

01;02;04;10

Получение энергии термоядерного синтеза при слиянии атомов водорода и лития

© В.Е. Тырса, Л.П. Бурцева

Инженерный институт Автономного университета Нижней Калифорнии,
21280 Мехикали, Мексика
e-mail: v_tyrsa@iing.mx1.uabc.mx

(Поступило в Редакцию 24 декабря 2002 г.)

Рассматривается метод построения термоядерного реактора на основе модификации схемы ускорителя Кокрофта–Уолтона, на котором впервые наблюдалось слияние протонов с ядрами лития. Предложено выполнить реактор в форме сферического конденсатора. Внутренний электрод конденсатора — точечный литиевый катод, наружный — сферический анод. Межэлектродное пространство заполнено водородом. Роль драйвера выполняет высоковольтный электрический импульс, подаваемый на электроды реактора. Определены параметры реактора, при которых обеспечивается температура ионов 100 keV, интенсивность потока протонов на катоде $8.6 \cdot 10^{15} \text{ W/cm}^2$. Указаны основные звенья системы получения энергии термоядерного синтеза, в том числе камера преобразования энергии, внутри которой размещен реактор, а также объекты предполагаемого использования системы.

Введение

Исследования в области управляемого термоядерного синтеза ведутся по двум направлениям. Одно из них состоит в сжатии высокотемпературной плазмы в тороидальном магнитном поле (токамак) [1,2]. Второе — инерционный ядерный синтез (ИЯС) [3]. Представленные ниже исследования относятся к ИЯС.

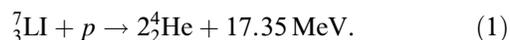
Простейшая схема ИЯС такова. Сферическую капсулу-мишень, наполненную дейтерием или смесью дейтерия и трития, синхронно при сферической симметрии облучают импульсами мощных лазеров. Они выполняют роль драйвера. Слияние ядер должно протекать в форме термоядерного взрыва ограниченной мощности [3]. В University of Rochester Laboratory for Laser Energetics, США [4] используют 60 лазеров „Omega“ с общей энергией около 40 kJ. На мишени диаметром 1 mm при длительности импульса 1 ns интенсивность лазерного излучения составляет $1.27 \cdot 10^{15} \text{ W/cm}^2$. В Российском Федеральном ядерном центре, Саров [5] на установке „Искра-5“ с 12 лазерами при длительности импульса 0.3 ns достигнута интенсивность $10^{15} - 10^{16} \text{ W/cm}^2$.

Идеи управляемого ядерного синтеза остаются неизменными много лет, и исследования идут по пути увеличения размеров и количеств. В качестве примеров можно указать проект международного термоядерного экспериментального реактора, представляющий собой гигантский токамак, или программу National Ignition Facility, США [1], на осуществление которых израсходованы десятки миллиардов долларов. Уже и сейчас ясно, что программа National Ignition Facility окажется не на много лучше предшествующих, хотя бы потому, что эффективность преобразования энергии накачки лазеров в излучение, при длительностях импульсов около 1 ns, составляет менее 1% [6]. Легко подчитать, что энергия, затрачиваемая при этом на инициирование реакции, соизмерима с высвобождаемой в ходе ее.

В работе предлагается проект системы получения энергии термоядерного синтеза с реактором, устройство которого основано на модификации эксперимента Кокрофта–Уолтона.

Фокусирование силовых линий поля в сферическом конденсаторе

Искусственное превращение ядер лития ускоренными протонами было впервые осуществлено на ускорителе Кокрофта–Уолтона



Эксперимент Кокрофта–Уолтона показал 1) возможность получения энергии при синтезе ядер гелия из ядер лития путем бомбардировки последних ядрами водорода и 2) принципиальную возможность использования электрического ускорителя частиц в качестве драйвера. В этом эксперименте вследствие малой плотности потока ускоренных протонов только единицы из миллионов вступают в ядерное взаимодействие, поэтому способ бомбардировки твердой мишени ускоренными ядрами считается непригодным для получения энергии синтеза.

Если в функциональной схеме эксперимента сфокусировать силовые линии электростатического поля на точечной мишени из лития, то ускоритель Кокрофта–Уолтона становится прототипом конструкции реактора с электрическим драйвером. Это можно сделать в реакторе, имеющем форму сферического конденсатора. Покажем это. Емкость сферического конденсатора определяется по формуле [7]

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{rR}{R-r}, \quad (2)$$

где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C/(V} \cdot \text{m)}$ — электрическая постоянная, ϵ — относительная диэлектрическая прони-

цаемость, r и R — радиусы внутренней и внешней поверхностей электродов соответственно.

Разность потенциалов U между электродами сферического конденсатора создает заряд

$$Q = CU. \quad (3)$$

Напряженность электростатического поля E_r на поверхности катода сферического конденсатора составляет

$$E_r = \frac{U}{r} \cdot \frac{R}{R-r}. \quad (4)$$

Напряженность поля между поверхностью катода и сферой, отстоящей на расстоянии x от центра сферы внутри конденсатора, равна

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{Q}{x^2}, \quad r < x < R.$$

С учетом формул (2), (3)

$$E_x = U \frac{r}{x^2} \frac{R}{R-r}, \quad r < x < R. \quad (5)$$

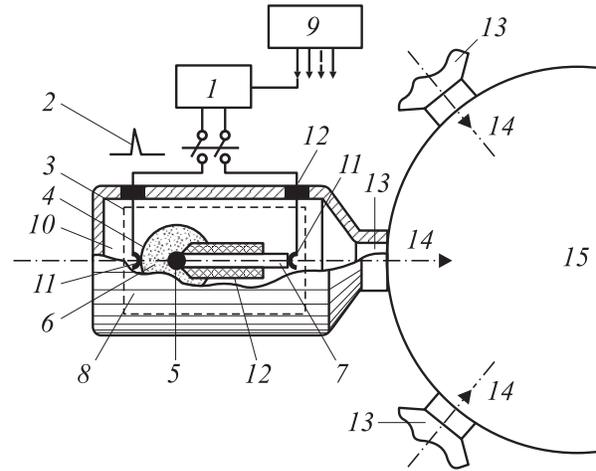
В пределе, когда $x = R$,

$$E_x = E_R = U \frac{r}{R} \cdot \frac{1}{R-r}. \quad (6)$$

Отношение напряженностей $k = E_r/E_R = R^2/r^2$ показывает, что поле неоднородно и при постоянной разности потенциалов U между электродами сферического конденсатора его напряженность у катода в k раз выше, чем у анода. Силовые линии неоднородного электростатического поля в межэлектродном пространстве сферического конденсатора правильной формы начинаются на внутренней поверхности анода и прямолинейно направлены к вершине телесного угла $4\pi sr$, расположенной в центре катода, т.е. фокусируются на катоде. Чем меньше радиус сферы катода, тем выше плотность силовых линий на его поверхности при постоянной разности потенциалов, приложенной к электродам.

Организация термоядерной реакции

Сфокусированное электростатическое поле является полем консервативных сил. Само по себе в известных пределах оно не оказывает влияния на состояние атомов катода. Если, как в эксперименте Кокрофта-Уолтона, в пространство поля между анодом и катодом ввести протоны, то, ускоряясь под действием сил сфокусированного поля, они обретают кинетическую энергию, интенсивность которой на поверхности катода при определенных условиях может оказаться достаточной для слияния протонов с ядрами лития. Из-за высокого уровня энергии синтеза организовать непрерывный процесс ее получения на малом пространстве катода не представляется возможным, поэтому процесс получения энергии,



1 — драйвер (импульсный генератор), 2 — мощный импульс напряжения, 3 — реактор, 4 — металлический анод, 5 — литиевый катод, 6 — водород, 7 — электрод, 8 — камера преобразования энергии, 9 — система управления, 10 — вода, 11 — контакт, 12 — изолятор, 13 — выпускное отверстие, 14 — перегретый пар, 15 — накопитель пара (ресивер).

как это сделано в других системах, должен быть организован в форме термоядерных взрывов ограниченной мощности, производимых в дискретные моменты времени. Энергию взрывов аккумулируют, а затем используют, рассредоточивая во времени.

Предлагаемый метод состоит в подаче в межэлектродное пространство сферического конденсатора, заранее наполненное водородом, мощного электрического импульса напряжения (ЭИ) от специального генератора. Тем самым и указанное пространство в течение короткого времени вносится энергия электростатического поля, которая должна быть достаточной для 1) образования ионов водорода; 2) ускорения их до скоростей, при которых происходит слияние протонов с атомами лития, из которого изготовлен катод. Поскольку слияние ядер водорода и лития произойдет в форме термоядерного взрыва с разрушением реактора, то реактор следует расположить в специальной камере преобразования энергии термоядерного взрыва в энергию перегретого пара (КПЭ) (см. рисунок).

На энергию, освобождаемую при взрыве, наложим ограничения, тем самым энергию синтеза будем считать заданной. На этом основании определим: 1) массы веществ, которые должны вступить в термоядерную реакцию; 2) размеры реактора, обусловленные этими массами; 3) разность потенциалов и напряженность электростатического поля, необходимые для а) ионизации атомов водорода и б) получения кинетической энергии протонов, достаточной для их слияния с атомами лития; 4) продолжительность реакции, длительность фронта ЭИ и интенсивность потока протонов на катоде.

Массы реагирующих веществ и размеры реактора

Пусть энергия, которая должна выделиться в ходе термоядерной реакции, составляет $W_r = 1$ МДж. Предполагая, что 100% атомов лития вступит в реакцию, с учетом значения энергии 17.35 МэВ, выделяющейся при слиянии ядер (1), найдем количество атомов лития в мишени

$$N = \frac{W_r \cdot 6.24 \cdot 10^{18}}{17.35 \cdot 10^6} = 3.60 \cdot 10^{17}.$$

Здесь $6.24 \cdot 10^{18} \text{ eV} = 1 \text{ Дж}$. Из формулы $N = m/(M \cdot 1u)$, связывающей число атомов N с атомной массой вещества M и его массой m [6], найдем массу лития m_l

$$m_l = M_l \cdot 1u \cdot N_l = 4.19 \cdot 10^{-9} \text{ кг},$$

так как для ${}^7\text{Li}$ $M_l = 7.016$, а $1u = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. С учетом плотности лития $\rho = 530 \text{ кг/м}^3$ находим объем литиевого катода

$$V = \frac{m_l}{\rho} = 7.91 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3.$$

Из формулы для объема шара находим радиус катода $r = 0.124 \text{ мм}$. Примем количество атомов водорода $N_h \geq N = 3.60 \cdot 10^{17}$ и найдем объем водорода V_h при нормальном давлении $p_n = 0.1 \text{ МПа}$. Для этого воспользуемся числом Лошмидта $N_L = 2.69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$

$$V_h = \frac{N_h}{2N_L} = 6.69 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Чтобы уменьшить размер межэлектродного пространства повысим давление водорода. Примем, например, $p_r = 1 \text{ МПа}$. В соответствии с законом Бойля–Мариотта новый объем водорода равен

$$V_{hp} = V_h \frac{p_n}{p_r} = 6.69 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3.$$

Радиус сферы анода реактора составит $R = \sqrt[3]{(3 \cdot 6.69 \cdot 10^{-10})/(4 \cdot 3.14)} = 5.43 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. В действительности радиус анода должен быть несколько больше найденного, если учесть объем литиевого катода и металлического изолированного штока, на котором расположен сам катод. Но в данном случае это не принципиально.

Ионизация водорода

Подача высоковольтного ЭИ на электроды реактора приведет к образованию в межэлектродном пространстве быстрорастущего электростатического поля, напряженность которого $E(t)$ растет вместе с амплитудой ЭИ. Под действием напряженности поля каждый атом водорода получает дополнительную индуцированную энергию [7]

$$W_s(t) = \frac{\alpha \cdot E(t)^2}{2}, \quad (7)$$

где α — поляризуемость атомов.

Для водорода $\alpha = 7 \cdot 10^{-41} \text{ Ф} \cdot \text{м}^2$. Когда энергия $W_s(t)$ станет равной полной энергии электрона водорода, $W_s(t) = W_h \leq 13.60 \text{ eV}$, которую он имеет на орбите с $n = 1$, ядро освободится от электрона. Произойдет ионизация атома. На ионизацию N_h атомов водорода потребуются энергия

$$W_{ih} = N_h W_h = 3.60 \cdot 10^{17} \cdot 13.60 \cdot 1.60 \cdot 10^{-19} = 0.78 \text{ Дж}. \quad (8)$$

Из формулы (7) находим пороговую напряженность ионизации

$$E_t = \sqrt{\frac{2W_h}{\alpha}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 13.61 \cdot 1.60 \cdot 10^{-19}}{7 \cdot 10^{-41}}} = 2.49 \cdot 10^{11} \text{ В/м}.$$

Надо полагать, что напряженность ионизации всей массы водорода, которая потребуется для его пробоя, будет существенно ниже найденной. Пороговая напряженность $E_t = 2.49 \cdot 10^{11} \text{ В/м}$ соответствует изолированному атому водорода, а не объему атомов, находящихся в тепловом движении и, следовательно, частично возбужденных. Косвенным подтверждением тому является, например, атмосфера Земли. Напряженность поля, при которой наступает электрический пробой воздуха при атмосферном давлении, составляет $E_{ta} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$. Атмосфера состоит из кислорода и азота с незначительными примесями других газов и водяного пара. Потенциалы ионизации атомов кислорода $W_0 = 13.56 \text{ eV}$, азота $W_n = 14.47 \text{ eV}$ и водорода $W_h = 13.60 \text{ eV}$ соизмеримы. Поляризуемость атома кислорода $\alpha = 3.5 \cdot 10^{-40} \text{ Ф} \cdot \text{м}^2$. Пороговая напряженность поля для кислорода, найденная из формулы (7), $E_{t0} = 1.13 \cdot 10^{11} \text{ В/м}$. Этим значениям близки и параметры атома азота. Поэтому можно принять значение пороговой напряженности ионизации водорода близким значению напряженности пробоя воздуха $E_{th} \approx E_{ta} \approx 6.3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$. При необходимости это значение можно уточнить экспериментально.

Параметры процесса в реакторе после ионизации водорода

На каждый электрический заряд q_i напряженность электростатического поля \mathbf{E} действует с силой $\mathbf{F}_i = q_i \mathbf{E}$. На электроны и протоны водорода, разобщенные в результате ионизации, действуют коллинеарные векторы сил \mathbf{F}_i . В некоторый момент времени t_x указанные заряженные частицы начнут движение в противоположных направлениях с разными скоростями. Траектории движения частиц совпадают с направлениями силовых линий.

Работа, затраченная на ускорение протона, равна $A = e^+ U$, где $e^+ = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ С}$ — заряд протона, U — разность потенциалов между анодом и катодом. Считается, что кинетическая энергия протонов W_p становится достаточной для преодоления кулоновского барьера при температуре $T \approx 10^9 \text{ К}$. Поскольку $1 \text{ keV} = 11.6 \cdot 10^6 \text{ К}$, то

$$W_p = \frac{T}{11.6 \cdot 10^6} = 86.21 \text{ keV}.$$

Поэтому работу, затраченную на ускорение протона, можно считать равной указанной кинетической энергии $A = e^+U = W_p = 86.21 \text{ keV}$. Отсюда — требуемое значение разности потенциалов

$$U = \frac{W_p}{e^+} = 86\,207 \text{ V.}$$

Эффективные сечения реакций достигают значений, близких к максимуму при $W_p \approx 100 \text{ keV}$ [7]. Поэтому примем амплитуду ЭИ, подаваемого на электроды реактора, $U \leq 100 \text{ kV}$. Тогда в соответствии с (4) и (6) напряженность поля у катода

$$E_r = \frac{10^5 \cdot 5.43 \cdot 10^{-4}}{1.24 \cdot 10^{-4}(5.43 \cdot 10^{-4} - 1.24 \cdot 10^{-4})} \\ = 1.045 \cdot 10^9 \text{ V/m}$$

и у анода

$$E_R = \frac{10^5 \cdot 1.24 \cdot 10^{-4}}{5.43 \cdot 10^{-4}(5.43 \cdot 10^{-4} - 1.24 \cdot 10^{-4})} \\ = 5.45 \cdot 10^7 \text{ V/m.}$$

Полученные значения напряженностей превосходят условно принятое выше значение напряженности ионизации водорода.

Энергия, затраченная на перемещение протонов к катоду,

$$W_{\Sigma p} = N_h W_p = 3.60 \cdot 10^{17} \cdot 10^5 \cdot 1.60 \cdot 10^{-19} = 5.76 \cdot 10^3 \text{ J.}$$

Энергия поля, израсходованная на ионизацию атомов водорода (8), перемещение электронов к аноду и протонов к катоду, равна

$$W_{\Sigma h} = W_{ih} + 2W_{\Sigma p} = 0.78 + 2 \cdot 5.76 \cdot 10^3 \\ = 11\,520.78 \leq 1.20 \cdot 10^4 \text{ J.}$$

По полученным данным коэффициент полезного действия реактора

$$\eta = \frac{W_r - W_{\Sigma h}}{W_r} = \frac{10^6 - 1.20 \cdot 10^4}{10^6} = 0.988.$$

Важнейшим параметром реактора является продолжительность реакции. Определим ее из следующих построений. Примем направление перемещения заряженной частицы за направление оси x . Одномерное уравнение движения частицы с зарядом e и массой m в однородном поле с постоянной напряженностью E имеет вид

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = eE. \quad (9)$$

В рассматриваемом случае электростатическое поле неоднородно. Его напряженность зависит от $r \leq x < R$ (5). Для удобства вычислений временно

воспользуемся некоторым условным значением напряженности поля \bar{E} , $E_{Rl} \leq \bar{E} < E_{rl}$. При начальной скорости протонов $v_0 = 0$ из решения уравнения (9) найдем и скорость $v(t) = e\bar{E}t/m_p$, и путь x_i , пройденный каждым из них за время t_i

$$x_i = \frac{e\bar{E}}{2m_p} t_i^2.$$

Средний путь, пройденный протоном за время t_i до встречи с катодом, равен

$$\bar{x} = \frac{R-r}{2} = \frac{1}{N_h} \sum_{N_h} x_i = \frac{e\bar{E}}{2m_p N_h} \sum_{N_h} t_i^2.$$

Положим, что отрезки t_i равномерно распределены вдоль силовой линии в диапазоне $[0, \tau_p]$. Отрезок $\tau_p = t_{i \max}$ — время перемещения протона от одного электрода к другому со скоростью $v(t)$ при $v_0 = 0$.

Среднее арифметическое отрезков t_i определится в виде $\bar{t} = (\sum_{N_h} t_i)/N_h = \tau_p/2$. Положим $\sum_{N_h} t_i^2 = \sum_{N_h} (\bar{t} - \Delta t_i)^2$, где $\Delta t_i = \bar{t} - t_i$. Имея в виду, что $\sum_{N_h} \Delta t_i \approx 0$ и что при равномерном распределении отрезков можно положить $\sum_{N_h} (\Delta t_i)^2 = N_h \cdot \tau_p^2/12$, после преобразований имеем

$$\bar{x} = \frac{e\bar{E}}{3m_p} \tau_p^2 = \frac{R-r}{2}.$$

Откуда

$$\tau_p = \sqrt{\frac{3m_p(R-r)}{2e\bar{E}}}.$$

В худшем случае, полагая $\bar{E} = E_R = 5.45 \cdot 10^7 \text{ V/m}$, получаем

$$\tau_p = \sqrt{\frac{3 \cdot 4.19 \cdot 10^{-4} \cdot 1.007 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27}}{2 \cdot 1.60 \cdot 10^{-19} \cdot 5.45 \cdot 10^7}} \\ = 3.47 \cdot 10^{-10} \text{ s.}$$

Это время будем считать продолжительностью процесса в реакторе, так как в течение этого времени все протоны успели достигнуть катода, а слияния ядер происходят за времена порядка сотен фемтосекунд [5].

Интенсивность потока протонов на литиевом катоде

$$I = \frac{W_{\Sigma p}}{\tau_p S}.$$

Здесь $S = 4\pi r^2 = 4 \cdot 3.14 \cdot (1.24 \cdot 10^{-4})^2 = 1.93 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 = 1.93 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ — площадь катода, имеющего форму сферы. После подстановки данных получаем

$$I = \frac{5.76 \cdot 10^3}{3.47 \cdot 10^{-10} \cdot 1.93 \cdot 10^{-3}} \\ = 8.60 \cdot 10^{15} \text{ W/cm}^2.$$

Как показывают более подробные построения и расчеты, фактическая площадь катода, на которой смыкаются силовые линии поля, может отличаться от площади сферы. Но это существенно не сказывается на порядке значения интенсивности потока протонов на катоде.

Временные параметры электрического импульса

Длительность фронта ЭИ обусловлена временными параметрами реакции. Возбужденное состояние атомов водорода может продолжаться в течение времени $\tau \approx 10^{-8}$ s [7]. Если электрон находился на орбите $n = 1$ и ему сообщается энергия, то по достижении ею значения $\Delta W \leq W_h = 13.60$ eV электрон перейдет на орбиту $m = \infty$, т.е. покинет пределы атома. В соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга [7] время перехода Δt и энергия ΔW связаны соотношением $\Delta W \cdot \Delta t \approx \hbar$, где $\hbar = 1.055 \cdot 10^{-34}$ J · s — постоянная Планка. На этом основании можно полагать, что время ионизации атома равно $\Delta t \approx \hbar/W_h = 1.055 \cdot 10^{-34}/(13.60 \cdot 1.60 \cdot 10^{-19}) = 4.85 \cdot 10^{-17}$ s. На первый взгляд ионизация каждого из атомов водорода вследствие их одинаковости должна произойти за такое же время. Но это не так, и суммарное время параллельной ионизации всех атомов, к которым поле приложено практически синхронно, будет несколько бóльшим, чем Δt , потому что позиции электронов на орбитах атомов водорода на момент отсчета случайны. Если скорость электрона на орбите $\Delta v_x = 10^6$ m/s и размер атома $\Delta x = 10^{-10}$ m [7], то период движения электрона по орбите можно считать максимальным временем запаздывания ионизации отдельного атома от момента ее начала $\Delta t_x = \pi \Delta x / \Delta v_x = 3.14 \cdot 10^{-10} / 10^6 = 3.14 \cdot 10^{-16}$ s. Поэтому время ионизации всех атомов $\Delta t_{\Sigma} \leq \Delta t + \Delta t_x = 3.63 \cdot 10^{-16}$ s. Это время принадлежит выше определенному отрезку $\tau_p \leq 0.35$ ns, потому что движение протонов к катоду начинается тотчас после начала образования ионов. Таким образом, передний фронт ЭИ должен быть соизмерим с $\tau_p \leq 0.35$ ns, а его длительность $t_p \geq 2\tau_p = 0.7$ ns.

О преобразовании атомной энергии в энергию перегретого пара

Проблема создания КПЭ для лазерного ИЯС еще находится в стадии решения. Одна из идей создания КПЭ состоит в том, что излучение термоядерных микровзрывов должно разогревать сферические стенки камеры, внутри которой вмонтированы трубы с водой, воспринимающей тепло стенок. Недостаток такого решения состоит в том, что скорости протекания ядерных и тепловых процессов различаются на много порядков. Поэтому, чтобы не было оплавления стены камеры под действием мощных импульсов излучения при синтезе, ее сферическая поверхность должна быть достаточно удалена от источника излучения. Это обстоятельство при положительном решении проблемы лазерного ИЯС ограничило бы области применения системы.

Предлагаемая КПЭ представляет собой металлический сосуд, наполненный водой и частично воздухом. Реактор на специальном держателе помещают в среду

воды в КПЭ. КПЭ имеет пару электродов для подключения генератора ЭИ и выходное отверстие для пара, плотно закрытое клапаном. КПЭ является некоторым подобием зарядной камеры артиллерийского орудия в смысле прочности и многократности использования при перезарядке ее новыми реакторами и водой.

Робот-манипулятор устанавливает КПЭ в положение, в котором она оказывается подключенной электродами к генератору ЭИ и выходным отверстием к одному из портов ресивера-накопителя перегретого пара. Ресивер-накопитель может иметь несколько портов для подключения нескольких КПЭ в зависимости от мощности паровой турбины, подключенной к нему через вторичный преобразователь.

По команде от системы управления ЭИ поступает в реактор. Происходит взрывная термоядерная реакция. Под действием потока энергии от слияния ядер вода в КПЭ мгновенно испаряется. В ходе изохорического процесса в КПЭ пар может быть нагрет до температуры выше критической. При параметрах пара, близких к заданным значениям, он будет переброшен в ресивер-накопитель. Робот-манипулятор отсоединяет КПЭ от ресивера-накопителя и отправляет ее на перезарядку.

Выводы и обсуждение результатов

1. Проблема инерционного ядерного синтеза перешла из области чистой физики в область инженерно-технологических решений. Вычисления доказывают, что термоядерная реакция между парой водород-литий осуществима при помощи высоковольтного электрического импульса, подаваемого на электроды реактора, выполненного в форме миниатюрного сферического конденсатора. Электростатическое поле, созданное импульсом, обеспечивает ударную ионизацию атомов водорода и немедленное слияние их с ядрами лития на катоде реактора. Энергия драйвера, необходимая для осуществления реакции, подводится к реактору непосредственно, без промежуточных преобразований в другие виды. Вследствие этого она на два порядка меньше, чем энергия, потребляемая лазерным драйвером, в котором в излучение преобразуется менее 1% энергии накачки [6].

2. Если оборудование, в комплексе с которым должен эксплуатироваться реактор, допускает увеличение энергии реактора W_r (энергии взрыва) в n раз, то оно обеспечивается пропорциональным увеличением масс реагирующих веществ (объема реактора) и энергии, потребляемой реактором от источника импульсов — драйвера. Амплитуда ЭИ, подаваемого на электроды реактора, и интенсивность потока протонов на катоде при этом остаются неизменными. Линейные размеры реактора и время реакции τ_p увеличатся в $\sqrt[3]{n}$. Например, если в условиях рассмотренного примера принять $W_r = 10$ MJ, то $n = 10$ и $\sqrt[3]{10} = 2.15$. ИЯС с лазерным драйвером такими возможностями не обладает.

3. Современная промышленность располагает технологиями, которые довольно легко могут быть приспособлены для практической реализации предложенного метода. Это свидетельствует о том, что время и стоимость реализации метода получения энергии будут многократно меньше, чем эти же показатели для ИЯС с лазерными драйверами. Реагенты для осуществления синтеза легко доступны. Литий свободно реализуется на мировом рынке по цене \$ 220 за 1 kg [8].

4. Предлагаемая технология благодаря прямому преобразованию атомной энергии синтеза в энергию перегретого пара не изменяет существующую технологию производства электроэнергии, а только дополняет ее новой системой парообразования. После ее освоения она может быть немедленно использована на вновь строящихся и действующих тепловых и атомных электростанциях. Новая технология не столь громоздка как ИЯС с лазерным драйвером. В отличие от лазерного ИЯС энергией реакции здесь можно управлять в широком диапазоне, поэтому эта технология применима также на морских, речных и сухопутных транспортных средствах.

Список литературы

- [1] General Atomic Fusion Group.
<http://fusion.gat.com/icf/concept/>
- [2] Fusion Energy Research. <http://www-afrd.lbl.gov/fusion.html>
- [3] *Lindl J.D.* Inertial Confinement Fusion: The Quest for Ignition and Energy Gain Using Indirect Drive. AIP Press. 1997. 120 p.
- [4] About OMEGA.
http://www.lle.rochester.edu/03_omega/_03omega.html.
- [5] *Андрюшин И.А., Бородин А.К., Завалишин Ю.К.* и др. Ядерный центр России — Саров. Саров, 2000. 308 с.
- [6] *Басов Н.Г., Лебо И.Г., Розанов В.Б.* и др. // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. № 4. С. 327–332.
- [7] *Кузьмичев В.Е.* Законы и формулы физики. Киев, 1989. 868 с.
- [8] Handbook of Chemistry and Physics. A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data. The Elements. Seventy Six Edition. CRC Press, Inc., 1995–1996. P. 4–17.