

О возможности МГД-преобразования энергии импульсных термоядерных реакторов

ВЕЛИХОВ Е. П., ГОЛУБЕВ В. С., ЧЕРНУХА В. В.

УДК 621.039:621.362

В последнее время в ряде стран исследуются различные методы импульсного нагрева термоядерной плазмы. Некоторые из них позволяют заметно уменьшить выделяющиеся в конструктивных элементах реактора нейтронный поток и долю термоядерной энергии введением специального бланкета, испаряемого при нагреве. К таким методам можно отнести «микровзрывы» на основе лазерного [4] или электронно-пучкового [2] поджига, пинчевые системы с лайнером, например тэта-пинч [3].

Преобразование термоядерной энергии в электрическую возможно различными способами. В работе [4] рассмотрена импульсная термоядерная электростанция (ИТЭС) на основе лазерного поджига с применением паротурбинного генератора. В настоящей работе обсуждается возможность использования некоторых схем кондукционных и индукционных МГД-генераторов для перспективных электростанций мощностью ~ 10 Гвт. Реактор такой электростанции представляет собой специальную охлаждаемую камеру, в которой производится импульсное энерговыделение. Его величина ограничена снизу необходимостью обеспечения высокой мощности энергетического блока, сверху — технико-экономической возможностью создания взрывной камеры. Для энергетики интересным является диапазон энерговыделений $10^{10} - 10^{12}$ Дж. Термоядерное устройство включает в себя бланкет, воспринимающий основную долю выделяющейся энергии, а также воспроизводящий нестабильный компонент горючего (третий).

Из-за конвективного охлаждения рабочего тела в камере максимальная температура термодинамического цикла не превышает 2—3 эв. Максимальное давление плазмы зависит от режима нагружения камеры взрывом. При ударном нагреве заполняющего камеру газа допустимое давление не превышает ~ 1 кбар. Более высокий уровень давления может быть достигнут при демпфировании ударной волны взрыва.

Столь высокие параметры рабочего тела позволяют в принципе иметь высокоэффективный термодинамический цикл, особенно при использовании одноатомного газа. Однако комплекс требований, предъявляемых к бланкету, наполняющему камеру газу и охладителю, вводимому в рабочий объем, а также соображения удоб-

ства замыкания контура рабочего тела и термодинамического цикла (как правило, цикла Ренкина) в ряде случаев делают более предпочтительным применение в качестве рабочего тела пара щелочного металла (Li, Na, K).

Ниже приведены расчеты для некоторых схем МГД-генераторов, позволяющие оценить трудности, стоящие на пути достижения высоких к. п. д. преобразования энергии импульсных термоядерных реакторов (ИТЯР).

Кондукционный плазменный МГД-генератор (КМГДГ)

Применение квазистационарных МГД-генераторов для преобразования энергии импульсного термоядерного реактора имеет свою специфику, связанную с нестационарностью процесса истечения рабочего тела из камеры сгорания, что, с одной стороны, снижает к. п. д., а с другой, усложняет задачу согласования тока с нагрузкой.

Наибольший к. п. д. можно получить при меняющихся в течение цикла параметрах тока. Например, параметры сверхзвукового фарадеевского МГДГ со сплошными электродами (рис. 1) получены в следующих предположениях: рабочее тело — литий; энерговыделение в импульсе 10^{11} Дж; средняя по импульсу электрическая мощность МГДГ 10 Гвт; максимальное давление в камере 1 кбар; максимальная температура термодинамического цикла 1 эв; истечение из камеры адиабатическое; режим течения в МГДГ — постоянная по каналу статическая температура плазмы, снижающаяся до 0,35 эв в процессе опорожнения камеры; коэффициент нагрузки ($K = 0,85$) не меняется во времени; допустимо снижение числа Маха в 2 раза; дли-

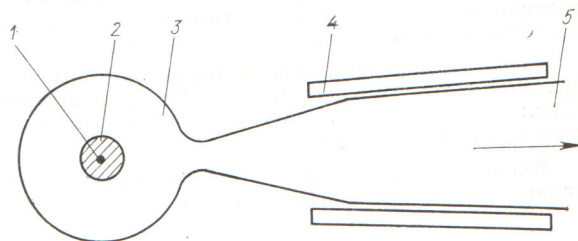


Рис. 1. Схема кондукционного МГДГ для ИТЯР: 1 — термоядерный заряд; 2 — испаряющийся бланкет; 3 — корпус реактора; 4 — магнит МГДГ; 5 — канал МГДГ.

на канала в 5 раз больше выходной ширины, расширение двухстороннее.

Оптимизировалось использование внутренней энергии плазмы при ее истечении из камеры через МГД-канал, что определило начальную статическую температуру ($\sim 0,5$ эв) и входное число Маха $M_0 = 4$. При этом выдвигается требование постоянства длины торможения во времени, что приводит к необходимости регулирования магнитного поля (в нашем примере на 40%). Получены следующие величины: радиус сферической взрывной камеры $\sim 4,5$ м; эффективность использования энтальпии плазмы в камере $\sim 0,8$; эффективность МГД-преобразования $\sim 0,5$; полная эффективность (за вычетом теплоты испарения) $\sim 0,4$; время истечения из камеры $\sim 4,5$ сек, максимальная мощность 25 Гвт; максимальное напряжение (примерно постоянное вдоль канала) 8,5 кВ, магнитное число Рейнольдса по ширине канала 0,4; критическое сечение 0,025 м², входное сечение 0,35 м², выходное сечение 2 м², длина канала 7 м; длина торможения 2 м; максимальная индукция 1,2 тл.

В рассмотренном примере не учитывались тепловые потери на стенку камеры вследствие лучистой теплопроводности, гидродинамической турбулентности и свободной конвекции. Последняя является наиболее существенной. При $T = 2$ эв время остывания на порядок больше эффективного времени истечения, т. е. полученная эффективность является предельно возможной, а температура предельно допустимой.

Переменность параметров тока во времени требует введения в электрическую схему специального согласования с нагрузкой. Если же требовать их постоянства, то переменной во времени будет эффективность преобразования.

Вследствие нестационарности истечения средняя эффективность снижается в 1,5—2 раза. Некоторого улучшения к. п. д., но за счет усложнения конструкции можно добиться в дисковом фарадеевском МГД-генераторе.

Отметим некоторые физические проблемы создания подобных высокотемпературных МГДГ. Предположение о возможности работы при изменении числа Маха в два раза хотя и кажется вполне реальным, но еще требует экспериментальной проверки. Получение безотрывного течения может потребовать специальных технических приемов (профилировки канала, отсоса пограничного слоя и т. п.). Вопрос об устойчивости течения относительно акустических возмущений облегчен тем, что параметр Холла в рассматриваемых условиях много меньше единицы. Уровень объемного джоулева тепловыделения составляет 1 квт/см³, так что не возникает отрыва электронной температуры от температуры нейтралов, плазма равновесна. Плотность КМГДГ $\sim 10^2$ а/см², напряженность электрического поля $\sim 10^2$ в/см, что лежит в пределах экспериментально освоенных величин. Тепловые потери на стенки камеры и канала хотя и возможно грубо оценить, но необходимы эксперименты для их точного учета и специальные технические устройства (например, вдув через пористую стенку) для защиты стенок от теплового разрушения.

Индукционный МГД-генератор (ИМГДГ)

При импульсном выделении энергии более логичным представляется применение импульсного индукционного МГД-генератора, например, на основе проводящего поршня, периодически вытесняющего магнитное поле соленоид

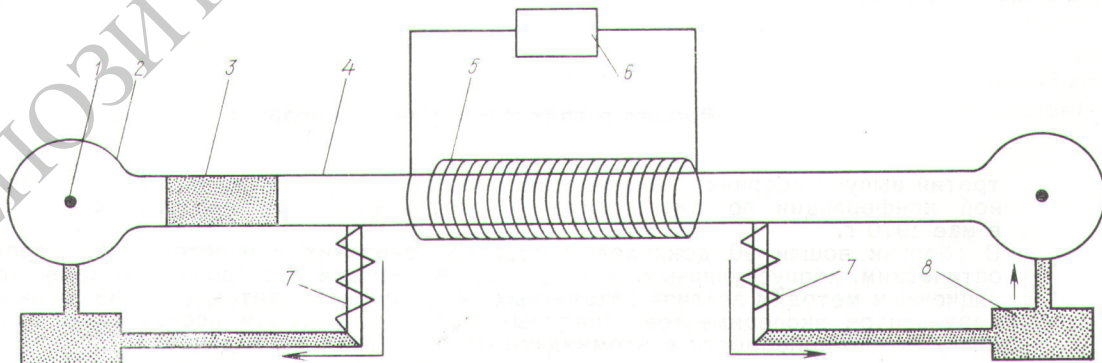


Рис. 2. Принципиальная схема индукционного МГДГ для ИТЯР:

1 — термоядерный заряд; 2 — камера взрыва; 3 — поршень; 4 — канал расширения; 5 — соленоид; 6 — нагрузка; 7 — теплообменник-конденсатор; 8 — приемник жидкого металла и устройство ввода заряда (с бланкетом).

(рис. 2). Здесь рассмотрена двухкамерная схема, использующая энергию взрыва для разгона поршня с последующим его частичным торможением в магнитном поле, энергия которого намного превышает энергию поршня. В качестве последнего выгоднее использовать металлический проводник, поскольку в случае плазменного проводника эффективность преобразования ниже. Это связано с недостаточностью большими разогревом (3—5 эв) и проводимостью скин-слоя, а также ограничением на минимальную температуру рабочего тела.

Энергия, переданная магнитному полю, потребляется специально подобранной нагрузкой в течение времени взаимодействия поршня с полем. Одна из наиболее простых электрических схем показана на рис. 2. Предполагается, что будут найдены инженерные решения, которые позволят охладить металлический поршень и обеспечить его устойчивость при ускорениях, так что, проходя сквозь соленоид, он будет двигаться как одно целое. Эффективность преобразования энергии взрыва в электрическую определяется к. п. д. разгона и торможения поршня.

При характерных температурах, размерах и временах тепловые потери на стенки малы и процесс расширения рабочего тела близок к адиабатическому (в частности, в рассмотренном примере тепловые потери вследствие естественной конвекции не превышают 1%). Потери на трение, зависящие от конструкции поршня, не учитывались.

При использовании в качестве рабочего тела паров металлов (Na, K), может быть достигнута эффективность разгона поршня до 0,8. После того как поршень разогнан, пар конденсируется впрыском жидкого металла. Степень конденсации определяется плотностью пара в камере, необходимой для производства следующего

взрыва. Джоулевы потери падают с ростом энерговыделения Q в импульсе как $Q^{-1/6}$ (в интересующем нас диапазоне Q не превышают 20%).

Примерные параметры ИМГДГ со средней электрической мощностью 5 Гвт, натриевым поршнем и рабочим телом следующие: энерговыделение в импульсе $\sim 7 \cdot 10^{10}$ Дж; время между взрывами ~ 12 сек; максимальные давление и температура в камере ~ 1 кбар и 1,1 эв; ее объем ~ 300 м³; минимальная и максимальная скорости поршня ~ 30 и 100 м/сек, масса поршня ~ 16 кг; магнитное поле соленоида $\sim 4,5$ тл, его энергия $\sim 10^{12}$ Дж, длина ~ 65 м, диаметр ~ 13 м; степень расширения ~ 200 ; эффективность разгона поршня $\sim 0,7$; джоулевы потери $\sim 0,1$; общая эффективность преобразования энергии взрыва в электрическую $\sim 0,6$. Такова же эффективность и при использовании калия.

Итак, кондукционный плазменный МГДГ для ИТЯР представляется физически осуществимым. По эффективности он сравним с паротурбинным генератором. Его применение экономически оправдано как в качестве самостоятельного преобразователя, так и в сочетании с паротурбинным. Индукционный поршневой МГДГ по эффективности превосходит паротурбинный генератор и может представлять интерес для перспективной энергетики на основе ИТЯР.

Поступила в Редакцию 24/IX 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nuckolls J. e.a. «Nature», 1972, v. 239, p. 139.
2. Winterberg E. «Nucl. Fusion», 1972, v. 12, p. 353.
3. Boris I., Shanny R. Proc. of 2nd Topical Conf. on Pulsed High-Beta Plasmas. Garching, BRD, July 1972, P-G10.
4. Booth L. Central Station Power Generation by Laser-Driven Fusion, LA-4858-MS, 1972, v. I.

Вышел в свет и поступил в продажу

третий выпуск сборника «Диагностика плазмы», содержащий материалы Всесоюзной конференции по диагностике высокотемпературной плазмы, состоявшейся в мае 1970 г.

В сборник вошли 90 докладов и обзоров советских и иностранных авторов по оптическим, корпускулярным, микроволновым методам исследования плазмы; корреляционным методам анализа плазменных экспериментов; автоматизации обработки результатов экспериментов; зондовым и другим методам исследования плазмы. Книгу можно приобрести в Атомиздате (Москва, К-31, ул. Жданова, 5/7).