Институт теоретической и
экспериментальной физики

15

FERMILAB

MAR 2 2 2001

LIBRARY

14-00

С.Неганов , В.Н.Трофимов , А.А.Юхимчук,

Л.Н.Богданова

ITEP-14-00

ТРИТИЕВЫЙ ИСТОЧНИК АНТИНЕЙТРИНО

АКТИВНОСТЬЮ 40 МКи

Fermilab Library

0 1160 0089650 0

Москва 2000

УДК 539.123.6 М-16

ТРИТИЕВЫЙ ИСТОЧНИК АНТИНЕЙТРИНО АКТИВНОСТЬЮ 40 МКи: Препринт ИТЭФ 14-00/

Б.С.Неганов*, В.Н.Трофимов*, А.А.Юхимчук**, Л.Н.Богданова -
М., 2000 - 16с.

В работе рассмотрены некоторые технические и технологические аспекты разработки, создания и безопасной эксплуатации искусственного тритиевого источника антинейтрино активностью 40 МКи для эксперимента по измерению магнитного момента нейтрино.

Some technical and technological aspects of the development, construction and safe exploitation of an artificial tritium source of 40MCi activity for the experiment on the antineutrino magnetic moment measurement are considered.

Рис. - 6, список лит. - 22 наим.

© **Институт теоретической и экспериментальной физики, 2000**

---

* Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Дубна.
** Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190, Саров.

1. Введение

Низкоэнергетические нейтринные реакции являются чувствительным и точным тестом для проверки Стандартной Модели электрослабого взаимодействия, например, для изучения нестандартных электромагнитных свойств нейтрино. Проблема наличия магнитного момента (ММН) у (анти)нейтрино и его величины, а также мотивация его лабораторного поиска широко известны [1, 2, 3].

Лабораторные измерения ММН -μ_ν основаны на выделении его вклада в процесс рассеяния (анти)нейтрино на электроне. При ненулевом μ_ν в дифференциальное сечение $d\sigma/dT$, где T - кинетическая энергия рассеянного электрона наряду со стандартными слабыми (W) будут давать вклад и электромагнитные (EM) взаимодействия. При малых переданных энергиях ($T \ll E_\nu$) эти компоненты ведут себя абсолютно по-разному: $(d\sigma/dT)_W$ - практически постоянно в то время как $(d\sigma/dT)_{EM}$ растет к низким энергиям как 1/T. Поэтому для улучшения чувствительности к μ_ν необходимо понижать порог регистрации рассеянных электронов.

Схема эксперимента включает источник (генератор) антинейтрино и детектор. Из-за исключительной слабости взаимодействия нейтрино с веществом необходимым и главным, но не единственным, требованием к источнику является большая плотность потока нейтрино в детекторе.

В экспериментальной физике нейтрино возможно использование 4-х типов (анти)нейтринных генераторов: ядерных реакторов и β-активных изотопов (электронное антинейтрино), ускорителей (в основном, мюонные нейтрино и антинейтрино) и Солнца (электронное нейтрино). Как альтернатива реактору в последнее время

все большее внимание стали привлекать искусственные β-активные источники с активностью (5÷50) МКи [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Первым подобным опытом можно считать применение источников на основе Cr-51 для калибровки детекторов солнечных нейтрино в экспериментах GALLEX и SAGE. Использование в измерениях искусственных источников нейтрино вместо реакторов позволило бы получить следующие преимущества:

- более интенсивные потоки антинейтрино;
- сильно подавленный коррелированный фон, включая обратный β- распад;
- небольшие размеры, позволяющие использование низкофоновых подземных лабораторий и модуляцию потока для вычитания некоррелированного фона;
- весьма широкий выбор энергетического диапазона;
- знание спектра (анти)нейтрино с высокой точностью.

Замечательным преимуществом источника антинейтрино от распада трития является возможность отказа от пассивной защиты между источником и детектором: благодаря низкой граничной энергии спектра распада ($E_0 = 18,6$ кэВ) тормозное излучение не выходит из источника. К тому же, имеющиеся технологии позволяют получить тритий высокой степени очистки.

В предложении по измерению ММН [4, 5] было показано, что использование тритиевого источника (анти)нейтрино активностью 40МКи (4кг трития)в сочетании с детекторами, обеспечивающими порог регистрации электронов $E_{th} \simeq (1 \div 10)$ эВ, позволило бы существенно понизить лабораторный предел на магнитный момент (анти)нейтрино [12], достигнутый в реакторных экспериментах.

Сферический источник активностью 40МКи обеспечивает плотность потока (анти)нейтрино $F = 6.4 \times 10^{14}$см$^{-2}$ с$^{-1}$ в компакт-

ной (объемом несколько литров) сборке детекторов, расположенной внутри него (см.рис.1) [5]. Это значение более чем на порядок превышает потоки (анти)нейтрино, получаемые в экспериментах на промышленных реакторах [12].

Для регистрации электронов с энергией $\sim (1 \div 10)$ эВ могут быть использованы разрабатываемые в настоящее время кремниевые криодетекторы на основе эффекта конверсии ионизации в тепло [5] и стриповые лавинные германиевые детекторы с внутренним усилением сигнала [13]. Как показывают оценки [5, 13], за 1-2 года измерений в низкофоновых условиях может быть получен лабораторный предел на магнитный момент нейтрино на уровне наиболее жестких астрофизических ограничений $\mu_\nu \leq (1 \div 3) \times 10^{-12} \mu_B$ [14].

Создание тритиевого источника сверхвысокой активности является сложной и дорогостоящей научно-технической задачей. В настоящее время в ходе сокращения ядерного арсенала значительные количества трития стали доступны для проведения фундаментальных исследований. Столь уникальная ситуация вряд ли повторится, и было бы непростительно ею не воспользоваться.

В данной работе рассмотрены некоторые технические и технологические аспекты создания и безопасной эксплуатации тритиевого источника (анти)нейтрино активностью 40МКи.

2. Состояние трития в источнике

Для достижения максимальной плотности потока (анти)нейтрино в объеме детектора необходимо обеспечить максимальную объемную плотность трития в конструкции источника. В то же время такой источник должен быть абсолютно безопасным при любых, в том числе и экстремальных, условиях. Очевидно, что наиболее подходящим для этого является хранение трития в химически связанном состоянии на гидридообразующих металлах, которые, с одной стороны, имеют более высокую объемную плотность содержания

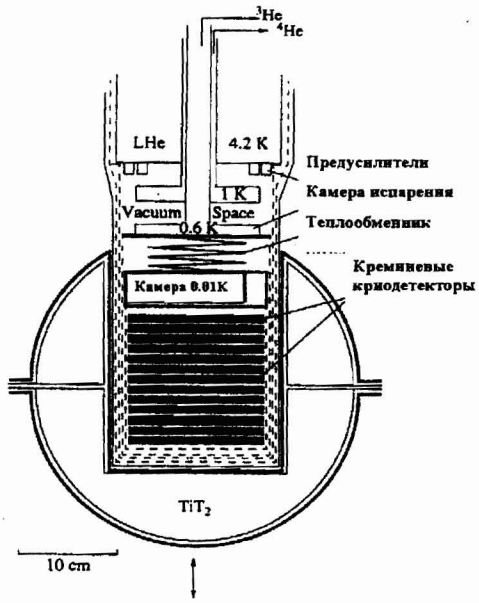

Рис.1. Схема эксперимента

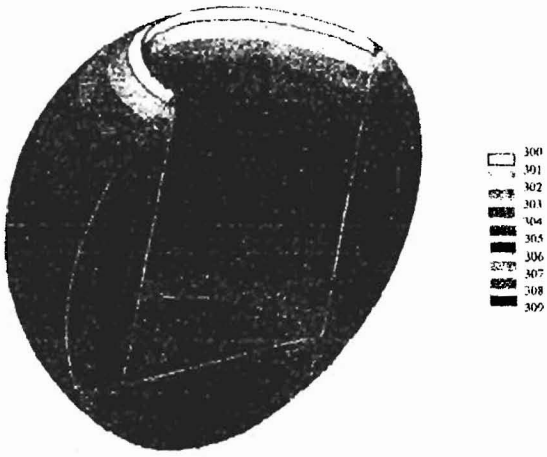

Рис.2. Распределение температуры в источнике при свободном конвективном обмене с окружающей средой

водорода, а с другой - тритий в них при комнатных температурах имеет низкие равновесные давления. В таблице 1 приведены характеристики некоторых кандидатных материалов для хранения водорода [15, 16, 17, 18].

Таблица 1

Перспективные материалы для хранения изотопов водорода [15, 16, 17]

Материал *)	P_{dec}, мм.рт.ст. при 25^{0}C	Температура разложения, ^{0}C	Содержание H_2 в гидридах		Плотность, г/см^3	
			см^3/г	см^3/см^3	металл	гидрид
UH_3	10^{-6}-10^{-4}	420-430	~140	~1570	18,9	11,9
TiH_2 TiT_2	~10^{-9}	550-620	~468	~1700 ~1700	4,5	3,8 3,3-4,1
Mg_2NiH_4	~10^{-2}	~240	~418	~1074	3,47	2,71
ZrCoH	~10^{-5}	340-350	~186	~1415	7,68	6,54
$LaNi_3Mn_2H_6$	~10^{-2}	270	~127			
$LaNi_{5-x}Al_xH_y$ x=0-1,y=6,7-4,1	~10^{-1}-10	180-250	80-100	550-690	9,66-7,41	8,25- 6,54
PdH	30-50	~150	~105	~800	11,9	
H_2 жидкий		-253		780		
T_2 жидкий		-251		1000		

*) Содержание водорода приведено для стехиометрического гидрида. Реальное содержание водорода в гидриде несколько меньше и зависит от состояния металла.

Как видно из этой таблицы, наиболее перспективным материалом является Ti. Он имеет самое низкое равновесное давление при комнатных температурах $\approx 10^{-9}$ мм рт.ст., наиболее высокую температуру разложения гидрида и максимальное объемное содержание водорода. Объемное содержание трития на Ti практически в 1,7 раз выше, чем в жидком состоянии. При этом источник с тритидом титана может безопасно эксплуатироваться в широком диапазоне температур, вплоть до 500^{0}C, в то время как для хранения трития в жидком состоянии требуется специальная довольно мощная холодильная установка, позволяющая поддерживать температуру трития (с учетом его тепловыделения) около 20K.

Другим немаловажным фактором выбора Ti в качестве носителя трития является его довольно высокая чистота по радиоактивным

примесям уранового ряда, что существенно ухудшает фоновые условия работы детектора [19].

3. Безопасность источника

Поскольку источник содержит беспрецедентно большое количество радиоактивного вещества (40МКи), необходимо обеспечить его абсолютную безопасность на всех этапах жизненного цикла.

Одним из основных вопросов при создании такого источника является вопрос тепловыделения и саморазогрева источника вследствие радиоактивного распада трития. При неконтролируемом повышении температуры возникает опасность выхода трития в газовую фазу и, в конечном итоге, его утечка (вследствие диффузии или разрушения корпуса источника) в окружающую среду.

По результатам калориметрических измерений было получено, что лишь 30% энергии β-распада трития реализуется в виде тепла. Остальная энергия уносится (анти)нейтрино. При этом выделение тепла составляет $dH/dt = 0,324$ Вт/г = 1,944 Вт/моль T_2 [17], что даст 1,3 кВт для 4 кг трития. Для конструкции источника (см.рис.1) с помощью пакета ANSYS был проведен расчет поля температур по объему источника. При расчете принималось, что на поверхности источника существует естественный теплообмен, плотность тритида-дейтерида титана состава $Ti(DT)_{1,9}$ при концентрации трития в исходной DT смеси 96% составляет 3,02г/см^3, теплопроводность $\lambda = 0,154$ Вт/(см$\times$ K), теплоемкость $c = 0,99$ Дж/(г$\times$град) [16, 17, 20]. Результаты расчета приведены на рис.2.

Как видно из данного рисунка, наибольшая температура реализуется в боковых полусферах источника. Тем не менее, в наиболее горячей точке она выше температуры окружающей среды всего на 9 градусов, а температура поверхности повышается лишь на 4 градуса. Это означает, что при свободном конвективном обмене с поверхностью в источнике автоматически реализуются условия

для длительного и безопасного хранения трития.

Немного хуже дело обстоит в случае транспортировки источника. В настоящее время, согласно международным нормам, к транспортным упаковкам предъявляются довольно жесткие требования. Упаковка должна обеспечивать повышенную защиту источника и предотвращать радиоактивное загрязнение окружающей среды в случае возникновения аварийных ситуаций, а именно при:

1) ударных воздействиях, имитирующих транспортную аварию;

2) падении упаковки с определенной высоты на штырь;

3) падении предметов на упаковку;

4) затоплении упаковки;

5) воздействии пуль стрелкового оружия и осколков некоторых средств поражения;

6) тепловом воздействии, имитирующем пожар транспортных средств.

Вполне очевидно, что для удовлетворения этих требований транспортировка источника должна осуществляться в транспортном защитном контейнере. В данной ситуации свободный конвективный обмен с поверхностью источника будет отсутствовать, что неизбежно приведет к довольно быстрому разогреву источника. На рис.3 приведены результаты расчета скорости повышения температуры внутри источника в предположении, что поверхность источника полностью теплоизолирована.

Из рис.3 и 4 [21] следует, что уже через два часа пребывания источника в таких условиях тритий начнет выходить в газовую фазу и при дальнейшем повышении температуры его давление станет выше атмосферного. Поэтому, в нашем случае, конструкция упаковки должна обеспечивать также отвод тепла, выделяющегося при распаде трития, в процессе эксплуатации и хранения, и предотвращение нагрева источника в условиях, имитирующих пожар.

На рис.5 представлена одна из возможных схем решения дан-

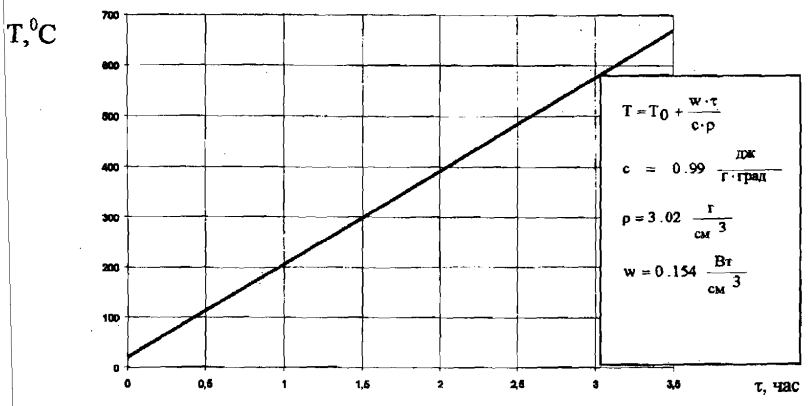

Рис.3. Скорость разогрева источника при его теплоизоляции от окружающей среды

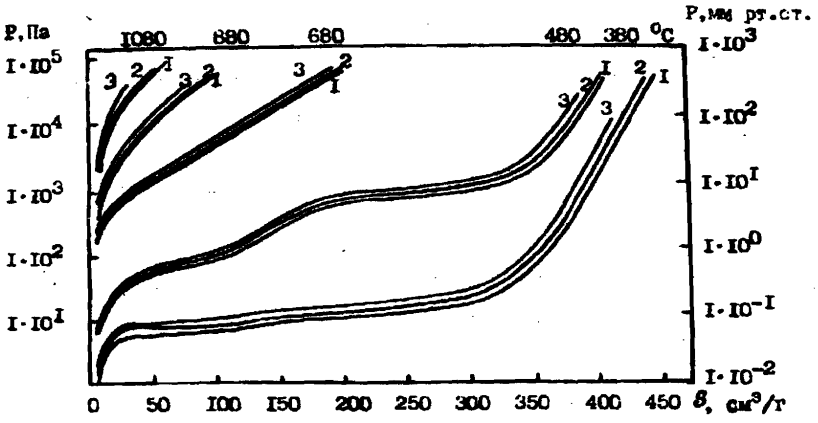

Рис.4. Изотермы системы Ti-H(D,T) [21]: 1 - водород, 2 - дейтерий, 3 - тритий.

ной проблемы. Источник размещается внутри охранного контейнера, который оборудован тепловой трубой [22] для отвода тепла, выделяющегося при β-распаде трития. Такая упаковка может обеспечить выполнение лишь первых пяти предъявляемых к ней требований. Однако, в случае пожара тепловая труба может стать источником дополнительного тепла извне, что приведет к увеличению скорости нагрева источника по сравнению со случаем, представленным на рис.3. Чтобы исключить этот процесс, при повышении температуры окружающей среды выше определенных значений тепловую трубу необходимо вывести из работы. Это может быть обеспечено оборудованием трубы плавкой вставкой, которая срабатывает при заданных температурах. Однако, при этом температура внутри источника начнет интенсивно повышаться (см.рис.3) и при нагреве выделившийся в газовую фазу тритий будет создавать давление внутри источника (см. рис.4), которое, в конечном счете, может привести к разрушению корпуса источника.

Для предотвращения данной ситуации газообразный тритий через мембранный блок, срабатывающий при достижении заранее заданного предельного давления, удаляется на геттер. В качестве рабочего материала геттера также может использоваться титан, который при низких степенях насыщения имеет низкое равновесное давление даже при высоких температурах (см. рис.4). Геттер должен размещаться в контейнере, аналогичном контейнеру источника, и соединяться с последним жесткой системой газовых коммуникаций. Наилучшим решением является размещение контейнеров и газовых коммуникаций внутри суперконтейнера (рис.5).

Следующий вопрос, который необходимо учитывать при создании источника, связан с его разбуханием вследствие накопления ^3He в твердой фазе тритида. На рис.6. приведены экспериментальные кривые уменьшения плотности и увеличения относительного объема тритида-дейтерида титана в зависимости от времени

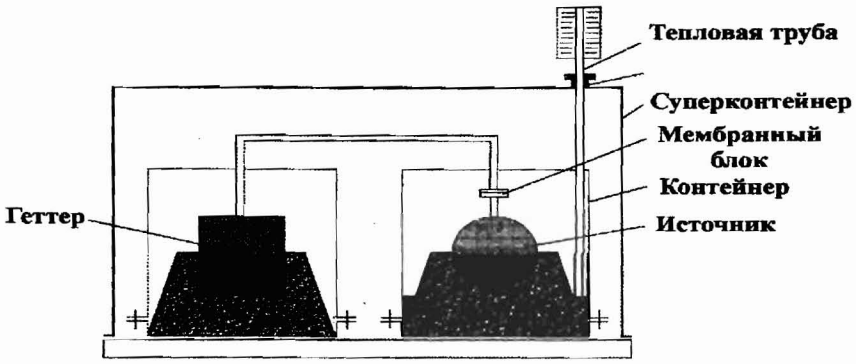

Рис.5. Схема транспортного контейнера

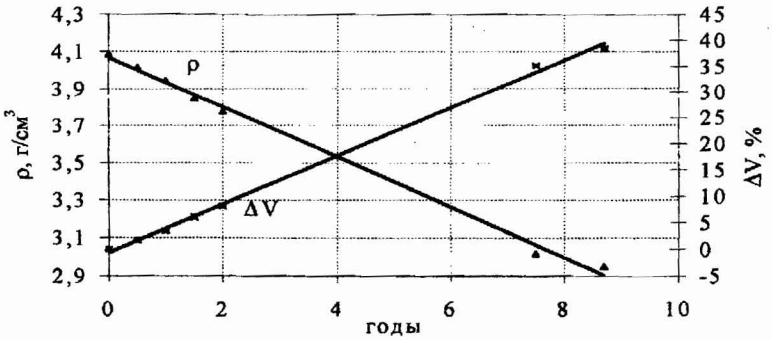

Рис.6. Зависимость плотности тритида-дейтерида титана от времени хранения

хранения. Для увеличения потока нейтрино заманчиво иметь максимальную плотность запрессовки тритида титана (4,09г/см^3). Однако в процессе хранения эта плотность будет уменьшаться, и возникнут большие нагрузки на силовой корпус источника, что может привести к его разгерметизации и разрушению. Для предотвращения этого в конструкции источника должны быть предусмотрены соответствующие компенсаторы.

4. Заключение

Возможно, что в процессе создания источника некоторые обсуждаемые здесь проблемы получат иное техническое решение. В частности, реальный источник может иметь другую форму, хотя рассмотренная в работе [5] геометрия источника оптимальна с точки зрения обеспечения максимального потока частиц в детекторе. Тем не менее, окончательный выбор конструкции источника может быть сделан только с учетом всех конструкционных особенностей детектирующей системы, фоновых условий лаборатории, а также требований технологичности изготовления и эксплуатации источника в составе экспериментальной установки. При этом принципиальный вывод настоящей работы о возможности создания и безопасной эксплуатации тритиевого источника антинейтрино активностью 40МКи остается в силе.

Авторы выражают искреннюю признательность А.Н.Голубкову и А.В.Стеньгачу за полезные обсуждения свойств материалов таблицы 1, Н.С.Ганчуку за предоставление результатов расчета теплового режима источника, А.Ф.Фадеевой и Н.Ю.Тумановой за помощь в подготовке статьи.

Список литературы

[1] Raffelt G.G. // Phys. Reports. 1999. Vol.320 P.319.

[2] Волошин М.Б., Высоцкий М.И., Окунь Л.Б. // ЖЭТФ. 1986. Т.91. С.754. [Sov. Phys. JETP. 1986. Vol.64. P.446].

[3] Vogel P. and Engel J. // Phys. Rev. 1989. V.D39. P.3378.

[4] Neganov B., Trofimov V. and Stepankin V. // J. Low Temp.Phys. 1993. Vol.93. P.754.

[5] Трофимов В.Н., Неганов Б.С., Юхимчук А.А. // ЯФ. 1998. Т.61. С.1373. [Phys. Atom. Nucl. 1998. Vol.61. P.1271].

[6] Давыдов А.В., Исаев Ю.Н. // ЯФ. 1996. Т.59. С.486. [Phys. Atom. Nucl. 1996. Vol.59. P.459].

[7] Голубчиков А.В., Займидорога О.А., Смирнов О.Ю., Сотников А.П. // ЯФ. 1996. Т.59. С.1989. [Phys. Atom. Nucl. 1996.Vol.59, P.1916].

[8] Корноухов В.Н. // ЯФ. 1997. Т.60. С.639. [Phys. Atom. Nucl. 1997. Vol.60. P.558].

[9] Бергельсон Б.Р., Давыдов А.В., Исаев Ю.Н., Корноухов В.Н. // ЯФ. 1998. Т.61. С.1347. [Phys. Atom. Nucl. 1998. vol.60. P.1245].

[10] Микаэлян Л.А., Синев И.И., Фаянс С.А. // Письма ЖЭТФ. 1998. Т.67. С.435. [JETP Letters. 1998. Vol.67. P.453].

[11] Barabanov L., Belli P., Bernabei R. et al. // Nucl. Phys. 1999. Vol.B546. P.19.

[12] Reines F., Gurr H.S., Sobel H.W. // Phys. Rev. Lett. 1976. Vol.37. P.315; Видякин Г.С., Выродов В.Н., Гуревич И.И. и др. // Письма ЖЭТФ. 1991. Т.55. С.212. [JETP Letters. 1991. Vol.5. P.206; Дербин А.И., Попеко Л.А. и др. // ibid 1993. Т.57. С.755. [JETP Letters. 1993. Vol.57. P.XXX].

[13] Starostin A.S. and Beda A.G. // Proc. Int. Conf. NANP-99, Dubna, 1999 (ЯФ, в печати).

[14] Raffelt G. // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol.64. P. 2856.

[15] Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справочник/Под ред. Гамбурга Д.Ю. и Дубовкина Н.Ф. М.: Химия, 1989.

[16] Антонова М.М. Свойства гидридов металлов: Справочник. Киев: Наукова думка, 1975.

[17] Souers P.C. // Hydrogen Properties for Fusion Energy. University of California Press, 1986.

[18] Веденеев А.И., Голубков А.А., Артемов Л.В. и др. Изменение свойств тритида-дейтерида титана под воздействием β-распада трития. Препринт. Саров. РФЯЦ-ВНИИЭФ. 1998. № 68.

[19] Hausser G. // Annu. Rev. Nucl. Part.Sci. 1995. Vol.45. P.543.

[20] Физические величины: Справочник/Под ред. Григорьева И.С. и Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991.

[21] Софьина В.В., Азарх З.М., Гаврилов П.И., Павловская Н.Г., Юрьева Н.Д. Исследование системы титан-водород. Препринт. Саров. РФЯЦ-ВНИИЭФ. 1993. № 29.

[22] Кузнецов В.А. Ядерные реакторы космических энергетических установок. М.: Атомиздат, 1977; Кутателадзе С.С., в: Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990.

Подписано к печати II.02.00 Формат 60x90 I/I6
Усл.-печ.л.0,75. Уч.-изд.л.0,5. Тираж I30 экз. Заказ I4.
Индекс 3649

Отпечатано в ИТЭФ, II7259, Москва, Б.Черемушкинская, 25