

УДК 539.17

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОИТЬ В РОССИИ УСТАНОВКУ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

© 2025 г. Л. А. Жилияков^{а, *}, В. С. Куликаускас^а

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, НИИЯФ
им. Д.В. Скобельцына, Москва, 119991 Россия

*e-mail: zhiliakovla@mail.ru

Поступила в редакцию 28.08.2024 г.

После доработки 16.10.2024 г.

Принято к публикации 22.11.2024 г.

Рассмотрена конструкция реактора для осуществления управляемой реакции ядерного синтеза. Работа реактора основана на принципе системы на встречных пучках с использованием для изоляции пучков от стенки явления “гайдинга” — бесконтактного скользящего взаимодействия пучков ускоренных заряженных частиц с диэлектрической стенкой. Оборудование, которое потребуется для постройки такого реактора, в настоящее время выпускается промышленно и используется в радиоэлектронике. Для примера рассмотрена реакция $d-t$. В предлагаемой установке ожидаемая поверхностная плотность мощности энерговыделения реакции должна составить $\sim 10^4$ Вт/м².

Ключевые слова: реакция ядерного синтеза, система на встречных пучках, “гайдинг”, диэлектрическая стенка.

DOI: 10.31857/S1028096025010076, EDN: ABBWUD

ВВЕДЕНИЕ

Решение задачи управляемого термоядерного синтеза — величайшая задача современной физики [1]. В настоящее время ее решают путем плазменных технологий (“токамаки”) или путем инерциального удержания [2–7]. Ядерные реакции традиционно осуществляют при помощи различного рода ускорителей. Наиболее эффективно энергию ускоренных частиц используют в системах на встречных пучках. В России первая система для исследования ядерных реакций была построена под руководством академика Г.И. Будкера [8]. В [9] предложено использовать систему на встречных пучках для осуществления ядерного синтеза. Также предложения использовать такие системы для этой цели были высказаны в [10, 11]. Основным недостатком этих предложений — низкая допустимая концентрация реагирующих ионов, ограниченная их объемным зарядом.

Для проведения управляемой реакции ядерного синтеза было предложено использовать

систему на встречных пучках, а сами встречные пучки изолировать от попадания на стенку за счет явления “гайдинга” [12]. “Гайдинг” — это явление бесконтактного скользящего взаимодействия пучков ускоренных заряженных частиц (ионов, электронов) с диэлектрической стенкой [13, 14], в том числе и с изогнутой диэлектрической стенкой [15].

КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ РЕАКЦИИ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Для проведения непрерывной управляемой реакции ядерного синтеза предлагаем повысить на несколько порядков светимость системы на встречных пучках в результате увеличения концентрации частиц в пучках. Схема предлагаемого реактора представлена на рис. 1. Стенки кольцевой вакуумной камеры 4 выполнены из диэлектрического материала (например, из стекла). К камере подключена система 1 для создания

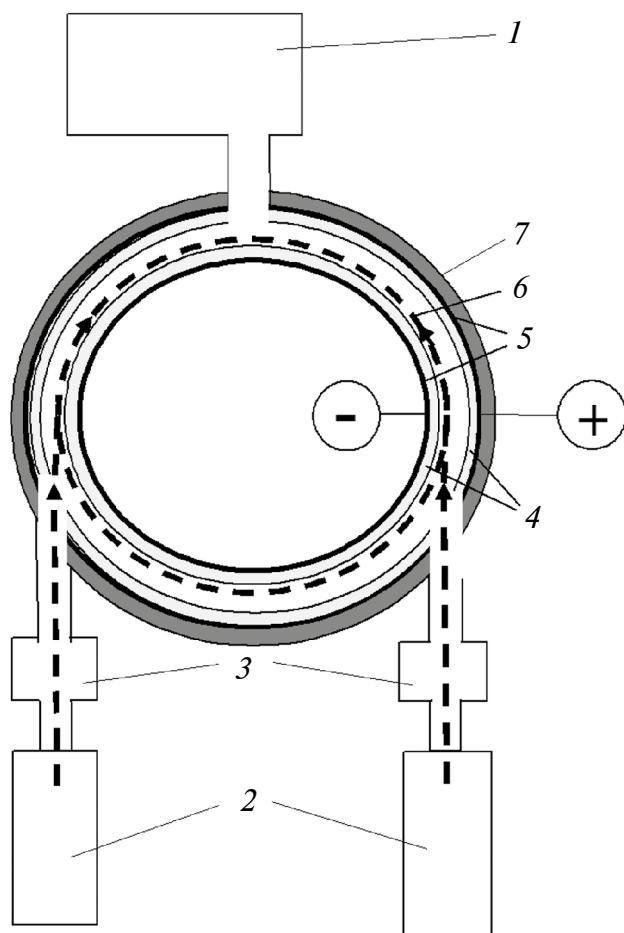


Рис. 1. Схема предлагаемого реактора для осуществления управляемой реакции ядерного синтеза: 1 — вакуумная система; 2 — ускорители заряженных частиц; 3 — система управления пучками; 4 — кольцевая вакуумная камера; 5 — кольцевой конденсатор; 6 — ленточные скользящие пучки; 7 — защитный корпус.

вакуума в рабочем объеме кольцевой камеры. Вакуумная система может быть реализована, например, в виде откачивающего вакуумного насоса, подключенного к кольцевой камере посредством патрубков. Камера также соединена с двумя ускорителями заряженных частиц 2. В качестве таких ускорителей могут быть использованы линейные ускорители, описанные, например, в [16]. Пучки ускоренных ионов или электронов проходят через систему 3 управления пучками заряженных частиц. Принципиальная схема этой системы представляет собой два плоских конденсатора, расположенных друг за другом на осевой линии, которая совпадает с осью распространения пучка, но электрические поля этих конденсаторов перпендикулярны друг другу. Изменяя напряжение на конденсаторах, изменяют направление распространения пучка. Перпендикулярно

направленные электрические поля этих плоских конденсаторов позволяют регулировать направление движения пучков в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [17]. С внешней стороны кольцевой камеры системы на встречных пучках 4 сформирован кольцевой конденсатор 5 в виде внешнего и внутреннего электродов, расположенных по внешней и внутренней окружностям камеры. Электроды кольцевого конденсатора эквидистантны камере и друг другу. В качестве электродов могут быть использованы металлические пластины, изогнутые в форме колец. Каждое кольцо кольцевого конденсатора — это электрод. Плоскость, в которой электроды образуют кольцо, параллельна плоскости, в которой встречные пучки внутри камеры образуют замкнутые кольца. Электрическое поле кольцевого конденсатора должно быть перпендикулярно направлению движения встречных пучков. С помощью электрического поля этого конденсатора встречные пучки ионов прижимаются к внутренней поверхности кольцевой вакуумной камеры системы, вдоль которой они скользят навстречу друг другу. Электроды кольцевого конденсатора подключены к источнику высокого напряжения, позволяющему получать в конденсаторе (и, следовательно, в объеме кольцевой вакуумной камеры системы на встречных пучках) напряженность электрического поля 10^5 – 10^6 В/м, достаточную, чтобы прижать пучки заряженных частиц к стенке кольцевой вакуумной камеры системы. Эти электроды изолированы во избежание короткого замыкания. Кольцевая вакуумная камера системы на встречных пучках с внешними электродами кольцевого конденсатора размещена в защитном корпусе 7.

Реакция ядерного синтеза осуществляется во встречных пучках, скользящих по внутренней диэлектрической поверхности кольцевой вакуумной камеры системы. Пучки реагирующих ионов, скользящие по поверхности диэлектрической стенки, формируются с помощью поперечного электрического поля кольцевого конденсатора, расположенного вокруг кольцевой вакуумной камеры системы на встречных пучках и прижимающего пучки к поверхности диэлектрической стенки кольцевой камеры.

Работа предлагаемого реактора осуществляется следующим образом. С помощью вакуумной системы 1, подключенной к кольцевой вакуумной камере, в объеме этой камеры создают вакуум с остаточным давлением не выше 10^{-6} Торр. Пучки ускоренных ионов, полученные с помощью ускорителей 2 и имеющие энергию, достаточную для осуществления требуемой ядерной реакции, с помощью системы управления пучками 3 вводят

в объем кольцевой вакуумной камеры 4 навстречу друг другу вдоль электродов кольцевого конденсатора 5. В объеме вакуумной камеры 4 электрическое поле кольцевого конденсатора 5 прижимает пучки ускоренных заряженных частиц к внутренней диэлектрической поверхности вакуумной камеры системы. За счет явления “гайдинга” [12] пучки изолируются от столкновения с диэлектрической стенкой, и формируются ленточные пучки 6, скользящие вдоль поверхности диэлектрической стенки. Встречные ленточные скользящие пучки 6 сталкиваются друг с другом в объеме камеры с протеканием необходимой ядерной реакции. Столкновения встречных пучков в устройстве происходят многократно, поскольку частицы пучков, не прореагировавшие при однократном прохождении объема камеры, принимают участие в последующих столкновениях, не оседая на диэлектрическом покрытии. Максимальная суммарная концентрация частиц во встречных пучках в системе ограничивается электрической прочностью диэлектрика, из которого выполнена вакуумная камера.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В УСТАНОВКЕ

Физически процессы, протекающие в заявляемом устройстве при его работе, поясняются следующим образом. Камера системы на встречных пучках вакуумируется до остаточного давления не выше 10^{-6} Торр. В камеру системы навстречу друг другу из внешних ускорителей направляют два пучка одноименно заряженных частиц (ионы, электроны), обладающих энергией, необходимой для осуществления заданной реакции. На металлические электроды кольцевого конденсатора подают постоянное напряжение такой полярности, чтобы создаваемое конденсатором электрическое поле прижимало пучки к внутренней поверхности диэлектрической стенки камеры. Диэлектрическая стенка за счет упавших на него заряженных частиц пучков приобретает электрический заряд того же знака, что и частицы пучков. За счет упомянутого выше явления “гайдинга” на находящиеся в объеме камеры частицы пучков начинает действовать градиентная сила, отталкивающая их от заряженной диэлектрической стенки. Между пучками заряженных частиц и диэлектрической стенкой камеры, к которой электрическое поле кольцевого конденсатора прижимает частицы встречных пучков, не происходит обмен энергией [8], и пучки совершают многократные витки в камере.

Так как при движении ускоренных пучков в камере не происходит потерь энергии частиц из-

за изоляции их от стенки за счет явления “гайдинга”, частицы встречных пучков будут многократно сталкиваться друг с другом, и при столкновении будут происходить заданные ядерные реакции. Эти реакции можно использовать для синтеза ядер других элементов или для получения энергии ядерного синтеза. В предлагаемом реакторе “гайдинг” управляем во всем допустимом диапазоне напряженности, которую выдерживает без электрического пробоя диэлектрическое покрытие электрода кольцевого конденсатора. Управление параметрами ядерной реакции происходит за счет изменения напряженности электрического поля конденсатора и тока инжектируемых пучков.

Повышение светимости и, соответственно, интенсивности ядерных реакций на несколько порядков по сравнению с известными значениями в предлагаемом реакторе будет осуществляться за счет повышения концентрации заряженных частиц во встречных пучках на 4–5 порядков. Так как пучки заряженных частиц в заявленном устройстве прижаты электрическим полем кольцевого конденсатора к диэлектрической стенке и одновременно изолированы от контакта с ней за счет явления “гайдинга”, они будут двигаться в узком приповерхностном слое, т.е. будут представлять собой “ленточные пучки заряженных частиц”, скользящие вдоль диэлектрической поверхности стенки камеры. Максимальная концентрация заряженных частиц ограничена величиной электрической прочности $E_{\text{пр}}$ диэлектрика, из которого сделана стенка камеры системы на встречных пучках. Толщину ленточного скользящего пучка можно оценить как равную среднему расстоянию между частицами скользящего пучка:

$$a \cong \left(\frac{e}{(E_{\text{пр}} - E)\epsilon_0} \right)^{-1/2},$$

где a — толщина пучка, e — элементарный заряд, $E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность диэлектрика, E — напряженность поля кольцевого конденсатора, ϵ_0 — электрическая постоянная. Соответственно, концентрация заряженных частиц в ленточном скользящем пучке будет составлять:

$$n \cong \left(\frac{(E_{\text{пр}} - E)\epsilon_0}{e} \right)^{3/2}.$$

Современные диэлектрические материалы обладают электрической прочностью до $E_{\text{пр}} \sim 10^8$ В/м. Таким образом, концентрация частиц в ленточном скользящем пучке составляет до 10^{23} м⁻³. Как известно [18], светимость системы

при равной концентрации n во встречных пучках прямо пропорциональна n^2 . Для сравнения рассмотрим две системы на встречных пучках с камерой прямоугольного сечения. При сравнении концентрации частиц пучков $n_{\text{экв}}$ в системе, частицы пучка которой равномерно распределены по объему, с концентрацией частиц n в системе на ленточном скользящем пучке получены следующие выводы: при одинаковой ширине поперечного сечения пучка и равных значениях светимости систем эквивалентная, равномерная по объему устройства концентрация заряженных частиц в заявляемом устройстве составит:

$$n_{\text{экв}} = n(S_{\text{ск}}/S_{\text{экв}})^{1/2} = n(a/b)^{1/2},$$

где $S_{\text{ск}}$ — площадь поперечного сечения скользящего пучка, $S_{\text{экв}}$ — площадь поперечного сечения эквивалентного пучка, a — толщина ленточного скользящего пучка, b — расстояние между электродами кольцевого конденсатора. Так, при $a/b \sim 10^{-4} - 10^{-5}$, $n_{\text{экв}} \sim 10^{20} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Такая концентрация заряженных частиц на 4–5 порядков превышает достигнутую в настоящее время концентрацию в системе на встречных пучках при магнитной изоляции частиц относительно стенки. В результате светимость, которая может быть получена в предлагаемом реакторе, превысит известную светимость на 8–10 порядков, что позволит использовать данное устройство не только в целях исследований, но и в промышленном комплексе.

Рассмотрим длину свободного пробега ионов в предлагаемом реакторе. Для реакции $d + t = {}^4\text{He} + n + 17.6 \text{ МэВ}$. Сечение синтеза этой реакции при энергии 1000 кэВ составляет $2.7 \times 10^{-16} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ [19]. Длина свободного пробега по отношению к реакции ядерного синтеза:

$$l = 1/n\sigma = 4 \times 10^5 \text{ м}.$$

Сечение рассеяния $\sigma_{\text{расс}}$ ионов на нейтральных частицах [20]:

$$\sigma_{\text{расс}} = \pi \sqrt{\frac{2\alpha e^2}{E_{\text{отн}}}},$$

где $\alpha = \frac{3M(\epsilon - 1)}{4\pi\rho(\epsilon + 2)N_A}$ — коэффициент поляризуемости молекулы азота, ϵ — диэлектрическая проницаемость, ρ — плотность, M — молекулярная масса, $E_{\text{отн}}$ — энергии относительного движения ионов.

При остаточном давлении 10^{-6} Па :

$$l_{\text{расс}} = 1/n\sigma = 9.1 \times 10^7 \text{ м}.$$

Также надо отметить Резерфордовское рассеяние. В работе [13] отмечено, что явление “гайдинга” наблюдается для пучков, распространяющихся по направлению, имеющего угол отклонения от прямой начального распространения пучка до 20° . При энергии относительного движения пучков $E = 1500 \text{ кэВ}$ и при рассеянии на угол $\theta = 20^\circ$ сечение Резерфордовского рассеяния равно [21]:

$$\sigma = \pi \left(\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 E} \right)^2 \frac{1}{\sin^2(\theta/2)} = 0,24 \times 10^{-28} \text{ м}^2 = 0,24 \text{ барн}.$$

Сечение ядерного синтеза: $\sigma = 0.24 \text{ барн}$.

Таким образом, длина свободного пробега на рассеяние превышает длину свободного пробега на реакцию ядерного синтеза более чем на два порядка. Сечение реакции ядерного синтеза сравнивается с сечением Резерфордовского рассеяния.

Так для названной реакции: $N_\nu = 0.25 n^2 \langle \sigma v \rangle E_0$, где N_ν — мощность реакции синтеза в ленточных скользящих пучках, E_0 — энергия, которая выделяется в одном акте синтеза, $\langle \sigma v \rangle$ — вероятность синтеза, n — концентрация ионов в ленточных скользящих пучках. В результате получаем величину поверхностной плотности мощности:

$$N_s = N_\nu a \sim 10^4 \text{ Вт/м}^2,$$

где a — толщина ленточных скользящих пучков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемом реакторе могут быть осуществлены и другие энергетически выгодные ядерные реакции синтеза.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают глубокую благодарность Чувильскому Ю.М. за полезное обсуждение и важное замечание в подготовке статьи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов данной работы нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург В.Л. // УФН. 1999. Т. 169. № 4. С. 419.
2. Велихов Е.П., Ильгисонис В.И. // Вестн. РАН. 2021. Т. 91. № 5. С. 470.
<https://doi.org/10.31857/S0869587321050248>
3. Нигматулин Р.И. // Окружающая среда и энерговедение. 2020. № 3. С. 31.
4. Роуз Дж., Кларк М. Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции. М.: Госатомиздат, 2012. 490 с.
5. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: Физматлит, 2018. 200 с.
6. Миямото К. Основы физики плазмы и управляемого синтеза. М.: Физматлит, 2007. 424 с.
7. Кристиансен М., Хеглер М. Введение в управляемый термоядерный синтез. М.: Мир, 1980. 232 с.
8. Будкер Г.И. Собрание трудов. М.: Наука, 1982. 575 с.
9. Ruggiero A.G. // Il Nuovo Cimento. A. 1993. V. 106. № 12. P. 1959.
10. Котов В.М., Котов С.В. // Вестн. НЯЦ РК. 2019. Вып. 4. С. 91.
11. Патент 49410 (РФ). Линейный ускоритель энергетический. / Мачехин Д.А. Ухов А.Л. // 10 ноября 2005 г. Бюл. № 31.
12. Stolterfoht N., Yamazaki Y. // Phys. Rep. 2016. V. 629. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.02.008>
13. Stolterfoht N., Bremer J.-H., Hoffmann V., Hellhammer R., Fink D., Petrov A., Sulik B. // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. P. 133201.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.133201>
14. Жияяков Л.А., Костановский А.В., Иферов Г.А., Куликаускас В.С., Похил Г.П., Швей И.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2002. № 11. С. 65.
15. Жияяков Л.А., Куликаускас В.С. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 1. С. 99.
<https://doi.org/10.31857/S1028096023010272>
16. Кульчин Ю.Н. Ускорители заряженных частиц и синхротронное излучение. Владивосток: ДВФУ, 2021. 105 с.
17. Электростатические ускорители заряженных частиц / Ред. Вальтер А.К. М.: Госатомиздат, 1963. 302 с.
18. Будкер Г.И. // УФН. 1966. Т. 89. № 4. С. 533.
19. https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion
20. Никулин С.П. Электронные и ионные процессы в газоразрядных системах низкого давления. Екатеринбург: ИЭФ УрО РАН, 2008. 296 с.
21. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>

On the Possibility of Building a Controlled Nuclear Fusion Facility in Russia

L. A. Zhilyakov^{1,*}, V. S. Kulikauskas¹¹Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, 119991 Russia

*e-mail: zhiliakovla@mail.ru

The design of a reactor for the implementation of a controlled nuclear fusion reaction is considered. The reactor operation is based on the principle of a counter-beam system using the guiding phenomenon for the isolation of beams from the wall, a non-contact sliding interaction of beams of accelerated charged particles with a dielectric wall. The equipment required for the construction of such a reactor is currently manufactured industrially and is used in radio electronics. As an example, the $d-t$ reaction is considered. In the proposed installation, the expected surface power density of the energy release of this reaction should be $\sim 10^4$ W/m².

Keywords: nuclear fusion reaction, oncoming beam system, guiding, dielectric wall.