейтронов ПФ для помещения в blanket отработавших в атомном реакторе материалов для их "дожигания" до короткоживущего, долгоживущего или стабильного состояний. Рассмотрению этого направления, представляющегося в настоящий момент перспективным с точки зрения переработки отходов атомных станций, будет посвящена отдельная работа.

Приведенная схема предусматривает использование ПФ и в смешанном режиме аккумуляции-генерации. Однако такое ее рассмотрение возможно лишь в конкретном экономико-техническом контексте.

Отметим, что именно рассматриваемая схема использования ПФ, на наш взгляд, в большой степени разрешает сомнения в практической применимости его в промышленных масштабах на уровне энергии питания, представляющемся в настоящее время вполне технически достижимым.

Остановимся на тех проблемах, которые необходимо решить, чтобы обеспечить реализацию конкретных проектов, базирующихся на основе вышеописанной схемы. Здесь имеет смысл говорить о теоретических и практических проблемах, причем теоретические проблемы имеются не только в электротехнической части, но и в области физики процессов, используемых в гибридной части описанной энергетической установки.

Из проблем, связанных с физикой ПФ, важнейшей, безусловно, является проблема нейтронного масштабирования установок данного типа. В этой связи наиболь-

ший интерес представляют два вопроса — на каком уровне энергетики установка ПФ будет удовлетворять требованиям по нейтронному выходу, необходимому для успешной работы в составе нашей схемы, и сохранится ли на этом уровне мощности физическая картина процессов, ответственных за эмиссию нейтронов в ПФ?

Общепризнанным является тот факт, что нейтронный выход ПФ растет с ростом величины тока, протекающего через пинч, по закону $N \sim I^4$. При этом большинство экспериментальных данных свидетельствуют в пользу того, что ответственными за основную часть нейтронной эмиссии являются ускоренные в ПФ за счет коллективных процессов ионы т. н. “промежуточных” энергий (30—150 кэВ). Будучи замагниченными, они вращаются в магнитном поле, окружающем пинч, и взаимодействуют с горячей (~1 кэВ) плазмой пинча по мишенному механизму [12]. Согласно последним экспериментам [13], для поддержания этого механизма генерации нейтронов с вышеуказанным масштабированием, т. е. для сохранения КПД ускорительных процессов и относительной доли тока, протекающего через пинч, необходимо предпринимать специальные меры, противодействующие режиму насыщения ионной компоненты полного тока. Ряд шагов, предпринимаемых в этом направлении на современных лабораторных установках ПФ, относится к областям науки, связанным с физикой сверхскоростного микроконтакта (микроструктур, возникающих в зоне соприкосновения ускоряющейся плазменной оболочки с металлическими электродами) и с радиационным материаловедением. На этих путях удастся успешно осуществлять проводку токовоплазменных оболочек при мультимегаамперных значениях ведущих токов со скоростями до 1000 км/с [14].

Как известно, до настоящего времени в эксплуатации находились четыре установки ПФ, успешно работавшие в качестве мощных импульсных нейтронных источников на уровне энергии питания 0,3—0,5 МДж [12, 14—16]. При работе на дейтерии в качестве рабочего газа нейтронный выход за одну вспышку на этих установках составил 10^{12} н/имп при пересчете энергии использованной батареи на 0,5 МДж. Перевод установки ПФ на работу с газовой смесью дейтерия с тритием, как известно [17], приводил к увеличению нейтронного выхода на два порядка по величине. Это означает, что на указанных установках был достигнут энергетический КПД “от розетки” порядка 0,1 %. Учитывая, что в этих установках “коэффициент использования питания” (т. е. энергия, потерянная за первый полупериод разряда конденсаторной батареи, после которого размыкание тока при его нулевом значении позволит сохранить оставшуюся часть, отнесенная к полному энергозапасу) не превышает 0,3, согласно современному опыту можно рассчитывать на достижение энергетического КПД плазмодифокусной части на уровне единиц процентов при энергетике ПФ в несколько МДж, а при 30—100 МДж возможно достижение равенства полученной и вложенной энергий. Принимая во внимание, что в нашей схеме полный КПД аккумулирующей части на основе ПФ должен быть порядка 60—80 % и что ожидаемый коэффициент умножения по мощности в бланкете составит в среднем 30, видно, что предлагаемая нами схема симбиотической станции с ПФ может быть реализована на уже освоенном уровне энергетики быстрых термоядерных установок в несколько МДж и должна превысить уже успешно работавшие нейтронные источники этого типа по энергопитанию всего лишь в несколько раз. При этом ожидаемые параметры плазмы в такой установке (полученные на оценочном уровне с использованием условий Беннета и Лоусона, а также простых газодинамических и электродинамических соотношений) оказываются уже достигнутыми в различных современных электроразрядных установках (правда, каждый по отдельности):

ток через пинч и ток пучка ускоренных ионов	
“промежуточных энергий”, МА	10—20
полупериод тока, мкс	30—100

радиус камеры, м	2—4
начальная плотность рабочего газа, мбар	30
начальная плотность плазмы пинча ("мишени"), см ⁻³	$10^{20} \div 10^{21}$
характерное время удержания плазмы пинча и время взаимодействия "пучок-горячая мишень", нс	100
высота пинча, см	10—20
диаметр пинча, см	1

Одна из проблем установок ПФ, поставленная в начале 80-х годов, — насыщение нейтронного выхода, проявившееся при наращивании энергетики ПФ за счет увеличения напряжения батареи питания, — представляется в настоящее время преодолимой на путях предотвращения начального пробоя через газ (использованием новых конфигураций электродов и управлением механизмом пробоя), подавления эффекта насыщения ионной составляющей тока (использованием новых материалов и специальными процедурами кондиционирования разрядных камер) и рядом конструктивных и технологических особенностей камер ПФ. Тестовые испытания этих мер, как ожидается, пройдут на установках нового поколения в Польше, России и Аргентине на энергетике 0,5—0,2 МДж в ближайшие три-четыре года.

Преимущества установок ПФ нового поколения по сравнению с находившимися до настоящего времени устройствами этого типа следующие.

1. При токах порядка 10—20 МА магнитное поле пинча возрастает до такого значения, что α -частицы (продукты реакции синтеза) должны замагнититься. При ожидаемом одновременном увеличении плотности плазмы в пинче можно надеяться на "подогрев" последней, что должно повысить КПД ПФ, т. е. снизить требования на его энергетику или на бланкет.

2. При вышеуказанных токах резко возрастут параметры плазмы пинча в момент первого сжатия. Как показывают оценки, они могут оказаться близкими к термоядерным, так что термоядерный механизм генерации нейтронов, который был в ПФ до сих пор несущественным, может оказаться сравнимым с мишенным и внести существенный вклад в общий выход, подняв КПД.

3. Вышеупомянутые токи по своей величине значительно превышают теоретическое значение т. н. "тока Пиза-Брагинского", что может способствовать развитию явления радиационного коллапса [19] и увеличению КПД нейтронного источника на основе ПФ.

Одна из существенных технических задач — разработка эффективных накопителей электроэнергии для питания ПФ. Несмотря на имеющийся в этой области прогресс, существующие опытные накопители еще достаточно сложны и громоздки. Важным здесь является не возможность принципиального их осуществления, которая для установок с энергией и током соответственно порядка 10 МДж и 10 МА не вызывает сомнений, а их экономичность и эксплуатационные качества. Необходимая в нашей схеме система питания должна состоять из: зарядного устройства; импульсного накопителя энергии и разрядного устройства (включателя или размыкателя тока, соответственно, для емкостного или индуктивного накопителя).

Рассмотрим на примере емкостного модуля, состоящего из четырех конденсаторов, находящегося в эксплуатации в условиях, близких к требуемым, какие параметры источников питания представляются достижимыми в настоящий момент [18].

Зарядные устройства мощностью 100 МВт, выпрямляющие ток на уровне напряжения питания 20—50 кВ и способные работать с частотой повторения порядка 10 Гц, вполне достижимы. Пути сокращения их массы и увеличения КПД лежат в области использования высокочастотных ферритов, и в данный момент они уже успешно опробованы на уровне выпрямляемых мощностей порядка еди-

ниц мегаватт. Их использование при параллельном включении на нагрузку трудностей не представит. Ресурс работы этих установок сравним с серийными современными электротехническими устройствами, и при проведении стандартных профилактических работ практически неограничен.

Импульсные конденсаторы на касторовом масле (10 мкФ, 30 кВ, 10 нГн), изготавливаемые в СППТИ, позволяют снимать ток до 350 кА с каждого элемента батареи, способны работать в режиме повторяющихся импульсов с частотой до 10 Гц и обладают ресурсом до 1 млн. разрядов при колебательном режиме разряда. Переход на периодический режим (путем использования варикапов, управляемых вентилей или дополнительной батареи конденсаторов, включаемой встречно к основной через установку ПФ) и снижение используемого напряжения в два раза (что приведет к увеличению размеров накопителя в четыре раза, но повысит ресурс в число раз, равное отношению напряжений в 6-й степени) способны увеличить ресурс емкостного накопителя еще на несколько порядков по величине. Это означает, что батарея конденсатора при средней частоте срабатывания 10 Гц может находиться в эксплуатации непрерывно в течение промежутков времени, измеряемых годами. Этого вполне достаточно для наших целей.

Что касается включателей батареи на камеру ПФ, то это настоящий этап развития высоковольтной техники, который характеризуется отказом от широко применявшихся ранее вакуумных разрядников либо разрядников высокого давления. Их практически вытеснили т. н. "псевдоразрядники" (тиратронного типа включатели с полупроводниковым катодом) и управляемые полупроводниковые вентили. Ресурс этих устройств пока окончательно не выяснен, однако практика их безотказной работы в импульсных высоковольтных схемах с нагрузкой типа ПФ на протяжении 1 млн. разрядов в герцовом режиме вселяет надежды на возможность удовлетворения с их помощью всем требованиям, предъявляемым к этому элементу схемы.

Другая проблема, которая пока еще не ставилась перед разработчиками, но непременно возникнет при реализации рассмотренной схемы использования ПФ, заключается в обеспечении безопасных взаимных отношений между ядерными частями установок деления, синтеза и бланкетом. Несмотря на кажущуюся простоту, подробная проработка рассматриваемой нами схемы еще вызовет технические трудности, в первую очередь, связанные с безопасностью энергокомплекса в целом.

Литература

1. Filippov N. V., Fillipova T. I., Vinogradov V. A. Nuclear Fusion, Supplement, part 2, 1961.
2. Proceedings of the International Conferences on EMERGING NUCLEAR ENERGY SYSTEMS (1-st through 7-th), e. g. ISBN 9971-50-170-8; ISBN 981-02-0010-2, etc.
3. Nuclear Technologies in a Sustainable Energy System, ed. by G. S. Bauer and A. McDonald, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New-Yor, 1983.
4. Harms A. A. Atomkernenergie 32, 1, 1978, 3.
5. Gribkov V. A. Atomkernenergie-Kerntechnik Bd. 36 (1980) Lfg. 3. P. 167—169.
6. Teller E. Invited lecture at the International Workshop on Plasma Focus, Stevens Institute of Technology, Hoboken, New Jersey, 1991.
7. Феоктистов Л. П. и др.// Квантовая электроника, 1978. Т. 8/2.
8. Грибков В. А., Тягунов М. Г. Ав. св. 1101038 от 11.03.1984.
9. Грибков В. А., Тягунов М. Г. Ав. св. 1026439 от 1.03.1983.
10. Gribkov V. A., Tyagunov M. G. in [3]. P. 187—202.
11. Велихов Е. П., Кадомцев Б. Б., Орлов В. В.// Теплоэнергетика, 1978. Т. 11. С. 17.
12. Gouylan C., Kroegler H. Maisonnier, Ch., et al.// Nuclear Fusion Supplement, 1979. V. 2. P. 123.
13. Gribkov V. A., Dubrovsky A. V. et al.// IV Latin American Workshop on Plasma Physics.— Buenos Aires, Argentina, 1990. V. 1. P. 120—123.

14. Грибков В. А., Дубровский А. В. и др.// Физика плазмы, 1988. Т. 14. Вып. 8. С. 987–992.
15. Mather J. W. Methods of Experimental Phys., 2B, p. 222. — New York, Academic Press, 1971.
16. Roger J. P., Robouch B. V. et al.// Preprint of Associazione Euratom-CNEN Sulla Fusione, Frascati, May, 1981.
17. Выскубов В. П., Грибков В. А., Чеблукон Ю. Н. и др.: Сб. Краткие сообщения по физике/ ФИАИ, 1979, № 12. С. 37.
18. Lee S., Zhang G. X., Gribkov V. A., et al. — Singapore Journal of Physics, 1997, in print.
19. Koshelov K. N., Pereira N. R.// J. Appl. Phys, 1991. № 69 (10), 15 May. P. R 21–44.

DPF-BASED HYBRID REACTOR USE FOR ENERGY STORE: CRITERIA AND OPPORTUNITITES

V. A. Gribkov, M. Scholz

S. Kaliski Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion skr. poszt. 49, ul. Hery 23, 00-908
Warszawa, Polska

M. G. Tyagunov,

Moscow Energetics Institute (Technical University), Moscow, Russia

Any new energy source to be perspective of introducing into the basic energy system would be treated in a very tight connection with a contemporary base of energy and take into account its development forecasts. Between the most important energetics problems at present moment the problem of energy accumulation — especially in view of the problem of the energy consumption (load) regime irregularity is of a particular interest. In this paper a scheme of the energy complex consisting of a fission reactor and a hybrid nuclear fusion reactor based on the Dense Plasma Focus device (DPF) is examined. The advantages of the scheme in a comparison with the known from the literature another nuclear energy sources are discussed. The analysis of the technology and physics questions to be resolved for the scheme realization is provided. Some ways how to overcome the difficulties are shown.