

representation of the production process by Petri nets providing a permissibility of the solution is offered. The example of optimization of existing technological process is given.

Keywords: structure and strategy, technological process, technological equipment, production system, product range model, genetic algorithm

Получено 08.11.10

УДК 53.01.07

Е. А. Морозов, доктор технических наук, профессор;
И. Н. Ефимов, доктор технических наук, профессор;
Чайковский технологический институт (филиал)
Ижевского государственного технического университета
В. А. Алексеев, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет

О ВОЗМОЖНОСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ В МИКРООБЪЕМЕ

Обоснована возможность осуществления микротермоядерного синтеза при условии обеспечения высокоточной фокусировки ионных потоков большой энергии.

Ключевые слова: микротермоядерный синтез, высокоточная фокусировка, ионные потоки, большая мощность

Получение управляемого термоядерного синтеза, процесса слияния легких атомных ядер, с регулируемым выделением энергии при высоких температурах – одна из важнейших научно-технических проблем современности. Огромное значение, которое придается исследованиям в области управляемого термоядерного синтеза, объясняется рядом причин. Нарастающее загрязнение окружающей среды настоятельно требует перевода промышленного производства планеты на замкнутый цикл, при котором возникает минимум отходов. Но подобная реконструкция промышленности неизбежно связана с резким ростом энергопотребления. Предполагается, что к 2050 г. производство энергии в мире возрастет примерно в три раза по сравнению с нынешним уровнем и достигнет 10^{21} Дж в год. Между тем ресурсы минерального топлива ограничены и при сохранении существующих темпов развития энергетики будут исчерпаны на протяжении ближайших десятилетий (нефть, горючие газы) или столетий (каменный уголь). Переход от органических топлив к широкомасштабной альтернативной энергетике намечается к середине XXI века. Ожидается, что возобновляемые источники энергии, такие, как солнечная энергия, энергия ветра, гидроэлектроэнергия, сжигание биомассы, будут использоваться в переменной составляющей потребления энергии, сглаживающей суточные и сезонные колебания.

Основной и единственный кандидат для базовой энергетики – это ядерная энергия. Переход энергетики в глобальном масштабе на ядерные реакторы деления ставит сложные проблемы захоронения огромных количеств долгоживущих радиоактивных отходов. Основное и принципиальное отличие термоядерной энергетики заключается в отсутствии долгоживущих изотопов (так называемый «чистый» реактор).

Таким образом, для снижения радиоактивности до безопасного состояния у выработавшего ресурс термоядерного реактора требуется около тридцати лет. По

имеющимся оценкам, радиоактивная безопасность эксплуатации установок управляемого термоядерного синтеза окажется на три порядка выше, чем у реакторов деления. Кроме низкой радиоактивности и высокой безопасности, термоядерная энергетика имеет практически неисчерпаемые запасы топлива и других необходимых материалов, достаточных для производства энергии в течение многих сотен, если не тысяч лет.

Основной проблемой реализации управляемого термоядерного синтеза является получение плазмы, нагретой до температуры 10–50 КэВ, и ее удержание в течение времени протекания реакции. За сорок лет интенсивного исследования в данной области сформировались два направления предполагаемого решения, определяющие тип создаваемых реакторов: реакторы с магнитным удержанием плазмы и реакторы с инерционным удержанием плазмы.

Первое направление представляют реакторы типа токамак и стелларатор. В реакторах этого типа дейтерий-тритиевая плазма объемом $\sim 1 \text{ м}^3$ и плотности $\sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$, находится в магнитном поле специального вида, которое выполняет роль стенок сосуда. Первоначальный разогрев плазмы осуществляется внешними источниками, которыми являются газовый разряд, пучки ионов высоких энергий, ВЧ- и СВЧ-генераторы. Предполагается, что при достижении температуры $\sim 10^7 \text{ К}$ дальнейшее поддержание горения будет осуществляться за счет образующихся в процессе термоядерной реакции ионов гелия He^4 (так называемый режим стационарного горения). Считается, что это наиболее короткий путь к осуществлению управляемого термоядерного синтеза.

В этой связи нельзя не отметить колоссальные затраты, понесенные мировым сообществом за пятьдесят лет на развитие этого направления. В частности, одна только стоимость проекта международного экспериментального термоядерного реактора ITER (ИТЭР) обошлась учредителям в 1,5 млрд долл. Стоимость же его строительства до 2011 г. составит 5 млрд долл. [2]. При этом подчеркнем, что речь идет не об опытно-промышленном реакторе. Цель проекта – продемонстрировать практическую возможность стационарного горения. Тем более затраты значительно возрастут при строительстве и эксплуатации промышленных реакторов подобного типа. Вместе с тем нельзя утверждать, что именно этот тип устройства будет положен в основу термоядерного реактора будущего.

В настоящее время первое направление термоядерных установок представлено следующими лабораторными реакторами: типа токамак T-15 (Россия), JET (Европа), TFTR (США), JT-60U (Япония); типа стелларатор WVII-X (Германия), LHD (Япония). Мощности этих реакторов недостаточны для осуществления режима стационарного горения. Таким образом, их назначение – отработать пути подхода к управляемому термоядерному синтезу. Осуществляется реализация проекта международного экспериментального термоядерного реактора ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor (Европа, Китай, Россия, США, Республика Корея, Япония) [2]. Ввод в действие токамака ИТЭР намечено на 2010–2011 гг. Его цель – продемонстрировать практическую возможность термоядерного зажигания и стационарного горения (без производства электроэнергии). Что же касается опытно-промышленного реактора ДЕМО, осуществляющего демонстрационное производство электроэнергии, то его строительство следует ожидать не ранее 2030 года.

Другое направление управляемого термоядерного синтеза представлено импульсными системами с инерционным удержанием плазмы, называемыми драйве-

рами [1]. Это направление предполагает осуществлять реакцию в малых объемах $\sim 1\text{--}10\text{ мм}^3$ высокоплотной плазмы, полученной за счет сжатия термоядерных мишеней при взаимодействии с лазерными или ионными импульсами высокой энергии. Характерная продолжительность взаимодействия составляет $\sim 10^{-10}$ с и осуществляется фокусировкой энергии сразу нескольких источников $\sim 10^{14}$ Вт/см.

Таким образом, драйвер представляет собой устройство, осуществляющее серию сверхмалых термоядерных взрывов. Драйверы получили наибольшее развитие в лазерно-импульсных установках. Основной проблемой в этом случае является даже не создание сверхмощных лазерных импульсов, что технически вполне осуществимо, а крайне низкий КПД лазерных установок. Для того чтобы лазеры могли служить драйвером реактора термоядерной электростанции, их стоимость должна быть снижена примерно на два порядка величины [4]. Основной проблемой создания драйверов на легких ионах считается создание пучков ионов большой мощности и их фокусировка с требуемой точностью. Что же касается драйверов на тяжелых ионах, то их создание сопряжено с колоссальными техническими трудностями. В частности, нужны ускорители, создающие пучки ионов с энергиями ~ 10 ГэВ, с пиковым током в $\sim 20\text{--}40$ кА и со средней мощностью 15 МВт. Заметим, что один только объем магнитной системы такого ускорителя сравним с объемом магнитной системы типа токамак, и, следовательно, предполагаемая стоимость реакторов этого типа будет такого же порядка.

Второе направление представлено лазерными драйверами: ИСКРА 5, ДЕЛЬФИН (Россия), RHEBUS (Франция), NOVA, OMEGA, NIF (США), GEKKO XII (Япония). Пока существует только один ионный драйвер на легких ионах PBFA II (США), позволяющий создавать импульсы $1,5 \cdot 10^{-10}$ с ионов лития с энергией 30 МэВ [5]. В настоящее время как в Европе, так и в США принято решение сосредоточить основные усилия на развитие драйверов на тяжелых ионах. Предполагается, что эти драйверы будут разработаны к 2010–2020 гг. Основной интерес к таким установкам в настоящее время обусловлен не столько задачей создания управляемого термоядерного синтеза, сколько возможностью исследования в области ядерного оружия, в условиях полного запрещения ядерных испытаний.

Таким образом, анализ состояния исследований позволяет сделать вывод, что термоядерная энергетика на основе существующих направлений – лишь потенциальный кандидат для базовой энергетики будущего, при этом кандидат крайне затратный.

Рассмотрим еще один способ осуществления управляемой термоядерной реакции, который возник, по-видимому, одновременно с самой идеей управляемого термоядерного синтеза и с тех пор считается безоговорочно ошибочным. Прочитируем отрывок из работы [1]:

«Самый простой способ получения энергии ядерного синтеза, который сразу приходит в голову, это использовать ускоритель ионов и бомбардировать, скажем, ионами трития, ускоренными до энергии 100 КэВ, твердую или газовую мишень, содержащую ионы дейтерия. Однако инжектируемые ионы слишком быстро замедляются, сталкиваясь с холодными электронами мишени, и не успевают произвести энергию, достаточную для того, чтобы покрыть энергетические расходы на их ускорение, несмотря на огромную разницу в исходной (порядка 100 КэВ) и произведенной в реакции энергии (порядка 10 МэВ). Другими словами, при таком „способе“ производства энергии коэффициент воспроизводства энергии $Q_{fus} = P_{\text{синтез}}/P_{\text{затрат}}$ будет меньше 1».

Проанализируем приведенный аргумент. Действительно, инжектируемые и ускоренные ионы, сфокусированные на поверхности, замедляются в основном за счет ионно-электронного взаимодействия. Это приводит к локальному нагреву до температур много меньших требуемых для осуществления термоядерных реакций. Однако вывод о невозможности осуществления локального термоядерного синтеза является преждевременным. В действительности из приведенного аргумента можно сделать только два вывода:

1. Энергетические параметры и степень фокусировки ионных пучков, применяемых в современных технологиях, например, при ионном внедрении, оказываются недостаточными.

2. Для осуществления локальной термоядерной реакции необходимо увеличить энергетические параметры и степень фокусировки ионных потоков до величин, при которых ионно-электронные столкновения перестанут играть определяющую роль.

Обоснуем возможность протекания локального термоядерного синтеза при условии создания непрерывного потока ионов с энергией $\sim 10^5$ эВ, силы тока в пучке порядка 10–100 А, при степени фокусировки 10^{-6} м.

Осуществление заявленного процесса предполагает принципиально иной количественный и качественный уровень технического исполнения ионных источников и фокусирующих систем. Достижение столь высоких параметров неочевидно и требует обоснования.

Фундаментальное ограничение на возможности любой фокусирующей системы дает теорема о сохранения фазового объема [6]. В нашем случае это означает следующее. Пусть имеется источник ионов с площадью испускания $S_{\text{ист}}$. Тогда невозможно осуществить фокусировку всех ионов, вылетающих под всевозможными углами, на площади, меньшей площади источника. Таким образом, для степени фокусировки ~ 1 мкм требуется источник с площадью того же порядка, что ведет к неприемлемо малым значениям тока.

Известны два типа ионных источников: термоэмиссионные и автоэмиссионные [7]. Наибольшее распространение получили термоэмиссионные источники, использующие для получения ионов газовый разряд в плазме. Источники этого типа имеют сравнительно большую излучающую поверхность, ограничивающую возможности фокусировки.

Более перспективным являются автоэмиссионные источники, использующие малые излучающие поверхности и позволяющие получать высокие плотности пучков. Наилучшим соотношением параметров мощности и площади испускания в настоящее время обладают автоэмиссионные жидкометаллические источники ионов (так называемые жидкометаллические ионные пушки) [8]. Устройство работает следующим образом [9]. Игла с радиусом закругления 1–10 мкм, проходящая через плотно прилегающий капилляр, другим концом погружена в резервуар с жидким металлом. Материал иглы выбран таким образом, чтобы жидкий металл смачивал его, но не вступал в химическую реакцию. При смачивании жидкий металл благодаря воздействию капиллярных сил движется вверх по выступающему концу иглы к ее вершине, а любая потеря металла возмещается за счет металла, поступающего из резервуара. На небольшом расстоянии от конца иглы располагается вытягивающий электрод. Между иглой и вытягивающим электродом создается разность потенциалов от 4 до 10 кВ. Вследствие равенства сил электростатического притяжения и поверхностного натяжения пленка жидкого металла на конце иглы образует выступ. Вблизи конца острия возникает сильное электростатическое поле,

которое обеспечивает формирование пучка положительно заряженных ионов металла, которые вытягиваются через круглое отверстие в электроде и формируют поток ионов с током $\sim 10^{-4}$ А. Например, галлиевая жидкометаллическая ионная пушка сканирующего ионного микроскопа Strata 201 Simsmar III XP компании FEI создает ионный ток 1–10 мА при энергии 10 кэВ и амплитуде изменения размеров ионного пучка 5–500 нм. Таким образом, степень фокусировки, достигнутая в настоящее время, при использовании жидкометаллических ионных источников достаточна для осуществления микротермоядерной реакции на поверхности вещества. Очевидно, что увеличение используемого потенциала на порядок и более не представляет технической сложности.

Обоснуем принципиальную возможность увеличения тока жидкометаллического источника на шесть порядков, при условии выполнения теоремы о сохранении фазового объема потока ионов, энергии 100 кэВ и степени фокусировки 1 мкм. Для этого обратим внимание, что теорема о сохранении фазового объема не запрещает сколь угодно точную фокусировку всех частиц, вылетающих с поверхности под одним и тем же углом, в частности, нормальной поверхности. Отсюда следует, что поставленная задача может быть решена за счет замены точечного источника на линейный источник [10], в котором вместо иглы используется пластина в форме лезвия с радиусом закругления кромки ~ 1 мкм. При этом конфигурация пластины (геометрия линии) определяется выбранным типом фокусирующего поля. Незбежное снижение напряженности электростатического поля, препятствующее образованию потока ионов, удастся избежать увеличением разности потенциалов между пластиной и вытягивающим электродом.

Известные статические фокусирующие системы подразделяются на электростатические и магнитостатические [11]. Магнитостатические системы обладают рядом преимуществ, в частности: изолированность зоны реакции от источника магнитных полей, большие энергетические возможности фокусировки, возможность более точного воспроизведения и регулировки параметров поля и т. д. Для решения задачи создания фокусирующей системы для микротермоядерной установки предполагается использовать аксиально-симметричные поля с показательно-степенной зависимостью. Свойства таких полей были исследованы при конструировании 100-см и малогабаритного 12-см магнитных спектрометров Физико-технического института УрО РАН (Ижевск) [12–14], при этом были найдены несколько типов полей, обеспечивающих высокоточную фокусировку линейно-протяженных источников различной конфигурации.

Для осуществления микротермоядерного синтеза предполагается использовать конструкцию, основными элементами которой является торовая вакуумная камера, в которую помещены ионный источник и поверхность реакции. Фокусирующее магнитное поле создается системой круговых контуров с током, расположенных соосно вакуумной камере. Для опытной установки возможны сравнительно малые размеры ~ 1 м³, а реакция осуществляется за счет движения сфокусированного ионного потока по реагирующей поверхности в локальной области $\sim 10^{-6}$ м³.

Таким образом, протекание термоядерной реакции на основе прецизионной фокусировки ионных потоков большой мощности представляется менее затратной альтернативой.

Исследования проводились в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» по теме «Исследование возможности создания микротермоядерного синтеза».

Список литературы

1. Велихов Е. П., Путвинский С. В. Термоядерная энергетика. Статус и роль в долгосрочной перспективе : докл. от 22.10.1999, выполненный в рамках Energy Center of the World Federation of Scientists. URL: <http://www.thermonuclear.narod.ru/rev.html> (дата обращения: 13.11.2010).
2. Велихов Е. П., Миронов С. В. Управляемый термоядерный синтез выходит на финишную прямую. URL: <http://phns.mpei.ac.ru/articles/iter.pdf> (дата обращения: 13.11.2010).
3. Большая Советская Энциклопедия. – 3-е изд. – М. : Совет. энцикл., 1977. – Т. 27. – С. 46.
4. Lindl, J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain // *Physics of Plasmas*. – Nov. 1995. – Vol. 2, Iss. 11. – Pp. 3933–4024.
5. Quintenz, J. P., Matzen, M. K., Mehlhorn, T. A. // *Proceedings of 16th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, 7–11 Oct. 1996, Montreal, Canada, IAEA Vienna 1997. – Vol. 3. – P. 95.
6. Арнольд В. И. Математические методы классической механики. – М. : Наука, 1974. – 432 с.
7. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. Б. А. Введенский. – М. : Совет. энцикл., 1983. – С. 232.
8. Prewett, P. D.; Jefferies, D. K. Characteristics of a gallium liquid metal field emission ion source // *J. of Physics D: Applied Physics*. – 1980. – Vol. 13, Iss. 9. – Pp. 1747–1755.
9. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / под ред. Д. Бриггса, М. П. Сиха. – М. : Мир, 1987. – С. 83–90.
10. Устройство создания ионных потоков : пат. RU 2389105 : МПК H01J27/26 (2006.01) H01J49/10 (2006.01) / Морозов Е. А., Ефимов И. Н. (RU) ; заявитель и патентообладатель Ижев. гос. техн. ун-т (RU). – заявка 2008134946/28 от 26.08.08, опубл. 10.05.10, Бюл. № 13.
11. Зигбан К. Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия. – М. : Атомиздат, 1969. – 568 с.
12. Трапезников В. Ф., Шабанова И. Н., Журавлев В. А. Разработка 100-см электронного магнитного спектрометра с двойной фокусировкой // *Вестн. Удмурт. ун-та*. – 1993. – Вып. 5 (1). – С. 111–112.
13. Переносной технологический рентгеноэлектронный магнитный спектрометр / В. А. Соснов, Р. А. Хазова, С. В. Широбоков и др. // *Приборы и техника эксперимента*. – 1997. – № 1. – С. 130–132.
14. Морозов Е. А., Савинский С. С., Шабанова И. Н. Энергоанализатор магнитного спектрометра // *Вестн. Удмурт. ун-та*. – 1993. – Вып. 5 (1). – С. 132–141.

* * *

E. A. Morozov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Votkinsk Branch of Izhevsk State Technical University

I. N. Efimov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Votkinsk Branch of Izhevsk State Technical University

V. A. Alekseev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

On Possibility of Thermonuclear Reaction Realization in a Microscopic Volume

Possibility of microthermonuclear synthesis realization under condition of maintenance of high-precision focusing of high-energy ionic streams is justified.

Keywords: microthermonuclear synthesis, high-precision focusing, ionic streams, high power

Получено 12.11.10