

УДК 53.06; 533.9.01
PACS numbers 28.52.-s, 52.55.-s, 88.40.H-

И. А. Котельников

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия*

*Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

kia999@mail.ru

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР И СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Предпринята попытка критически переосмыслить 66-летний опыт развития программы управляемого термоядерного синтеза и на этом основании попытаться ответить на вопрос: будет ли востребован термоядерный реактор в XXI веке? Типовой атомный реактор деления сравнивается с гипотетическим термоядерным реактором по одному из ключевых параметров – выделению энергии на единицу объема активной зоны при использовании смеси дейтерия с тритием и бора-11 с тритием. Прогресс в термоядерных исследованиях сопоставляется с бурным развитием солнечной энергетики. Высказано предположение, что человечеству всегда будет нужно разнообразие энергетических ресурсов, поэтому термоядерные электростанции могут быть построены даже при доминировании солнечной энергетики.

Ключевые слова: термоядерный реактор, термоядерная электростанция, солнечная энергетика.

Введение

В этом году исполняется 66 лет с момента старта программы управляемого термоядерного синтеза (УТС) в СССР [1–3] и США [4, 5]. Самое время попытаться ответить на вопрос: почему столь продолжительные и столь дорогостоящие усилия пока так и не привели к созданию промышленного термоядерного реактора?

Нынешний флагман программы УТС – международный проект ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) [6–8] – известен непрерывным ростом стоимости и многократным переносом сроков получения первой плазмы [9–13]. ITER, если его оружие преодолет организационный хаос [9] и всё-таки завершится успехом, будет всего лишь прототипом прототипа промышленного термоядерного реактора (ТР). Если экстраполировать стоимость ITER на промышленный реактор, то возникает обоснованное сомнение, будет ли ТР конкурентоспособен как коммерческое предприятие [14, 15].

Своему ближайшему конкуренту – атомному реактору деления – ТР уверенно проигрывает в соревновании цен. При этом он имеет, кажется, лишь одно неоспоримое преимущество: термоядерному реактору внутренне присуща безопасность относительно самопроизвольного взрыва. По идее, ТР не должен взрываться так, как взорвался атомный реактор в Чернобыле [14, 16]. Однако ТР, работающий на смеси дейтерия (D) и трития (T), как и атомный реактор, будет производить большое количество радиоактивного мусора.

Безнейтронный термоядерный синтез

Кардинальным решением проблемы радиоактивных отходов было бы создание ТР, работающего на топливной смеси, не произ-

Котельников И. А. Термоядерный реактор и солнечная энергетика // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 1. С. 19–25.

водящей нейтроны даже во вторичных реакциях. Меньше всего нейтронов производит смесь протия (p, т.е. водорода-1) и бора-11 (B). ITER будет работать на смеси дейтерия и трития, а на пути к безнейтронному ТР нас ожидают гигантские трудности.

Обратимся к рис. 1, где приведены графики сечений некоторых ядерных реакций синтеза. На графике сечения реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha\alpha)^4\text{He}$, в которой образуются 3 α -частицы (т.е. 3 ядра гелия ^4He), имеется узкий пик $\sigma = 0,05$ бн при энергии протона 162 кэВ (при неподвижном ядре бора), что в системе центра масс соответствует энергии $\varepsilon = 148,5$ кэВ. Для сравнения укажем, что транспортное сечение кулоновских столкновений

$$\sigma_t \approx \frac{1}{\varepsilon^2} [\text{бн} \cdot \text{МэВ}^2] \quad (1)$$

достигает значения 1 бн = 10^{-24} см² при энергии $\varepsilon = 1$ МэВ, а при энергии, соответствующей узкому пику сечения реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha\alpha)^4\text{He}$, кулоновские столкновения будут происходить в 1000 раз чаще, чем реакция ядерного синтеза. Они сделают резонансное слияние ядер фактически невозможным, так как размажут начальную функцию распределения ядер прежде, чем те вступят в реакцию синтеза.

В проекте Tri Alpha Energy (ТАЕ) [18] расчёт строится на втором, более широком и более высоком резонансе. Если верить базе данных МАГАТЭ [17], максимум сечения реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha\alpha)^4\text{He}$ имеет значение $\sigma = 0,8$ бн при энергии $\varepsilon = 573$ кэВ в системе центра масс (энергия протона 625 кэВ). По данным недавней работы [19], максимальное сечение равно $\sigma = 1,4$ бн при энергии $\varepsilon = 619$ кэВ в системе центра масс (энергия протона 675 кэВ).

Предположим, что верно именно это второе значение. В реакции $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ такое же значение сечения ядерного синтеза достигается при энергии $\varepsilon = 30$ кэВ, т.е. меньше почти в 20 раз. В системах УТС с магнитным удержанием давление плазмы p ограничено давлением магнитного поля $B^2/8\pi$, т.е. $\beta = 8\pi p/B^2 < 1$. Следовательно, при одинаковом давлении плотность рВ плазмы будет примерно в 20 раз меньше плотности ДТ плазмы. Поскольку удельное энерговыделение в реакции слияния двух ядер пропорционально квадрату плотности, в каждом кубическом сантиметре рВ топлива будет выде-

ляться в 400 раз меньше энергии, чем в смеси дейтерия и трития, а реактор при одинаковой мощности будет в 400 раз больше (по объёму активной зоны) и во много раз дороже.

Более строгий расчёт должен учитывать тот факт, что в рВ плазме давление создаётся преимущественно электронами, поэтому на самом деле удельное энерговыделение при заданном давлении будет в 1000 раз меньше, чем в ДТ плазме. Оптимизация параметров термоядерного реактора по критерию тройного произведения (т.е. поиск максимума удельного энерговыделения при заданном давлении) даёт значение температуры $T = 13,5$ кэВ для ДТ плазмы против $T = 137$ кэВ для рВ плазмы [20]. При этом максимальная удельная мощность термоядерных реакций описывается уравнениями

$$P_{\text{ДТ}} = 1,3\beta^2 B^4 [\text{Вт} / \text{см}^3 \text{Тл}^2], \quad (2)$$

$$P_{\text{рВ}} = 1,3 \times 10^{-3} \beta^2 B^4 [\text{Вт} / \text{см}^3 \text{Тл}^2] \quad (3)$$

соответственно в ДТ и рВ плазме. Чтобы иметь удельное энерговыделение на уровне 100 Вт/см³, типичном для атомного реактора деления (см., например, [21], с. 34), при $\beta = 0.5$ в ДТ реакторе необходимо магнитное поле $B = 4$ Тл на пределе современных технологий (для больших объёмов), тогда как в рВ реакторе необходимо $B = 23$ Тл, что достигалось лишь в микроскопических объёмах импульсных систем. При магнитном поле $B = 5$ Тл, как на внешнем обводе тора в установке ITER, удельное энерговыделение в рВ реакторе будет в 500 раз меньше, чем в реакторе деления. Эффект накопления α -частиц в плазме, а также тормозное и циклотронное излучение ещё более снижают выделение полезной энергии [22].

Различные варианты дополнительной оптимизации ТР вполне возможны. Например, можно попробовать снизить температуру электронов T_e , [23]. Формальное обнуление T_e увеличивает коэффициент в формуле (3) в 12 раз. Однако нужно понимать, что в термоядерном реакторе, который работает в режиме зажигания, температура реагентов реакции ядерного синтеза поддерживается нагревом от заряженных продуктов реакции. Продукты реакции синтеза передают свою энергию (как ни странно) преимущественно электронам плазмы. Уменьшение температуры электронов увеличивает темп торможения продуктов реакции синтеза

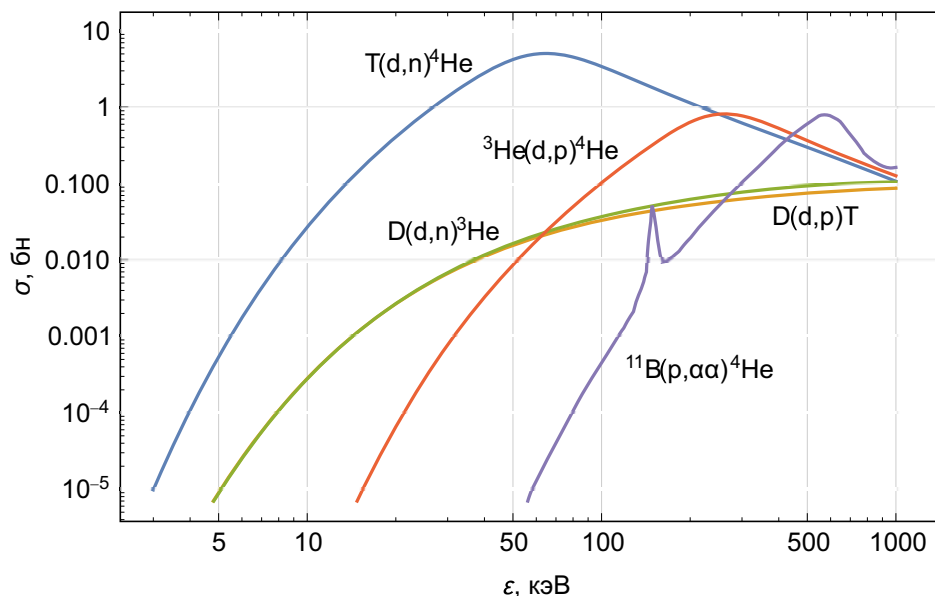


Рис. 1. Сечения некоторых реакций ядерного синтеза в зависимости от энергии в системе центра масс [17]

на электронах плазмы и, соответственно, уменьшает долю энергии, которую продукты реакции передают реагентам. Уменьшение нагрева реагентов, в свою очередь, приводит к выходу системы из режима зажигания. Следовательно, безнейтронный ТР будет в сотни раз больше атомного реактора одинаковой с ним мощности и во много раз дороже.

Н. Ростокер с соавторами [24, 25] предложил пучковый вариант ТР, работающего на смеси рВ. Суть предложения Ростокера состоит в том, чтобы сузить разброс по энергиям протонов и ионов бора с тем, чтобы «попасть в резонанс», который соответствует пику сечения при $\varepsilon = 619$ кэВ. Однако при такой энергии сечение кулоновских столкновений (1) всё ещё больше сечения реакции $^{11}\text{B}(p,\alpha)^4\text{He}$. Поэтому трудно поверить, что подобная оптимизация способна пересилить коэффициент 1000. Похожую идею безнейтронного резонансного ядерного синтеза развивал В. И. Волосов [26], но она вызвала ещё больше возражений [27].

Директор Курчатовского института В. И. Ильгисонис в своей книге [28] пишет (с. 68–69), что многие проблемы на пути к УТС могут быть решены «посредством размещения термоядерных систем в космосе на околоземной орбите, благодаря устранению в космосе целого ряда физико-технических проблем, свойственным нынешним экспериментальным термоядерным установкам.» Действительно, как указывает этот автор, в

космосе не нужна дорогостоящая вакуумная система, можно сэкономить на криогенных системах для сверхпроводников, и наконец практически полностью снимается проблема материалов стенки, поскольку нужно обеспечить лишь нейтронную защиту магнитных катушек. «Передавать вырабатываемую электроэнергию на Землю можно СВЧ-волнами, работая в хорошо известном миллиметровом окне прозрачности земной атмосферы».

Фотоэлемент как конкурент реактора

Логически развивая идею «космического ТР», смею добавить, что можно сэкономить и на самом реакторе, поскольку в космосе уже имеется термоядерный реактор, созданный самой Природой, – наше Солнце. Расположено оно не так уж далеко – всего в каких-то 150 млн километрах, а вырабатываемую энергию задаром доставляет на поверхность Земли известным всем способом. Нужно только научиться преобразовывать солнечную энергию в электричество. Технологии преобразования разработаны и непрерывно совершенствуются. Уже созданы фотоэлементы с к.п.д. преобразования солнечной энергии в электрический ток, превышающим 40 % [29, 30].

Поверхность Земли получает в среднем 130 000 ТВт солнечной энергии, а мировое потребление всех видов энергии в 2012 году

составило 17 ТВт. Поэтому для полного покрытия своих потребностей человечеству нужно примерно полторы сотых процента солнечной энергии, достигающей поверхности Земли. Это не так уже мало, но и не безумно много.

История открытий на множестве примеров учит, что при прочих равных условиях обычно побеждает та технология, которая появилась первой. Может ли так случиться, что термоядерный реактор, ещё не родившись, уже упустил свой шанс, уступив возобновляемым источникам энергии, таким как солнечная панель, в гонке за источник энергии для будущих поколений?

Солнечная энергетика, в отличие от термоядерной, на наших глазах становится реальностью. Первые солнечные панели были установлены на американском и советском искусственных спутниках Земли, которые были запущены в 1958 году. В наши дни любой домовладелец где-нибудь в США, Германии, Китае или России может купить солнечную панель и установить её на крышу своего дома. В некоторых случаях такое решение экономически оправдано уже сейчас, и следует ожидать, что цена солнечных панелей будет падать по мере расширения масштабов их производства. Крупнейшая в мире солнечная электростанция Solar Star мощностью 579 МВт построена в США, в штате Калифорния. Несколько солнечных электростанций промышленного масштаба имеется и в России, в том числе электростанция «Перово» общей мощностью 105,56 МВт; она перешла к России от Украины вместе с полуостровом Крым (рис. 2).

Солнечная энергетика является «чистой» и не оказывает отрицательного влияния на экологию планеты, хотя производство солнечных панелей включает химически опасные стадии. К её ключевым недостаткам относят низкую плотность потока солнечной энергии (1 кВт/м^2) и вызванную этим необходимость покрывать солнечными панелями большие площади земной поверхности. Зависимость солнечного потока от погодных условий, времени дня и года делает необходимым сооружение дорогостоящих накопителей энергии [31]. При всех этих недостатках, которые в споре не преминут напомнить сторонники термоядерной энергетике, солнечная энергетика имеет самое важное преимущество: *она уже существует.*

Последние два десятилетия суммарная установленная мощность солнечных панелей в мире растёт по экспоненциальному закону (рис. 3) [32]. На протяжении многих лет лидером по этому показателю были Соединенные Штаты Америки. В 1996 году суммарная мощность установленных фотоэлементов в США составляла 77 МВт, больше чем в любой другой стране мира. Но затем вперёд вырвалась Япония, которая оставалась мировым лидером производства солнечной электроэнергии до 2005 года, когда Германия взяла на себя ведущую роль. В настоящее время эта страна приблизилась к отметке 40 гигаватт. По некоторым сведениям, в 2015 году на первое место вышел Китай [32]. Вероятно, он продолжит свой стремительный рост и к концу 2017 года будет иметь 70 гигаватт мегаватт [33]. К концу 2015 г. совокупная мощность установленных фотоэлементов, по предварительным оценкам, достигла 233 гигаватт [32]. Эта цифра составляет чуть более 1 процента мирового производства энергии, но к 2050 году, доля солнечной энергии, как ожидается, обгонит нынешних лидеров – нефть, газ и уголь. Россия в нынешнем рейтинге занимает 31-е место с показателем 407 МВт [34], но правительственные чиновники в последнее время дружно стали говорить о важности возобновляемых источников энергии, упоминая прежде всего энергию Солнца и ветра.

Обсуждение

Согласно теореме вириала [35], термоядерная плазма может удерживать себя в равновесном состоянии *собственным* гравитационным полем, что подтверждается существованием мириад звёзд. Но та же теорема утверждает, что плазму не может удерживать её собственное электромагнитное поле. Хотя плазму способно удерживать *внешнее* магнитное поле, как в токамаке, теорема вириала – это своеобразный дорожный знак на пути к УТС, который предупреждает путника, что впереди – полоса препятствий. Тем не менее многочисленное сообщество плазмистов продолжает развивать системы магнитного УТС.

Не лучше ли осмотреться вокруг и поискать другой путь?

Корпоративный ответ на этот вопрос наиболее откровенно сформулировал академик



Рис. 2. «Перово» – солнечная электростанция общей мощностью 105,56 МВт, расположенная возле села Ключи Перовского сельского совета в Крыму. Электростанция состоит из 440 000 кристаллических солнечных фотоэлектрических модулей, соединенных 1 500 км кабеля и установленных на площади более 200 га. Электростанция может производить 132,5 млн кВт·ч возобновляемой электроэнергии в год (фото Wikipedia)

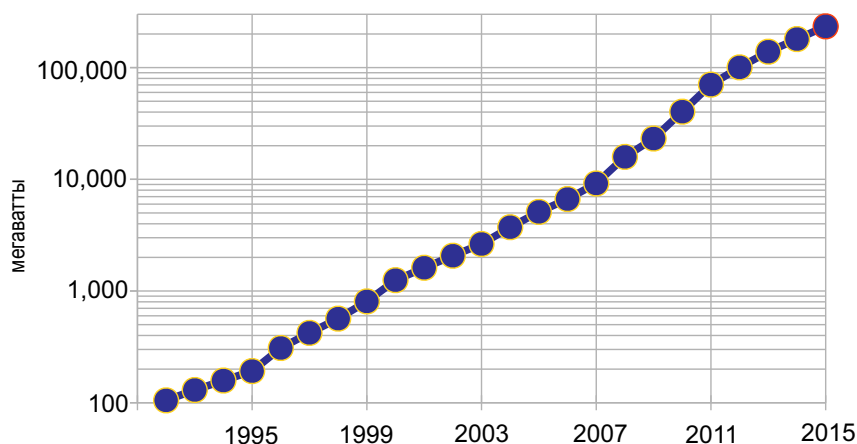


Рис. 3. Динамика установленной мощности солнечных панелей в мире с 1992 г. [32]

Д.Д. Рютов [36]: необходимо продолжить термоядерные исследования, чтобы сохранить сложившиеся коллективы учёных и инженеров, иначе некому будет воспринять инновации, которые устранят преграды на пути к УТС.

Можно понять маститых учёных, которым неприятна мысль, что в молодости следовало избрать иной путь. Макс Планк однажды сказал [37]: «Не следует думать, что новые идеи побеждают путём острых дискуссий, в которых создатели нового переубеждают своих оппонентов. Старые идеи уступают новым таким образом, что носители старого умирают, а новое поколение воспитывается в новых идеях, воспринимая их как нечто само собой разумеющееся».

Уступит ли идея термоядерного реактора идее солнечной панели? Рискну предположить, что такой исход весьма вероятен.

Скорее всего, в XXI веке штучное число термоядерных реакторов в разных странах всё-таки будет построено, но вряд ли термоядерная энергетика станет массовой.

В более отдалённом будущем идея термоядерного реактора вполне может возродиться на новом технологическом фундаменте, как в далёком 1996 году мечтал Д. Д. Рютов в докладе с говорящим названием “Reinventing Fusion” [38]. Представим, что в конце концов термоядерная энергия будет производиться и производиться по разумной цене. Затем предположим, что к тому времени электроэнергия, вырабатываемая солнечными электростанциями будет, как правило, дешевле. Даже в этом случае всё ещё найдётся немало мест на земном шаре, где солнечного света будет недостаточно для того, чтобы производство солнечной энергии было целесообразно, тогда как

термоядерную электростанцию можно построить в любом месте. Вероятно, человечеству всегда будет нужно разнообразие энергетических ресурсов. Для цивилизации слишком рискованно делать ставку только на какой-то один способ поддержания её развития.

Список литературы

1. Шафранов В. Д. Первый период истории термоядерных исследований в Курчатовском институте // Успехи физических наук. 2001. Т. 171, № 8. С. 877–886.
2. Бондаренко Б. Д. Роль О. А. Лаврентьева в постановке вопроса и иницировании исследований по управляемому термоядерному синтезу в СССР // Успехи физических наук. 2001. Т. 171, № 8. С. 886–894.
3. Гончаров Г. А. К пятидесятилетию начала исследований в СССР по возможности создания термоядерного реактора // Успехи физических наук. 2001. Т. 171, № 8. С. 894–908.
4. Bishop A. S. Project Sherwood. Boston: Addison-Wesley, 1958.
5. Биуон А. С. Проект Шервуд: Пер. с англ. М.: Госатомиздат, 1960. 176 с.
6. Aymar R. ITER overview // Fusion Engineering and Design. 1997. Vol. 36, no. 1. P. 9–21. Access mode: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379697000082>.
7. ITER // Experimental Nuclear Reaction Data. France: ITER Organization Headquarters, 2016. Access mode: <http://www.iter.org> (online; accessed: 2016-06-24).
8. Проект ИТЭР — шаг в энергетику будущего // Проектный центр ИТЭР. Россия, Москва: Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 2016. Режим доступа: <https://www.iterff.ru/> (дата обращения: 2016-06-24).
9. Khatchadourian Raffi. A star in a bottle // The New Yorker. 2014. March 3. Access mode: <http://www.newyorker.com/magazine/2014/03/03/a-star-in-a-bottle>.
10. Lenta.ru. Запуск многомиллиардного международного термоядерного реактора отложен. 11:49, 20 ноября 2015. 2015. Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2015/11/20/iter/>.
11. Clery Daniel. ITER fusion project to take at least 6 years longer than planned // Science, Nov. 19, 2015, 12:45 PM. 2015. Access mode: <http://www.sciencemag.org/news/2015/11/iter-fusion-project-take-at-least-6-years-longer-planned>.
12. Clery Daniel. UPDATED: Panel backs ITER fusion project's new schedule, but balks at cost // Science, Apr. 28, 2016, 12:30 PM. 2016. Access mode: <http://www.sciencemag.org/news/2016/04/updated-panel-backs-iter-fusion-project-s-new-schedule-balks-cost>.
13. TASS. Пробные пуски первого в мире термоядерного реактора ИТЭР начнут после 2020 года. 2016. Режим доступа: <http://tass.ru/nauka/3386590>.
14. Ryutov D. D. Environmental aspects of fusion energy // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1992. Vol. 34, no. 13. P. 1805–1815.— Access mode: <http://stacks.iop.org/0741-3335/34/i=13/a=009>.
15. Fusion Energy Science Opportunities in Emerging Concepts / D. C. Barnes, J. Hammer, A. Hassam et al. // Journal of Fusion Energy. 1999. Vol. 18, no. 1. P. 13–17. Access mode: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018814706158>.
16. Википедия. Авария на Чернобыльской АЭС. 2016. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Авария_на_Чернобыльской_АЭС.
17. IAEA NDS. EXFOR—Experimental Nuclear Reaction Data. 2012. Access mode: <http://www-nds.iaea.org/exfor> (online; accessed: 2012-01-16).
18. Tri Alpha Energy. Foothill Ranch, California, USA, 2016. Access mode: <http://www.trialphaenergy.com/> (online; accessed: 2016-06-28).
19. Sikora M. H., Weller H. R. A New Evaluation of the $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha\alpha$ Reaction Rates // Journal of Fusion Energy. 2016. Vol. 35, no. 3. P. 538–543. Access mode: <http://dx.doi.org/10.1007/s10894-016-0069-y>.
20. Котельников И. А. Лекции по физике плазмы. 2 изд. М.: Бином, 2013. 372 с. ISBN: 978-5-9963-1158-3.
21. Лукьянов С. Ю., Ковальский Н. Г. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М.: МИФИ, 1997. 430 с.
22. Nevins W. M. A Review of Confinement Requirements for Advanced Fuels // Journal of Fusion Energy. 1998. Vol. 17, no. 1. P. 25–32. Access mode: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1022513215080>.
23. Беклемишев А. Д. 2016. Частное сообщение.
24. Rostoker Norman, Binderbauer Michl W., Monkhorst Hendrik J. Colliding Beam Fusion Reactor // Science. 1997. Vol. 278, no. 5342. P. 1419–1422. <http://science.sciencemag.org/content/278/5342/1419.full.pdf>.
25. Rostoker Norman, Qerushi Artan, Binderbauer Michl. Colliding Beam Fusion Reactors // Journal of Fusion Energy. 2003. Vol. 22, no. 2. P. 83–92. Access mode: <http://dx.doi.org/10.1023/B:JOFE.0000036407.10861.bc>.

26. *Volosov V.I.* Aneutronic fusion on the base of asymmetrical centrifugal trap // Nuclear Fusion. 2006. Vol. 46, no. 8. P. 820. Access mode: <http://stacks.iop.org/0029-5515/46/i=8/a=007>.
27. *Волосов В. И.* Безнейтронный резонансный синтез // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2008. № 1. С. 31–39. Режим доступа: http://vant.iterru.ru/vant_2008_1/4.pdf (дата обращения: 2016/08/27).
28. *Ильгисонис В. И.* Классические задачи физики горячей плазмы. Высшая школа физики. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 326 с. ISBN: 978-5-383-01011-2.
29. Corporation Sharp. Sharp Develops Concentrator Solar Cell with World's Highest Conversion Efficiency of 44.4%. www.sharp-world.com. 2013. Access mode: <http://www.sharp-world.com/corporate/news/130614.html>.
30. Побит рекорд по КПД фотоэлемента. Lenta.ru. 2013. Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2013/06/14/solarrecord/>.
31. *Dresselhaus M. S., Thomas I. L.* Alternative energy technologies // Nature. 2001. Vol. 414, no. 6861. P. 332–337. Access mode: <http://dx.doi.org/10.1038/35104599>.
32. Growth of photovoltaics // Википедия. 2016. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics.
33. China Targets 70 Gigawatts of Solar Power to Cut Coal Reliance // Bloomberg News. 2016. Режим доступа: <http://www.bloomberg.com/news/2014-05-16/china-targets-70-gigawatts-of-solar-power-to-cut-coal-reliance.html>.
34. *Rose Adam.* China's solar capacity overtakes Germany in 2015, industry data show // Reuters. 2016. Режим доступа: <http://www.reuters.com/article/china-solar-idUSL3N15533U>.
35. *Шафранов В. Д.* Равновесие плазмы в магнитном поле // Вопросы теории плазмы / Под ред. М. А. Леонтовича. М.: Атомиздат, 1963. Т. 2. С. 92–131.
36. *Ryutov D. D.* Artsimovich Memorial Lecture: The Role Of Innovations in Fusion Research // Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1994 / Proceedings of the Fifteenth International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 26 September — 1 October 1994. Vol. 1. Seville: International Atomic Energy Agency, 1994. P. 3–8.
37. WikiQuote. Max Planck. 2016. Citation by: Wissenschaftliche Selbstbiographie. Mit einem Bildnis und der von Max von Laue gehaltenen Traueransprache. Johann Ambrosius Barth Verlag (Leipzig 1948), p. 22. Access mode: https://en.wikiquote.org/wiki/Max_Planck.
38. *Ryutov D. D.* Reinventing Fusion. 1996. Plenary talk at 12th American Nuclear Society Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, Reno, NV, June 16-20, 1996.

Материал поступил в редколлегию 12.10.2016

I. A. Kotelnikov

*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
11 Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

kia999@mail.ru

NUCLEAR FUSION AND SOLAR ENERGY

An attempt is made to critically rethink 66 years in the development agenda of controlled nuclear fusion and on this basis to answer the question: will a thermonuclear reactor be in demand in XXI century. A hypothetical fusion reactor is compared to existing nuclear fission reactor on the energy gained per unit volume of the active core when using either D-T or p-11 B-fuel. Progress in fusion research is opposed to the rapid development of solar energy. It is suggested that humankind will always need a variety of energy resources, so the fusion power plant can be built even with the dominance of solar energy.

Keywords: controlled nuclear fusion, solar energy.