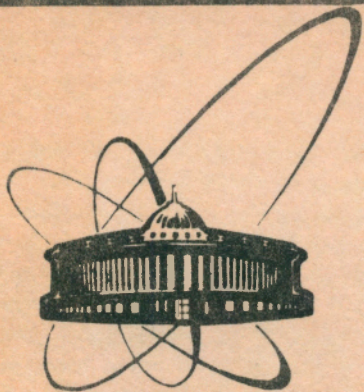


92-303



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

18-92-303

К.Д.Толстов

МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОЯДЕРНОГО СПОСОБА  
ПОЛУЧЕНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ  
И ТРАНСМУТАЦИИ АКТИВНЫХ ОТХОДОВ\*

\*Доклад на 72-й сессии Ученого совета ОИЯИ 25 июня 1992 г.

ОИЯИ  
БИБЛИОТЕКА

1992

Проблема обеспечения человечества энергией является одной из главнейших. По данным Международного энергетического конгресса в ближайшее столетие ожидается рост мощности производства электроэнергии до 50 тысяч гигаватт, показанный на рис.1. Из него следует, что за счет ископаемых горючих источников энергии максимум достигается к 2000 году, и затем наступает быстрый спад, и к 2100 году около 60% электроэнергии предполагается получить от атомной. Сравнительно малым будет вклад возобновляемых источников энергии на основе солнечной, вклад от нее и к 2100 г. ожидается порядка 20%, а основным источником будет энергия атома.

Соответственно этому усиление вреда для экологии от выброса в атмосферу продуктов сжигания угля, нефти и газа возможно по сценарию, показанному на рис.2.

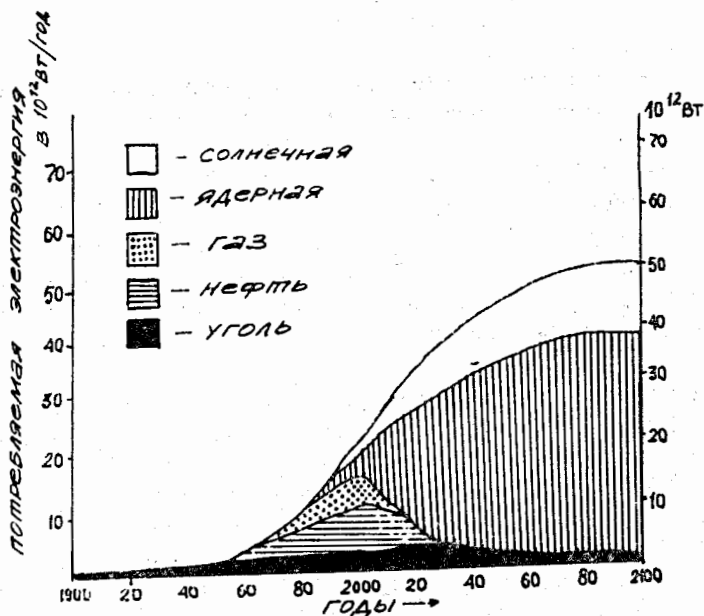


Рис.1. Сценарий по данным Международного энергетического конгресса

ОИЯИ  
|  
БИБЛИОТЕКА

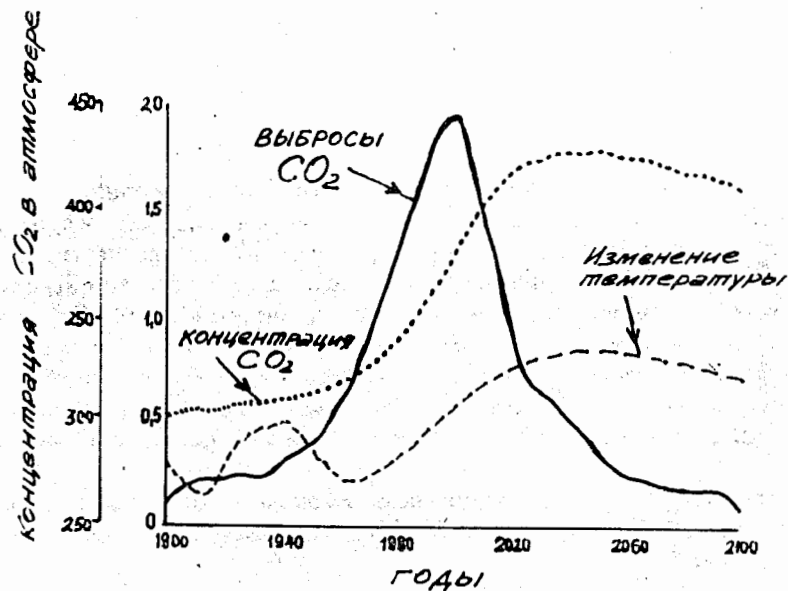


Рис.2. Выбросы CO<sub>2</sub>

В книге «Ядерная энергетика, человек и окружающая среда» авторами из ИАЭ им.И.В.Курчатова показано, что суммарный вред для населения от угольных электростанций в четыреста раз выше, чем от атомных, включая все операции от добычи до захоронения отходов. Аналогичные оценки приводятся и в зарубежных источниках.

В угольной золе в среднем содержится 400 г урана на тонну, то есть в странах СНГ в золе остается около 90 тыс. тонн урана, что вчетверо больше, чем его годовая добыча во всем мире. При этом в атмосферу выделяется радон, обуславливающий более половины естественной дозы радиоактивности.

Обо всем этом общественность почти не информирована, в то время как после черновильской катастрофы некомпетентными авторами и средствами массовой информации она резко настроена против атомной энергетики. На учредительном съезде Российского энерготехнологического конгресса в апреле с.г. приводились примеры, когда люди ложились на рельсы, чтобы препятствовать строительству блоков АЭС. Для изменения общественного мнения главнейшим элементом по существу является гарантия безопасности АЭС, в особенности от перехода реакторов в надкритичный режим, т.е. с неуправляемым ростом мощности.

Если вероятность аварийных ситуаций для действующих реакторов оценивается специалистами порядка  $10^{-7}$  реакторолет и ставится задача

повысить ее в 10—100 раз, то житель мыслит не вероятностными категориями — он живет как бы в «двочной» (да — нет) системе, и никакая игра в вероятности его не устраивает.

Следовательно, необходимо исключить надкритичный режим, это обеспечит реактор с эффективным коэффициентом размножения нейтронов  $K_{эф} < 1$ . В таком реакторе не может самостоятельно поддерживаться цепная реакция — необходим внешний источник нейтронов, ее инициирующий. Так называемый электроядерный способ (ЭЛЯР) был более 30 лет назад предложен в США и Канаде. Предполагалось использование ускоренных протонов, которые в столкновениях с ядрами образуют нейтроны, поддерживающие цепную реакцию. Для реализации ЭЛЯР нужно сочетать ускоритель и реактор специальной конструкции, а также получить ядерные данные, необходимые для достижения эффективности процесса. В первых проектах [1] и последующих разработках внимание было направлено на сильноточные ускорители и использование обедненного урана, т.е. после извлечения из естественного большей части изотопа  $^{235}\text{U}$ . В самое последнее время интерес к сильноточным ускорителям возрос в связи с программой СОИ, производства трития для нейтронного оружия и проблемой трансмутации накопившихся радиоактивных продуктов атомной промышленности, в том числе долгоживущих актинидов. Для этих целей в работе [2] проведена концептуальная проработка трансмутации актинидов. Пучок протонов из ускорителя с энергией 1,5 ГэВ и током 39 мА направляется на вольфрамовую мишень. Активная зона реактора охлаждается натрием. Предполагается трансмутировать в год 250 кг актинидов с генерацией 246 МВт электроэнергии, достаточной для питания ускорителя.

В [3] концепция PHOENIX предполагает создание большого линейного ускорителя протонов с энергией 1,6 ГэВ и током 104 мА. Хотя такой ускоритель требует развития существующей технологии, тем не менее планируются даже большие машины на ток 250 мА при энергии протонов 1,6 ГэВ с использованием их для производства трития.

На рис.3 из работы [4] приведены данные по действующим и проектируемым ускорителям, в том числе из [2] с мощностью пучка протонов 60 МВт.

Возможен другой подход осуществления ЭЛЯР — снижение требований к мощности пучка ускоренных частиц за счет повышения  $K_{эф}$  реактора стартовым обогащением его  $^{235}\text{U}$ . Выигрыш также можно получить при замене протонов на легкие ядра. Первые заключения об этом следовали из анализа столкновений протонов и ядер с ядрами серебра и свинца, как показывает табл.1.

Из таблицы следует, что с увеличением атомного веса ускоренного ядра ужесточается спектр нуклонов, вылетающих из ядер мишеней, и растет ве-

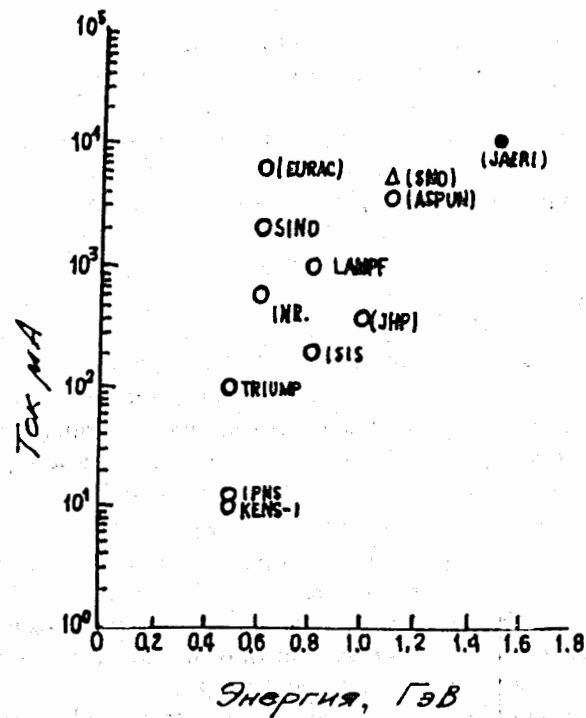


Рис.3. Настоящий статус протонных ускорителей

роятность их полного разрушения в основном на отдельные нуклоны. Поэтому в последующих столкновениях в реакциях  $n, 2n$  в ядрах будет создано большее количество нейтронов, т.е. затраты энергии на генерацию одного нейтрона следует ожидать меньше, чем для протонов. В этой связи необходимо учитывать и относительные потери энергии до столкновения на ионизацию. Они рассчитываются по формуле

$$\Delta = -\frac{1}{E_0} \int_0^{x_{\max}} \frac{dE}{dx} e^{-x/\lambda} dx,$$

где  $E_0$  — начальная кинетическая энергия частицы,  $x_{\max}$  — максимальный ионизационный пробег,  $\lambda$  — средний пробег до столкновения. Расчеты, проведенные в [5], приведены на рис.4. Из него следует, что относительные ионизационные потери у ядер  ${}^4\text{He}$  меньше, чем у протонов. (В этой связи отметим, что в [6] не был учтен множитель  $e^{-x/\lambda}$ , и в результате потери у ядер  ${}^4\text{He}$  оказались больше, чем у протонов, а все кривые вместо стягивания в точку при  $E_0 \rightarrow 0$  расходились).

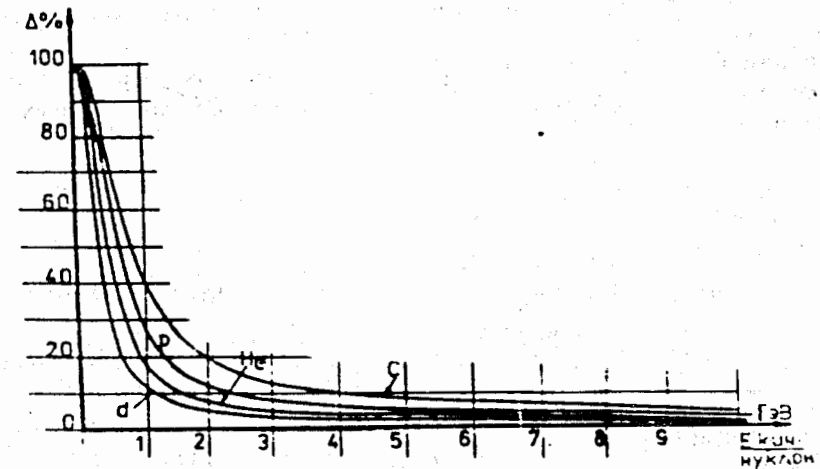


Рис.4.

Таблица I

Снаряд	$p$	${}^2\text{H}$	${}^4\text{He}$	${}^{12}\text{C}$	${}^{22}\text{Ne}$
Вероятность полного разрушения ядер серебра	3%		6	17	
Среднее число быстрых нейтронов	13	21	25	28	30
Средняя энергия нейтронов, МэВ	$120 \pm 12$	$110 \pm 3$	$138 \pm 3$	$148 \pm 5$	$156 \pm 4$
Вероятность полного разрушения ядер свинца	6%	10	22		
Среднее число быстрых нейтронов	30		45	43	52

Для дальнейших исследований совместно со специалистами ХФТИ нами была создана установка «Свинцовый блок» и проведены опыты на синхрофазотроне ОИЯИ. Мишенью для частиц служила свинцовая призма  $50 \times 50 \times 80$  см, в которую частицы вводились с помощью канала глубиной 20 см. В объеме мишени располагались камеры КНТ-8 диаметром 7 мм со



слоем естественного урана, эффективное количество которого было в специальных опытах [7] определено равным  $(1,5 \pm 0,2)$  мг.

Реакции  $n, \gamma$  методом гамма-спектроскопии регистрировались с помощью урановых дисков диаметром 8 мм и весом 1 г, также установленных в объеме мишени.

Таблица 2

	p (протоны)		$^2\text{H}$	$^4\text{He}$	$^{12}\text{C}$
	Энергия, ГэВ		Энергия на нуклон ядра, ГэВ		
	3,65	8,1	3,65	3,65	3,65
Относительные затраты энергии на генерацию одного нейтрона	1	0,92	0,89	0,72	0,81
Расчетные потери энергии на ионизацию в %	8	4	4	6	11
Уменьшение затрат энергии по сравнению с протонами 3,65 ГэВ	—	$(8 \pm 6)\%$	$(11 \pm 6)\%$	$(28 \pm 6)\%$	$(19 \pm 6)\%$

Мониторинг частиц производился с помощью алюминиевых детекторов в реакциях  $x\ ^{27}\text{Al} \rightarrow\ ^{24}\text{Na}$ , когда известны сечения реакции. Была разработана также специальная методика мониторинга с помощью сочетания показаний КНТ-8 и фотозмульсий при малых интенсивностях, а при больших использовался найденный коэффициент пересчета для КНТ-8 [8].

Результаты опытов по генерации нейтронов протонами и ядрами  $^2\text{H}$ ,  $^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}$  опубликованы в [9—12]. Относительные эффективности генерации для этих частиц показаны в табл.2.

Как и ожидалось, из нее следует, что затраты энергии на генерацию одного нейтрона по сравнению с протонами для ядер  $^4\text{He}$  уменьшаются примерно на 30%.

Для определения абсолютных затрат энергии на генерацию одного нейтрона регистрировались также нейтроны, вылетающие из свинцовой мишени. Они замедлялись в ванне с водой, установленной на верхней грани ми-

шени, и регистрировались с помощью КНТ-8 и урановых детекторов на расстоянии 1—20 см от дна ванны.

Опыты были проведены с ядрами:  $^2\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$  и  $^{12}\text{C}$ , в интервале энергии  $1,5 \div 2,2$  ГэВ на нуклон. Результаты опытов из работы [13] приведены в табл.3. Из нее следует, что оба метода дали согласующиеся результаты, и усредненная величина энергии на генерацию одного нейтрона равна  $E = (32 \pm 5)$  МэВ. Эта величина много меньше, чем приводимая ранее в [1]  $E_n > 50$  МэВ, но позже уточнение в [14] со ссылками на учет реакций  $n, 2n$  в работах [15,16] дает расчетное значение  $E_n \approx 30$  МэВ. Помимо значения этой величины для ЭЛЯР оно необходимо для расчетов защиты от нейтронов и создания на базе ускорителей нейтронных генераторов. Имеет место снижение затрат энергии на генерацию нейтронов легкими ядрами по сравнению с протонами, а соответственно тока и мощности пучков частиц. Следовательно, облегчается создание ускорителя.

Для дальнейших исследований разработан и включен в программу ЛВЭ проект «Энергия»: «Исследование физических спектров электроядерного способа получения атомной энергии». На проект получены положительные отзывы от Министерства атомной энергии Российской Федерации, научного центра Курчатовский институт, Физико-энергетического института в Обнинске и Института ядерной энергии в Минске.

В рамках проекта в 2-летний срок намечается выполнить следующую программу.

Таблица 3

Снаряд	Энергия нуклон, ГэВ	Энергия генерации нейтронов, МэВ		
		$n, \gamma$	$n, F$	среднее
$^2\text{H}$	1,5	$34,7 \pm 3$	$30,0 \pm 4$	$32,4 \pm 3$
$^4\text{He}$	2,2	$30,6 \pm 10$	$27,5 \pm 6$	$29,0 \pm 8$
$^7$	2,2	$31,0 \pm 8$	$34,7 \pm 5$	$32,1 \pm 6$
$^{12}\text{C}$	1,87	$31,5 \pm 5$	$32,7 \pm 4$	$32,1 \pm 4$
		среднее $(32 \pm 5)$ МэВ		

1. Затраты энергии на генерацию одного нейтрона в блоках различного ядерного состава и увеличение энергии по сравнению с энергией пучка частиц при наличии делящихся ядер.

2. Состав перспективного композиционного горючего в гомогенном и гетерогенном вариантах.

3. Энергия и масса частиц, оптимальные для эффективности цепной реакции и создания ускорителя.

4. Длительность работы без замены горючего или с добавлением  $^{238}\text{U}$ , Рб и Вi.

5. Спектр нейтронов внутри блока и вылетающих из него.

Данные, которые будут получены, позволят приступить к созданию подкритичного реактора, в котором цепная реакция инициируется пучком ядер из ускорителя [17].

Линейная зависимость мощности реактора от интенсивности пучка частиц и подкритичность, т.е.  $K_{эф} < 1$ , гарантируют реактор от «разгона», следовательно, обеспечивают безопасность.

При выключении пучка частиц энерговыделение в реакторе очень короткое время обуславливается запаздывающими нейтронами, выход которых  $\sim 0,6\%$ , а периоды меньше минуты. Усредняя по группам запаздывающих нейтронов, получим для зависимости мощности реактора от времени формулу

$$W(t) = W_0 \frac{0,0064}{0,0064 - \rho} \cdot l^{\rho t / 0,08},$$

где реактивность  $\rho = K_{эф} - 1$ . При  $K_{эф} = 0,98$ ,  $\rho = -0,02$ .

$$W(t) = W_0 \frac{0,0064}{0,00264} e^{-0,25t}.$$

Через 1 с  $W(1) = 0,19$ , через 10 с —  $W(10) = 0,02$ .

Важнейшим фактором атомной энергетики являются ее экономические показатели, которые зависят от использования урана. В современных реакторах делится в основном  $^{235}\text{U}$ , и с учетом эффективности его извлечения из природного урана и использования в реакторах только  $\sim 0,5\%$  природного урана дает энергию.

В ЭЛЯР спектр нейтронов более жесткий, и возможно большее включение в цепной процесс основного изотопа. Кроме того, при жестком спектре нейтронов продукты деления будут поглощать меньшую долю нейтронов, возрастет время работы без замены горючего и, следовательно, экономические показатели.

Остановимся далее на возможности в ЭЛЯР трансмутации продуктов деления ядер (ПД).

Как показано в [18], бесперспективна трансмутация с помощью протонов и  $\gamma$ -квантов, получаемых от ускорителей электронов, т.к. затраты энергии при этом в десятки раз превышают ту энергию, которая была получена при образовании ПД.

Трансмутация с помощью нейтронов требует интенсивных пучков, т.к. в противном случае слишком велико необходимое время. Однако в действующих реакторах на тепловых нейтронах интенсивность нейтронных потоков ограничена величиной  $10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , а поток  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в проекте [3] требует создания сильноточного ускорителя.

В опытах, выполненных нами [9—12], было определено распределение плотности нейтронов, генерированных частицами в свинцовой мишени. Вдоль пучка, согласно рис.5а, плотность на расстоянии 50 см спадала в 10 раз, а поперек пучка, согласно рис.5б, в пять раз на расстоянии 25 см. Из этого следует, что около половины энергии выделяется в центральной зоне мишени объемом  $\sim 100 \text{ л}$ .

В реакторе на быстрых нейтронах БН-600 [19] достигнута в центральной зоне плотность потока нейтронов  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  при энергонапряженности  $\sim 1,5 \text{ МВт/л}$ . При мощности ЭЛЯР, равной БН-600, интенсивность в центральной зоне будет больше, в 10 раз, и соответственно плотность нейтронного потока  $\sim 10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, при выводе нейтронов из центральной зоны могут быть созданы условия для трансмутации за меньшее время.

Остановимся, наконец, на возможностях ОИЯИ в моделировании и разработках ЭЛЯР. По существу они уникальны.

Институт располагает пучками протонов и легких ядер в диапазоне энергии и интенсивности, достаточном для измерения констант, необходимых для ЭЛЯР. В лабораториях Института сложились коллективы высококвалифицированных специалистов по разработке, наладке и эксплуатации ускорителей, в частности в ЛЯП ведутся работы по проекту «Минген» [20] — ускорителя дейтронов на энергию 2 ГэВ с током 10 мА. В ЛВЭ заканчива-

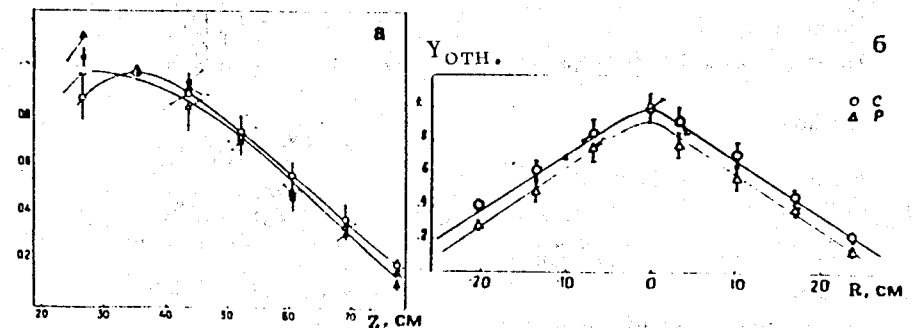


Рис.5. а — продольное распределение выходов  $(n, \gamma)$  и  $(n, f)$ , нормированное на их выходы в точке при  $Z = 35 \text{ см}$ ,  $R = 0$  ( $\Delta$  — нормировка,  $\Lambda$  —  $p(n, \gamma)$ ,  $\blacktriangle$  —  $p(n, f)$ ,  $\circ$  —  $^{12}\text{C}(n, \gamma)$ ,  $\bullet$  —  $^{12}\text{C}(n, f)$ . б — радиальное распределение  $(n, \gamma)$ -реакции, нормировка та же.

ются работы по содержанию ускорителя ядер — нуклотрона со сверхпроводящими магнитными системами, т.е. с многократным уменьшением потребляемой энергии. Нуклотрон позволит ускорять легкие ядра и ядра среднего атомного веса до энергии 7 ГэВ на нуклон и при меньшей энергии ядра вплоть до урана.

Как было показано ранее, разработана и опробована методика измерения констант, необходимых для ЭЛЯР.

Лаборатория нейтронной физики Института располагает коллективом ученых и оборудованием, включая реактор ИБР-2, что может обеспечить необходимый фронт исследований по нейтронной физике. В ЛВТА коллектив, руководимый В.С.Барашенковым, имеет многолетний опыт расчетов по методу Монте-Карло цепных процессов в реакторных системах. Таким образом, совместно с учеными Института, участвующих в проекте «Энергия», ОИЯИ располагает возможностями, необходимыми для реализации программы ЭЛЯР. Подчеркнем, что имеется в виду длительная эксплуатация без замены горючего и извлечения плутония, то есть для сугубо мирных целей получения энергии.

Приведем на основе изложенного возможный вариант ЭЛЯР с выдачей в сеть 10 МВт электроэнергии, т.е. вдвое больше, чем у первой в мире АЭС, созданной в 1956 г. в Обнинске.

#### РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКА ЯДЕР ${}^4\text{He}$

Ток в единицах заряда	$I$
Число ядер в секунду	$I/2$
Энергия на нуклон	$\varepsilon = 1,5 \text{ ГэВ}$
Энергия пучка	$E = 2 \cdot \varepsilon \cdot I = 3I \text{ ГэВ}$
На генерацию 1 нейтрона	32 МэВ
Число нейтронов	$n = \frac{3 \cdot 10^9 I}{32 \cdot 10^6} = 94I$
Если эфф.коэфф.размножения $K_{эф} = 0,98$ , то число нейтронов	$N = \frac{94 \cdot 0,98}{1 - 0,98} = 4600.$
При делении число нейтронов	2,44
Число делений	$m = 4600/2,44 = 1885$
Энерговыделение при делении	~ 200 МэВ
Мощность	$W = I \cdot m \cdot 200 = 377000I \text{ МэВ}$ $W = 377000 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} I = 6 \cdot 10^{-8} I \text{ Вт}$

Если мощность установки  $10^7 \text{ Вт эл.}$ , а КПД 0,35, то тепловая мощность  $2,8 \cdot 6 \cdot 10^7 \text{ Вт т.с.: } 2,8 \cdot 6 \cdot 10^7 \text{ В} = 6 \cdot 10^{-8}$ , откуда  $I = 4,8 \cdot 10^{14}$  единиц заряда или ток пучка  $I = 77 \text{ }\mu\text{А}$ .

$$\text{Число ядер He} \quad N_{\text{He}} = \frac{I}{2} = 2,4 \cdot 10^{-14} \text{ с}^{-1}.$$

$$\text{Мощность пучка} \quad W = 2,4 \cdot 10^{14} \cdot 6 \text{ ГэВ} = 230 \text{ кВт.}$$

Если коэффициент преобразования энергии сети в пучок — только 0,25, то нужно < 1 мВт и ток < 0,1 мА.

В заключение приведу слова академика В.И.Векслера — основателя ЛВЭ, лауреата Государственных премий СССР и премии США «Атом для мира»: «Покажите, что это возможно и нужно, а техника найдет средства для осуществления».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Proceeding of an Inform. Meeting on Accelerator—Breeding, N-Y, January, 1977.
2. Takizuka T. et al. — Concepted design of transmutation plant JAERJ 319-11, 1991.
3. Van Tuyle G.J. et al. — Driven sub-critical target concept for transmutation nuclear wastes., BNL 11973, 1991.
4. Mizumoto M. — J. Atom. Soc. JAPAN 33, 1034, 1991.
5. Воробьев Г.Г., Толстов К.Д. — ОИЯИ, Р1-85-351, Дубна, 1985.
6. Васильков Р7Г7 и др. — УФН 139, 3, с.435.
7. Дьяченко В.М. и др. — В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ №2(53)-92, Дубна, 1992.
8. Damdinsuren C. et al. — Nucl. Instr. and Meth. A-288, 319, 1990.
9. Воронко В.А. и др. — А.Э. 1989, 68, с.215.
10. Дьяченко В.М. и др. — А.Э. 1989, 67, с.291.
11. Воронко В.А. и др. — А.Э. 1990, 68, с.449.
12. Воронко В.А. и др. — А.Э., 1991, 71, с.563.
13. Воронко В.А. и др. — В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ №2(53)-92, Дубна, 1992.
14. Bownap C.D. L.A.-UR-91-2601, 1991.
15. Pracl R.E., Lichtenstein. LA-UR-89-3014, 1989.
16. Briesmeister J.F. L.A.-7396M Rev. 2, 1986.
17. Толстов К.Д. — Авторск. свид. №2323987/25 ОИ 1978, 19, с.120.
18. Толстов К.Д. — Сообщения ОИЯИ Р3-90-583, Дубна, 1990.
19. Атомная наука и техника в СССР. М.: Атомиздат, 1977.
20. Глазов А.А. и др. — ОИЯИ, Р9-81-734, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 июля 1992 года.

Толстов К.Д.  
Моделирование электроядерного способа  
получения атомной энергии  
и трансмутации активных отходов

18-92-303

Обсуждается перспективность электроядерного способа получения атомной энергии и трансмутации радиоактивных отходов на основе данных по генерации нейтронов легкими ядрами в массивном блоке свинца, полученных на синхрофазотроне ОИЯИ.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод автора

Tolstov K.D.  
Simulation of Electronuclear Method  
of Atomic Energy Production  
and Radioactive Waste Transmutation

18-92-303

Prospects of electronuclear method of atomic energy production and radioactive waste transmutation are discussed. The work is based on data obtained at the JINR synchrophasotron, which are devoted to neutron generation by light nuclei in massive lead block.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1992