



ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

841900 6945

ИТЕФ. 82-89

Ю.С.ЛЮТОСТАНСКИЙ, В.И.ЛЯШУК

ЛИТИЕВЫЙ КОНВЕРТОР РЕАКТОРНЫХ
НЕЙТРОНОВ В АНТИНЕЙТРИНО.

II. ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

Москва — ЦНИИАтоминформ — 1989

Рассматриваются вопросы создания литиевого конвертера реакторных нейтронов в антинейтрино с динамическим режимом работы в схеме с циклической прокачкой высокоочищенного лития (на изотопе ${}^7\text{Li}$) через конвертер. Схема позволяет локализовать β -распад ${}^8\text{Li}$ ($T_{1/2} = 0,84$ с) в резервуаре вблизи детектора и таким образом создать источник литиевых $\bar{\nu}_e$, обладающих жестким спектром с $E_{\text{max}} \approx 13$ МэВ, удалив его от активной зоны - источника $\bar{\nu}_e$ с мягким спектром. Получены выражения для потоков литиевых $\bar{\nu}_e$ из конвертера, резервуара и канала доставки.

Рис. - 8, список лит. - 9 назим.

THE LITHIUM CONVERTER OF THE REACTOR NEUTRONS TO ANTINEUTRINO

II. THE DYNAMIC REGIME OF THE OPERATING

Yu.S.Lyutostansky, V.I.Lyashuk

The questions of the developing of the reactor neutrons to antineutrino lithium converter, operating at the dynamic regime (in the scheme with the cycle circulation of the high-purified lithium (on ${}^7\text{Li}$ isotope) through the converter) are considered. The scheme allows to localize the ${}^8\text{Li}$ β -decay ($T_{1/2} = 0.84$ s) in the reservoir near the detector and so to design the hard-spectrum lithium $\bar{\nu}_e$ -source ($E_{\text{max}} \approx 13$ MeV) at the distance from the active zone - the soft-spectrum $\bar{\nu}_e$ - source. The expressions for the lithium $\bar{\nu}_e$ flux from the converter, reservoir and conveyance channel are obtained.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
Введение	2
1. Динамический режим работы конвертора	5
2. Определение потоков литиевых \tilde{v}_e	7
3. Анализ режима работы конвертора. Обсуждение результатов	10
Заключение	18
Литература	27

В В Е Д Е Н И Е

В проблеме создания мощного нейтринного источника на первое место выдвигается требование к его жесткости с учетом того, что сечение взаимодействия нейтрино с веществом детектора пропорционально E_ν^2 . Данному требованию удовлетворяет схема с (n, γ) -активацией ${}^7\text{Li}$, максимально очищенного от изотопа ${}^6\text{Li}$. Образующийся радиоактивный изотоп ${}^8\text{Li}$ при распаде ($T_{1/2} = 0,84$ с) испускает жесткие $\bar{\nu}_e$ с энергией до 13 МэВ.

Возможность использования ${}^7\text{Li}$ в импульсном реакторе для конвертирования нейтронов в антинейтрино рассматривалась в работе /1/, а сама идея создания $\bar{\nu}_e$ -источника за счет распадов ${}^8\text{Li}$ принадлежит Л.А.Микаэлян и П.Ф.Сливаку (см. в /1/, а также в /2/). В работах /3,4/ мы провели серию расчетов для литиевого конвертора, сконструированного в виде бланкета-отражателя, и исследовали зависимость его эффективности от чистоты очистки лития от изотопа ${}^6\text{Li}$. В работе /4/ также анализировалась возможность использования в конверторе тяжеловодных отражателей и замедлителей нейтронов. Показано, что это почти в два раза позволяет увеличить эффективность литиевого конвертора.

Рассмотренные схемы стационарных источников нейтрино, работающих в статическом режиме, обладают общим недостатком: в потоке антинейтрино значительную часть составляют мягкие антинейтрино от активной зоны. Проблему увеличения доли жестких литиевых антинейтрино можно решить созданием установки с динамическим режимом работы, когда жидкий литий прокачивается в замкнутом цикле

через конвертор и далее к детектору, удаленному от конвертора на расстояние L . Для регистрации антинейтрино преимущественно от распадов 8Li вблизи детектора создается резервуар объемом V_p , через который прокачивается литий, активированный в конверторе.

Возможность "вывести облученный радиоактивный литий - источник антинейтрино из реактора в сборник с эффективным расстоянием до детектора порядка 3,5 м" впервые была рассмотрена в работе /1/, где было показано, что для импульсного реактора "движение лития сокращает его количество в 2,5 раза, а количество урана, горячего графита и среднюю мощность - в 2,1 раза. Выигрыш, однако, покупается ценой усложнения конструкции реактора" (/1/, с.457). Действительно, как показано в настоящей работе, конструкция установки должна сильно усложниться, однако, динамическая схема имеет дополнительные преимущества, которые могут компенсировать усложнение установки. А именно: 1) за счет доставки лития к детектору относительная доля жестких литиевых антинейтрино в суммарном $\tilde{\nu}_e$ -спектре увеличивается в несколько раз по отношению к мягким реакторным $\tilde{\nu}_e$. Таким образом снимается известная проблема неопределенности формы реакторного $\tilde{\nu}_e$ -спектра; 2) за счет фактора $E_{\tilde{\nu}}^2$ в сечении доминирование жесткого литиевого $\tilde{\nu}_e$ -спектра приводит к многократному увеличению (более чем на порядок) счета ($\tilde{\nu}_e + p$) и особенно ($\tilde{\nu}_e + d$)-событий в соответствующих реакциях, имеющих порог около 2 МэВ для ($\tilde{\nu}_e p$) и ($\tilde{\nu}_e d$) в нейтральном канале и - 4 МэВ в заряженном канале ($\tilde{\nu}_e d$) реакции; 3) использование динамического режима работы литиевого конвертора позволяет более чем на два порядка повысить чувствительность экспериментов по поиску $\tilde{\nu}_e - \nu_e$ осцилляций на реакторах.

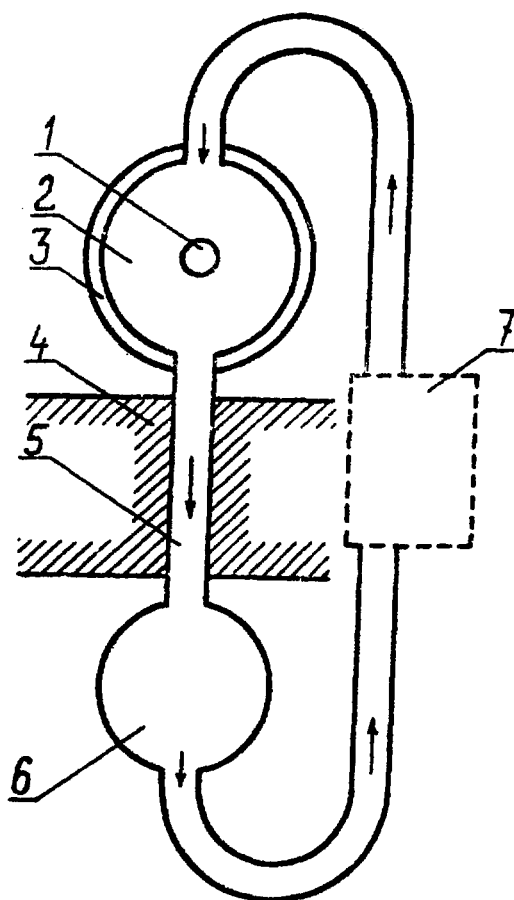


Рис. 1. Схема системы литиевого конвертора реакторных нейтронов в антинейтринно с динамическим режимом работы: 1 - активная зона; 2 - литиевый конвертор; 3 - тяжеловодный отражатель; 4 - защита; 5 - канал доставки лития из 2 в 6; 6 - прокачиваемый резервуар; 7 - установка обеспечения режима прокачки (очистка от трития, обеспечение температурного режима и т.д.).

I. ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ КОНВЕРТОРА

В установке с динамическим режимом работы жидкий литий прокачивается в замкнутом цикле через конвертор и далее к детектору, удаленному от конвертора на расстояние L (см. рис. I). Для регистрации антинейтрино преимущественно от распадов ${}^8\text{Li}$ вблизи детектора создается резервуар объемом V_p , через который прокачивается жидкий литий, активированный в конверторе. За время доставки активированного лития к детектору изотоп ${}^8\text{Li}$ частично распадается. Дифференциальные уравнения для (n, γ) -активации ${}^7\text{Li}$ и последующего β -распада ${}^8\text{Li}$ имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_7}{dt} = -\lambda_{n\gamma} N_7 \\ \frac{dN_8}{dt} = \lambda_{n\gamma} N_7 - \lambda_\beta N_8 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_7}{dt} = -\lambda_{n\gamma} N_7 \\ \frac{dN_8}{dt} = \lambda_{n\gamma} N_7 - \lambda_\beta N_8 \end{array} \right. \quad (2)$$

где N_7 и N_8 - число атомов ${}^7\text{Li}$ и ${}^8\text{Li}$ в момент времени t ; $\lambda_{n\gamma}$ и λ_β - постоянные (n, γ) -активации и β -распада.

Считая, что при $t = 0$ существует N_7^0 ядер стартового изотопа ${}^7\text{Li}$, а $N_8^0 = 0$, решение системы имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_7 = N_7^0 \cdot e^{-\lambda_{n\gamma} t} \\ N_8 = \lambda_{n\gamma} N_7^0 \left(\frac{e^{-\lambda_{n\gamma} t}}{\lambda_\beta - \lambda_{n\gamma}} + \frac{e^{-\lambda_\beta t}}{\lambda_{n\gamma} - \lambda_\beta} \right) \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N_7 = N_7^0 \cdot e^{-\lambda_{n\gamma} t} \\ N_8 = \lambda_{n\gamma} N_7^0 \left(\frac{e^{-\lambda_{n\gamma} t}}{\lambda_\beta - \lambda_{n\gamma}} + \frac{e^{-\lambda_\beta t}}{\lambda_{n\gamma} - \lambda_\beta} \right) \end{array} \right. \quad (4)$$

Величина $\lambda_{n\gamma} N_7^0$ - есть число образуемых в единицу времени атомов ${}^8\text{Li}$, оно непосредственно определялось в расчете /4/ по программе МАМОНТ /5/ (метод Монте-Карло) и является функцией:

1) энергетической зависимости сечения (n, γ)-реакции и
 2) пространственно энергетического распределения нейтронов. В работе /4/ данное число образуемых атомов ${}^8\text{Li}$ (нормированное на число нейтронов, выходящих из активной зоны) фигурирует в виде \mathcal{E} -эффективности литиевого конвертора. Так, для сферически-симметричной слоистой геометрии с радиусом активной зоны 23 см (что соответствует объему 51 л аналогично реактору ПИК), толщине литиевого blankets (с чистотой по ${}^7\text{Li}$ - 99,99%) 150 см и тяжеловодном (D_2O) слое-отражателя толщиной 25+30 см величина $\mathcal{E} = 7\%$.

Учитывая, что $\lambda_{n\gamma} \ll 1$, выражение (4) упрощается:

$$N_8 = \frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_p} (1 - e^{-\lambda_p t}). \quad (5)$$

Из (5) получаем оценку минимального времени прокатки t_p лития через конвертор, т.е. времени активации ${}^7\text{Li}$. На рис.2 представлено изменение величины $N_8 / (\lambda_{n\gamma} N_7^0)$ в функции от времени активации (одно деление временной оси равно одной секунде); ясно, что требуется $t_p \geq 2$ с (далее в тексте время прокатки фигурирует как "P"). Пунктирная линия - изменение относительного числа атомов ${}^8\text{Li}$, не распавшихся за время доставки t_d к резервуару (здесь одно деление временной оси равно 0,1с); ясно, что быстрый распад ($T_{1/2} = 0,84$ с) диктует высокую линейную скорость прокатки лития.

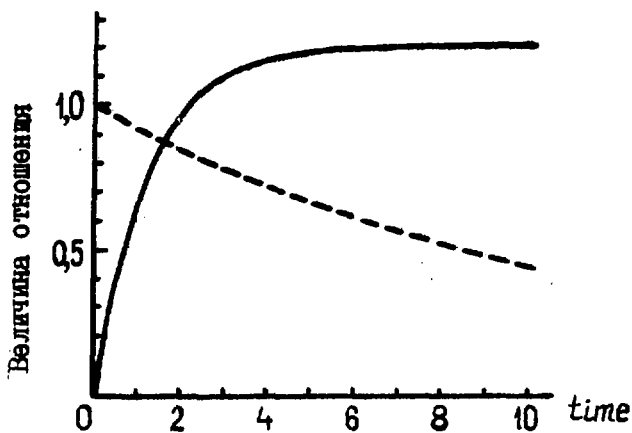


Рис.2

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ЛИТЯВЫХ \bar{V}_e

Получены выражения для потоков литявых \bar{V}_e , выпускаемых во временном интервале $[0, t]$ из конвертора N_K , прокачиваемого резервуара N_P , канала доставки жидкого лития из конвертора в прокачиваемый резервуар (см. схему системы с динамическим режимом на рис. 1) в функции от объемов конвертора - V_K и резервуара - V_P , полного объема лития в системе - V_0 , объема прокачки в единицу времени W , времени доставки лития из конвертора в резервуар t_d .

Число \bar{V}_e , выпускаемых из конвертора за время t , равно:

$$\begin{aligned}
 N_K(t) = B(t) \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \left[\lambda_{n\gamma} N_7^0 \frac{V_K}{W} - \frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_\beta} A \right] + \right. \\
 \frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_\beta} A \left[e^{-\lambda_\beta \frac{V_0 - V_K}{W}} - e^{-\lambda_\beta \frac{V_0}{W}} \right] + \\
 \frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_\beta} A \left[e^{-\lambda_\beta \frac{V_0 - V_K}{W}} - e^{-\lambda_\beta \frac{V_0}{W}} \right] e^{-\lambda_\beta \frac{V_0}{W}} + \\
 \vdots \\
 \left. \frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_\beta} A \left[e^{-\lambda_\beta \frac{V_0 - V_K}{W}} - e^{-\lambda_\beta \frac{V_0}{W}} \right] e^{-(n-2)\lambda_\beta \frac{V_0}{W}} \right\} = \\
 = B(t) \cdot \lambda_{n\gamma} N_7^0 \left[\frac{V_K}{W} - \frac{A(1 - e^{-\lambda_\beta \frac{V_0 - V_K}{W}})}{\lambda_\beta(1 - e^{-\lambda_\beta \frac{V_0}{W}})} \right],
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $A = (1 - e^{-\lambda_\beta \frac{V_0}{W}})$; $B(t) = t / (\frac{V_K}{W})$ - коэффициент пропорциональности между числом \bar{V}_e , выпускаемых за время t и в интервале $\frac{V_K}{W}$ (время прокачки объема конвертора).

Первая квадратная скобка - число \tilde{V}_e , испускаемых из конвертора в интервале $\left[0, \frac{V_k}{W}\right]$ текущего цикла прокачки через весь контур, равно разности между числом атомов ^8Li , образовавшихся за данный интервал и не распавшихся к концу интервала (с учетом выражения (5)). Вторая, ..., n -я строка - число \tilde{V}_e , испускаемых из конвертора при распадах ^8Li , образовавшегося во временных интервалах $\left[-\frac{V_0}{W}, \left(\frac{V_k}{W} - \frac{V_0}{W}\right)\right]$, ..., $\left[-n\frac{V_0}{W}, \left(\frac{V_k}{W} - n\frac{V_0}{W}\right)\right]$, соответственно, т.е. данные строки - вклад в \tilde{V}_e - активность текущего цикла от активации ^7Li в предыдущих циклах.

Число \tilde{V}_e , испускаемых из прокачиваемого резервуара (полагаем, что (n, γ) -активация ^7Li в резервуаре практически не происходит) за время t :

$$\begin{aligned}
 N_p(t) = B(t) \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \left[\frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_\beta} A \left(e^{-\lambda_\beta t_d} - e^{-\lambda_\beta \left(t_d + \frac{V_p}{W} \right)} \right) \right] + \right. \\
 \left. \frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_\beta} A \left[e^{-\lambda_\beta t_d} - e^{-\lambda_\beta \left(t_d + \frac{V_p}{W} \right)} \right] \cdot e^{-\lambda_\beta \frac{V_0}{W}} + \right. \\
 \vdots \\
 \left. \frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_\beta} A \left[e^{-\lambda_\beta t_d} - e^{-\lambda_\beta \left(t_d + \frac{V_p}{W} \right)} \right] \cdot e^{-(n-1)\lambda_\beta \frac{V_0}{W}} \right\} \quad (7) \\
 = B(t) \frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0 \cdot A \left(1 - e^{-\lambda_\beta \frac{V_p}{W}} \right) e^{-\lambda_\beta t_d}}{1 - e^{-\lambda_\beta \frac{V_0}{W}}}
 \end{aligned}$$

где t_d - время доставки лития от конвертора к прокачиваемому резервуару.

Первая квадратная скобка - число \tilde{V}_e , испускаемых из объ-

ема резервуара при распаде ${}^8\text{Li}$, полученного при активации ${}^7\text{Li}$ в интервале $\left[(-t_d - \frac{V_k}{w}), -t_d\right]$ текущего цикла прокачки. Вторая, n -я строка-число \tilde{V}_e , испускаемых из резервуара при распадах ${}^8\text{Li}$, образовавшегося во временных интервалах $\left[(-t_d - \frac{V_k}{w} - \frac{V_0}{w}), (-t_d - \frac{V_0}{w})\right]$, $\left[(-t_d - \frac{V_k}{w} - n \frac{V_0}{w}), (-t_d - n \frac{V_0}{w})\right]$, соответственно, т.е. как в (6) учтены вклады в текущую \tilde{V}_e -активность от (n, γ) -активации ${}^7\text{Li}$ в предыдущих циклах.

Аналогично, для числа \tilde{V}_e , испускаемых из канала доставки лития в прокачиваемый резервуар (без учета вклада от (n, γ) -активации в объеме канала) за время t :

$$\begin{aligned}
 N_c(t) = & B(t) \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \left[\frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_\beta} A (1 - e^{-\lambda_\beta t_d}) \right] + \right. \\
 & \left[\frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_\beta} A (1 - e^{-\lambda_\beta t_d}) \right] \cdot e^{-\lambda_\beta \frac{V_0}{w}} + \\
 & \vdots \\
 & \left. \left[\frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_\beta} A (1 - e^{-\lambda_\beta t_d}) \right] \cdot e^{-(n-1)\lambda_\beta \frac{V_0}{w}} \right\} \\
 = & B(t) \cdot \frac{\lambda_{n\gamma} N_7^0}{\lambda_\beta} \cdot \frac{A(1 - e^{-\lambda_\beta t_d})}{1 - e^{-\lambda_\beta \frac{V_0}{w}}}
 \end{aligned} \tag{8}$$

где первая квадратная скобка, вторая, ..., n -я строка соответствуют временным интервалам $[-\frac{V_k}{w}, 0]$, $[\frac{V_k}{w} - \frac{V_0}{w}, -\frac{V_0}{w}]$, $[-\frac{V_k}{w} - n \frac{V_0}{w}, -n \frac{V_0}{w}]$, соответственно.

Отметим, что выражения для коэффициентов пропорциональности $B(t)$ одинаковые для N_k , N_p и N_c , т.к. выражения для числа испускаемых \tilde{V}_e (записанных при суммировании в виде строк) приведены ко времени прокачки V_k/w .

3. АНАЛИЗ РЕЖИМА РАБОТЫ КОНВЕРТОРА. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Определим соотношения между полным объемом системы V_0 , объемом конвертора V_K и объемом резервуара V_P следующим образом:

$$\begin{cases} V_0 = V_K(1 + \alpha) \\ V_P = V_K \cdot \alpha \cdot k \end{cases}, \quad (9)$$

где α и k - некоторые коэффициенты, $\alpha > 0$, $0 < k < 1$.

При рассмотрении режимов работы конвертора представляет интерес проследить изменение относительного числа литиевых нейтрино, выпускаемых из конвертора, в функции в зависимости от времени прокачки жидкого лития через конвертор $P = V_K / W$ ($[P] = C$) и коэффициента α . Информацию о режимах работы прокачиваемого резервуара и канала доставки лития в резервуар, данные для определения соотношения объемов конвертора, резервуара, канала доставки можно получать из анализа зависимости относительного числа нейтрино, выпускаемых из резервуара, канала доставки в функции от P , α , k , времени доставки t_d лития в резервуар, коэффициента γ (отношение объема канала доставки лития в резервуар к полному объему каналов динамической системы).

На рис. 3 представлено семейство зависимостей относительного числа литиевых \bar{v}_e , выпускаемых из конвертора (т.е. N_K / N_0 , где $N_0 = \lambda_{n\gamma} N_z^0 P$ - число \bar{v}_e , выпускаемых всей системой), НОРМИРОВКИ НА ВРЕМЯ, С УЧЕТОМ АКТИВАЦИИ P ; на данном и следующих рисунках опущены единицы измерения времени прокачки P в функции от α при различных значениях P . Крестами на кривых для $P = const$

отмечены режимы, соответствующие предельно возможным минимальным значениям α для времени $t_d = 0,4$ с (ниже, в табл. I представлен пример с данным временем доставки для $L_1 = 4$ м и $v_1 = 10$ м/с); точками обозначены не реализуемые в динамической схеме режимы с данными значениями P и t_d . Минимальное значение α получаем из геометрических требований: $\alpha_{\min} = (w \cdot t_d) / V_k = t_d / P$. При больших временах прокатки P кривые быстро выходят на асимптотику и дальнейшее увеличение α (объемы резервуара и каналов) с целью разделения жесткой литиевой составляющей в нейтринном спектре от мягкой компоненты из активной зоны является неоправданным. Поэтому необходимы режимы с максимально возможной скоростью прокатки.

На рис. 4 и 5 представлены семейства зависимостей относительного числа литиевых \tilde{N}_e , испускаемых из прокачиваемого резервуара (т.е. $N_p / N_0 = N_p / (\lambda_{\text{eff}} N)$) в функции от k для режимов с различными значениями P ($P = 4+8$ с, данный интервал выбран с учетом рассмотренной в /4/ модели конвертора с объемом $22,01$ м³) и двумя значениями α (интервал изменения полного объема системы V_0 представлен значениями $\alpha : 0,6$ и $1,2$). Рис. 4 соответствует времени доставки лития в резервуар $t_d = 0,4$ с, рис. 5 - временам $t_d = 0,7$ с и $7/18$ с (см. пример в табл. I для: $L_2 = 7$ м, $v_1 = 10$ м/с; $L_2 = 7$ м, $v_2 = 18$ м/с). Крестами на кривых для $P = \text{const}$, $\alpha = \text{const}$ отмечены режимы, соответствующие предельно возможным максимальным значениям k ; точками обозначены не реализуемые в динамической системе режимы с данными значениями P , α и t_d . Максимальное значение k получаем из геометрических требований (с учетом (9)): $w \cdot t_d + V_k \cdot \alpha \cdot k_{\max} = V_k \cdot \alpha$, откуда $k_{\max} = 1 - t_d / (P \alpha)$. Из графиков видно, что при больших временах прокатки P до-

ля литиевых нейтрино, испускаемых из резервуара, быстро приближается к пределу с ростом k (т.е. с относительным ростом объема V_p). С другой стороны, при росте скорости прокачки (т.е. малых P) увеличение объема резервуара дает значительное возрастание доли нейтрино, испускаемых из резервуара.

Целесообразно рассмотреть ситуацию, когда задано отношение γ объема канала доставки лития в прокачиваемый резервуар к полному объему каналов в системе, а объем резервуара может меняться. Данная ситуация возможна, например, когда для уже существующей динамической системы встает вопрос об увеличении объема резервуара. Полный объем каналов равен $V_k \cdot d - V_k \cdot d \cdot k = V_k d (1-k)$, а объем канала доставки лития в резервуар есть $\gamma V_k d (1-k)$; тогда время доставки лития в резервуар равно $\frac{\gamma V_k d (1-k)}{W} = \gamma P d (1-k)$, что позволяет рассмотреть зависимость относительного числа литиевых \bar{V}_e , испускаемых из резервуара, в функции от k при заданных значениях γ . На рис. 6 представлено семейство таких зависимостей для $P = 4+8$ с при двух значениях d : 0,6 и 1,2; кривые построены для $\gamma = 1/6$; 1/4 (первое значение иллюстрирует примеры табл. I для $L_1 = 4$ м (см. рис. I), второе - примерно соответствует $L_2 = 7$ м).

Большие скорости прокачки лития в динамической системе при ограничении на линейную скорость транспорта приводят к большому сечению каналов ($R \approx 20+30$ см). Из канала доставки лития в резервуар будет выходить значительная часть жестких литиевых \bar{V}_e . На рис. 7 представлено семейство зависимостей относительного числа литиевых \bar{V}_e , испускаемых из канала доставки (т.е. $N_c/N_0 = N_c / (\lambda_{nj} N_j^0 P)$), в функции от d для режимов с $P = 1+8$ с. Крестами и точками представлены режимы, соответствующие d_{min} и не реализуемые режимы, соответственно. Падение значения функ-

ции с ростом объема резервуара и каналов существенно лишь при очень большой скорости прокачки ($P = 1$ с) или при малых объемах конвертора. Для модели, рассмотренной в /4/ (см. также табл. I), значение функции практически постоянно.

Задача о числе \bar{V}_e , выпускаемых из канала доставки, может быть рассмотрена и при заданном отношении γ , т.е. для условий, описанных выше. На рис. 8 представлены семейства зависимостей числа литиевых \bar{V}_e , выпускаемых из канала доставки, в функции от k (т.е. от объема резервуара) для $\gamma = 1/6; 1/4$.

Замечание о канале доставки: с точки зрения радиационной обстановки, по-видимому, целесообразно делать изгиб канала при его выходе из конвертора, что исключило бы попадание нейтронов прямого пролета в канал и снизило требования к радиационной защите канала. (Вопросы теплообмена, гидравлического сопротивления изложены, например, в работе /6/).

Рассмотрим примеры динамической системы. Примем: транспортные скорости прокачки лития в каналах $U_1 = 10$ м/с, $U_2 = 18$ м/с; скорости прокачки $W_1 = 3$ м³/с, $W_2 = 5$ м³/с; удаление детектора от конвертора $L_1 = 4$ м, $L_2 = 7$ м (см. рис. I - пример для U_1, W_1, L_1). В табл. I представлены (см. сейчас данные не в круглых скобках) относительные распределения \bar{V}_e между конвертором, прокачиваемым резервуаром и каналом доставки к резервуару для указанных объемов системы V_0 при условии, что $V_K = 22,01$ м³ (геометрия с толщиной литиевого конвертора 150 см и внешним слоем D_2O в качестве отражателя /4/), $V_P = \frac{1}{3} V_K$. Данные в скобках для W_1, W_2 и V_0 будут обсуждаться ниже. Оценить значения N_K, N_P, N_C для рассматриваемых примеров можно и из графиков 3+8. Для указанных выше V_K, V_P и $W =$

Таблица I

Относительное число \bar{V}_e (в %), испускаемых из конвертора (N_K), прокачиваемого резервуара (N_P) и канала доставки лития в резервуар (N_C) для полных объемов система V_0 (m^3)

$W_{1,2}$	$U_{1,2}$	10 м/с		18 м/с	
		L_1	L_2	L_1	L_2
3 м ³ /с (2,08 м ³ /с)		$V_0 = 36,67$ ($V_0 = 25,34$)	$V_0 = 38,47$ ($V_0 = 26,64$)	$V_0 = 36,67$ ($V_0 = 25,34$)	$V_0 = 38,47$ ($V_0 = 26,64$)
		$N_K = 83,8$	$N_K = 83,7$	$N_K = 83,8$	$N_K = 83,7$
		$N_P = 10,3$	$N_P = 8,0$	$N_P = 11,9$	$N_P = 10,4$
		$N_C = 4,6$	$N_C = 7,2$	$N_C = 2,8$	$N_C = 4,5$
5 м ³ /с (3,46 м ³ /с)		$V_0 = 41,56$ ($V_0 = 28,78$)	$V_0 = 44,56$ ($V_0 = 30,86$)	$V_0 = 41,56$ ($V_0 = 28,78$)	$V_0 = 44,56$ ($V_0 = 30,86$)
		$N_K = 74,2$	$N_K = 73,8$	$N_K = 74,2$	$N_K = 73,8$
		$N_P = 13,5$	$N_P = 10,6$	$N_P = 15,7$	$N_P = 13,7$
		$N_C = 7,5$	$N_C = 11,8$	$N_C = 4,5$	$N_C = 7,4$

$= 3 \text{ м}^3/\text{с}$, $L_1 = 4 \text{ м}$, $U_1 = 10 \text{ м/с}$, $V_0 = 36,67 \text{ м}^3$ (см. левый верхний столбец в табл. I) имеем (с учетом (9)): $P \approx 7,33 \text{ с}$, $\alpha \approx 0,66$; $k \approx 0,50$; $t_d \approx 0,4 \text{ с}$; $\gamma \approx 1/6$. Из рис. 3 при $P = 7 \text{ с}$, $\alpha = 0,66$ получаем $N_K \approx 0,832$, что близко к $N_K = 0,838$ в табл. I. Из рис. 4 при $P = 7 \text{ с}$, $\alpha = 0,6$, $k = 0,5$ имеем $N_P = 0,102$ (в табл. I $N_P = 0,103$); близкое значение получаем при $\gamma = 1/6$ и из рис. 6 - $N_P = 0,106$. На рис. 7 при $P = 7 \text{ с}$, $\alpha = 0,66$ имеем $N_C = 0,049$ (в табл. I $N_C = 0,046$);

а из рис. 8 при $P = 7$ с; $\alpha = 0,6$; $\gamma = 1/6$ получаем $N_c = 0,0435$. Рассмотрим случай с $L_2 = 7$ м, $V_0 = 38,47$ м³ при тех же V_K , V_P , W , γ_1 ; здесь $P = 7,33$ с, $\alpha \approx 0,75$, $k \approx 0,45$; $\gamma = 1/4$. Из рис. 5 при $P = 7$ с, $\alpha = 0,6$; $t_d = 0,7$ с имеем $N_p = 0,076$ (в табл. I $N_p = 0,08$), на рис. 7 ближайшая по параметру P кривая для $t_d = 0,7$ с дана при $P = 8$ с, что дает $N_c = 0,066$ при табличном значении $N_c = 0,072$.

Таким образом, в рассмотренном параметрическом представлении по параметрам P , α , k , t_d , γ можно оценить эволюцию нейтринной активности для конвертора, прокачиваемого резервуара и канала доставки.

С учетом жестких требований к чистоте изотопного состава лития по изотопу ${}^7\text{Li}$ общий объем лития может быть сокращен (при сохранении заданного соотношения между числом литиевых \bar{V}_e , испускаемых из конвертора, резервуара и канала доставки) в "м" раз путем уменьшения в "п" раз: скорости прокачки W , объема конвертора, объема резервуара, сечения каналов в системе (т.е. времена прокачки и доставки остаются неизменными). Ясно, что такое сокращение V_0 при сохранении подобия в потоках N_K , N_P и N_C достигается ценой снижения эффективности \mathcal{Z} литиевого конвертора, однако, это снижение меньше масштабного фактора. Так, переход в сферической геометрии с внешним слоем отражателя (геометрия А в терминологии работы /4/) и толщиной конвертора 150 см к толщине 130 см, что соответствует $V_K = 15,24$ м³, дает $\mathcal{M} \approx 1,44$ при падении \mathcal{Z} от 7,0 до 5,67%. В табл. I в скобках даны величины W_1 , W_2 и V_0 , соответствующие данному переходу с сохранением подобия.

Из табл. I видно, что число N_p - основной параметр в схеме регистрации \tilde{V}_e в динамическом режиме, меняется не принципиально в зависимости от режимов прокатки лития. Основную роль в формировании жесткого нейтринного спектра начинает играть геометрический фактор G , в основном - удаление от активной зоны детектирующей системы, конструкционно объединенной с резервуаром, через который прокачивается жидкий литий. За счет этого фактора относительная доля \tilde{V}_e -излучения от активной зоны может быть уменьшена во много раз, а доля литиевых нейтрино - во много раз увеличена.

В общем случае, вероятность G^D попадания в детектор \tilde{V}_e , испущенного из объема V , в интервале времени $[t_1, t_2]$ определяется с учетом динамики:

$$G^D = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \int_V S(\vec{r}, t) \cdot G(\vec{r}) dV dt}{\int_{t_1}^{t_2} \int_V S(\vec{r}, t) dV dt}, \quad (10)$$

где $S(\vec{r}, t)$ - плотность источников литиевых \tilde{V}_e .

Например, для канала доставки в резервуар, полагая поток лития ламинарным, имеем $S(\vec{r}, t) = S(t)$. Далее, при прокачке объема V_K количество литиевых нейтрино \tilde{N}_c , испускаемых из участка АВ (на длине канала доставки), соответствующего временному интервалу $[t_A, t_B]$ (где $t_A \geq 0$, $t_B = (t_A + \Delta t) < t_d$) прохождения участка АВ с линейной скоростью транспорта лития, определяется аналогичным (8) суммированием:

$$\tilde{N}_c = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \left[\frac{\lambda n \sigma N_T^0}{\lambda_p} \cdot A (1 - e^{-\lambda_p \Delta t}) \cdot e^{-\lambda_p t_A} \right] + \right. \\ \left. \left[\frac{\lambda n \sigma N_T^0}{\lambda_p} \cdot A (1 - e^{-\lambda_p \Delta t}) \cdot e^{-\lambda_p t_A} \right] \cdot e^{-\lambda_p \frac{V_0}{W}} + \right. \\ \left. \vdots \right. \quad (11)$$

$$\frac{\left[\frac{\lambda_{ny} N_T^0}{\lambda_p} A (1 - e^{-\lambda_p t}) \cdot e^{-\lambda_p t_A} \right] \cdot e^{-(\lambda_p - \lambda_{ny}) \frac{V}{W}}}{= \frac{\lambda_{ny} N_T^0 \cdot A (1 - e^{-\lambda_p t}) e^{-\lambda_p t_A}}{\lambda_p (1 - e^{-\lambda_p \frac{V}{W}})}$$

Отметим, что опущен здесь коэффициент $B = 1$, т.к. временной интервал равен (V_K / W) . Тогда, с учетом нормировки на объем V_K в точке $t_A = t$, имеем:

$$S(t) = \frac{1}{V_K} \left[-\frac{d\tilde{N}_c}{dt} \right] = \lambda_{ny} N_T^0 \frac{A \cdot e^{-\lambda_p t}}{1 - e^{-\lambda_p \frac{V}{W}}} \quad (12)$$

И далее расчет G^D для канала доставки связан с учетом геометрии канала и детектора.

С учетом геометрического фактора $\sim R^{-2}$ в динамическом режиме реально может быть зарегистрировано жестких литиевых нейтрино примерно на порядок больше, чем в статическом. Действительно, если взять, например, что в резервуаре, расположенном вблизи детектора и на расстоянии R от АЗ, распадается всего 10% от образовавшихся в конверторе ядер ${}^8\text{Li}$ ($\bar{N}_p = 0,1$, см, табл. I), а блоки детектора расположены на расстоянии z от резервуара, то отношение плотностей потоков жестких литиевых \tilde{V}_e от резервуара к мягким \tilde{V}_e от активной зоны будет

$$x = \bar{N}_p \left(\frac{R}{z} \right)^2, \quad (13)$$

что уже при $R = 10$ м и $z = 0,5$ м дает усиление отношения в 40 раз. С учетом телесных углов Ω_p и Ω_{AZ} регистрации детектором \tilde{V}_e от резервуара и АЗ, соответственно, отношение потоков возрастает в Ω_p / Ω_{AZ} раз.

Дополнительный большой выигрыш в \tilde{V}_e -регистрации динна-

$\bar{\nu}_e$ -спектра
 мический режим дает за счет большей жесткости $\bar{\nu}_e$ -спектра благодаря зависимости $\sigma \sim E_{\bar{\nu}_e}^2$, т.к. доля литиевых $\bar{\nu}_e$ в этом случае резко увеличивается. Так, сечение $(\bar{\nu}_e + p)$ реакции с ${}^8\text{Li}$ $\bar{\nu}_e$ -спектром будет в 28-34 раза больше, чем ${}^{235}\text{U}$ $\bar{\nu}_e$ -спектром (взяты расчеты Фогеля /7/), а сечение $(\bar{\nu}_e + d)$ реакции соответственно больше в 30-40 раз в нейтральном и в ~ 80 раз в заряженном канале. В динамическом режиме более чем на порядок возрастает и общий счет антинейтрино в $(\bar{\nu}_e + p)$ реакции и $(\bar{\nu}_e + d)$ реакции (нормировка - с, 13 $\bar{\nu}_e$ /деление).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена принципиальному обсуждению вопроса создания работающего в динамическом режиме нейтринного конвертора с жестким спектром при конверсии нейтронов в антинейтрино на базе реакции ${}^7\text{Li}(n, \gamma){}^8\text{Li}$ и последующего β -распада ${}^8\text{Li}$ ($T_{1/2} = 0,84$ с) с испусканием $\bar{\nu}_e$ с энергией до ~ 13 МэВ. В динамическом режиме с замкнутым циклом при прокачке жидкого лития (с высокой чистотой по ${}^7\text{Li}$) от конвертора (конструкционно объединенного с активной зоной) к удаленному прокачиваемому резервуару (расположенному вблизи нейтринного детектора) сильно возрастает жесткость регистрируемого детектором $\bar{\nu}_e$ -спектра за счет удаления от активной зоны (являющейся источником $\bar{\nu}_e$ с мягким спектром, образующихся при β -распаде ядер-продуктов деления).

Получены не зависящие от геометрии конвертора и резервуара выражения для потоков литиевых $\bar{\nu}_e$, испускаемых за время t из конвертора, прокачиваемого резервуара, канала доставки лития

зависимости

из конвертора в резервуар, в функции от объемов конвертора, резервуара, полного объема лития в системе, объема прокачки в единицу времени, времени доставки лития из конвертора в резервуар. Рассмотрено изменение относительного числа нейтрино, испускаемых из конвертора, резервуара, канала доставки, в зависимости от соотношения их объемов. Такое параметрическое задание характеристик динамической системы позволяет проанализировать и выбрать режим работы и вариант реализации системы, исходя из требуемого распределения нейтринных потоков от конвертора, прокачиваемого резервуара и канала доставки.

Показано, что относительное число $\tilde{\nu}_e$, испускаемых из резервуара (основной параметр динамической системы), меняется не принципиально при варьировании скоростей прокачки в интервале $2+5 \text{ м}^3/\text{с}$. Основную роль в формировании жесткого нейтринного спектра начинает играть геометрический фактор, в основном - удаление конструкционно объединенных резервуара и нейтринного детектора от активной зоны.

Основным преимуществом работы в динамическом режиме является существенное увеличение счета $(\tilde{\nu}_e+p)$ -событий (более чем на порядок) и $(\tilde{\nu}_e+d)$ -событий по сравнению со статическим режимом работы конвертора. Снимаются также проблемы формы $\tilde{\nu}_e$ -спектра, так как имеющаяся неопределенность в жесткой области реакторного $\tilde{\nu}_e$ -спектра в данном случае не существенна на фоне доминирующего хорошо определенного $\tilde{\nu}_e$ -спектра ${}^8\text{Li}$. Большие преимущества по сравнению с известным методом, использующим $\tilde{\nu}_e$ от реактора /8/, динамический режим дает и для изучения $\tilde{\nu}_e-\nu_e$ осцилляций. Особенно перспективным было бы определение $\tilde{\nu}_e-\nu_e$ осцилляций Ga-Ge методом, где за счет

резонансной структуры силовой функции $S_p(\Omega/\omega)$ чувствительность метода в динамическом режиме должна повыситься более, чем на два порядка.

Авторы благодарят Ю.Г.Абова, А.А.Борового, Л.А.Микаэляна, Ю.В.Петрова, Л.П.Феоктистова, С.Х.Хакимова, Н.Б.Шульгину за полезные дискуссии и интерес к работе, а также Д.М.Владиминова за помощь в расчетах сечений.

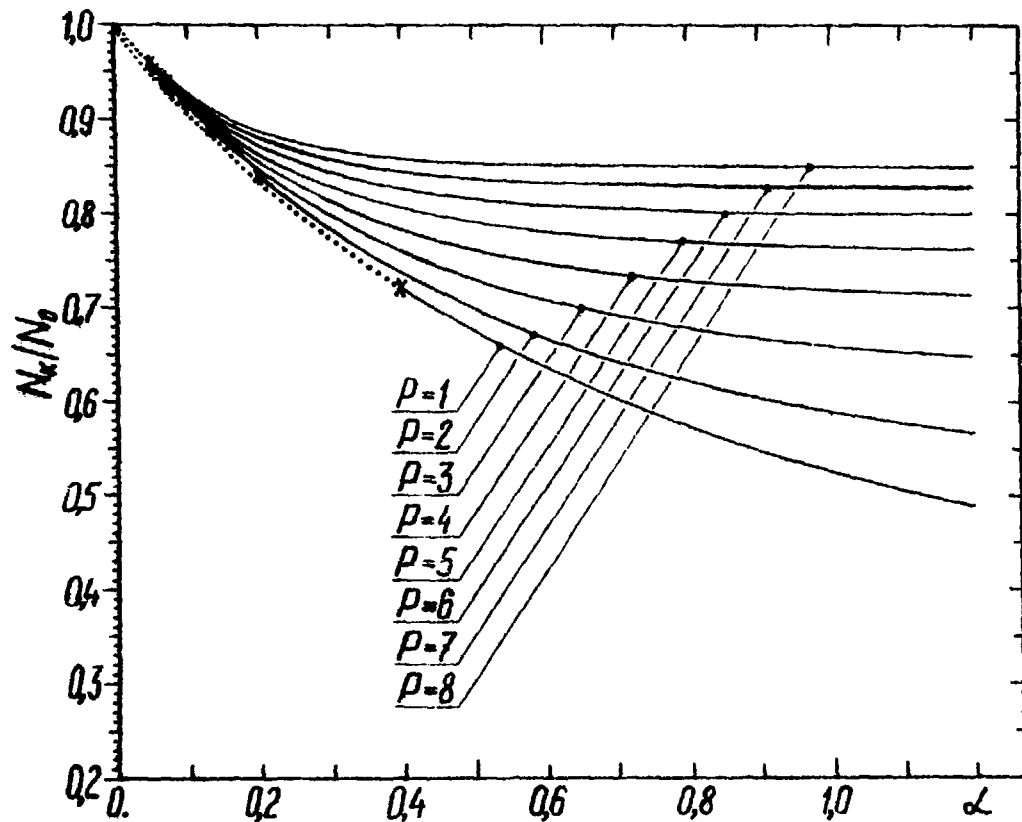


Рис. 3. Относительное число литевых \tilde{V}_e , выпускаемых из конвертора (N_k/N_0 , где N_0 - число \tilde{V}_e , выпускаемых всей системой), в функции от α при различных временах прокачки объема конвертора P ($[P]=c$). Параметр α определяется соотношением $V_0 = V_k(1+\alpha)$, где V_0 - полный объем системы, V_k - объем конвертора.

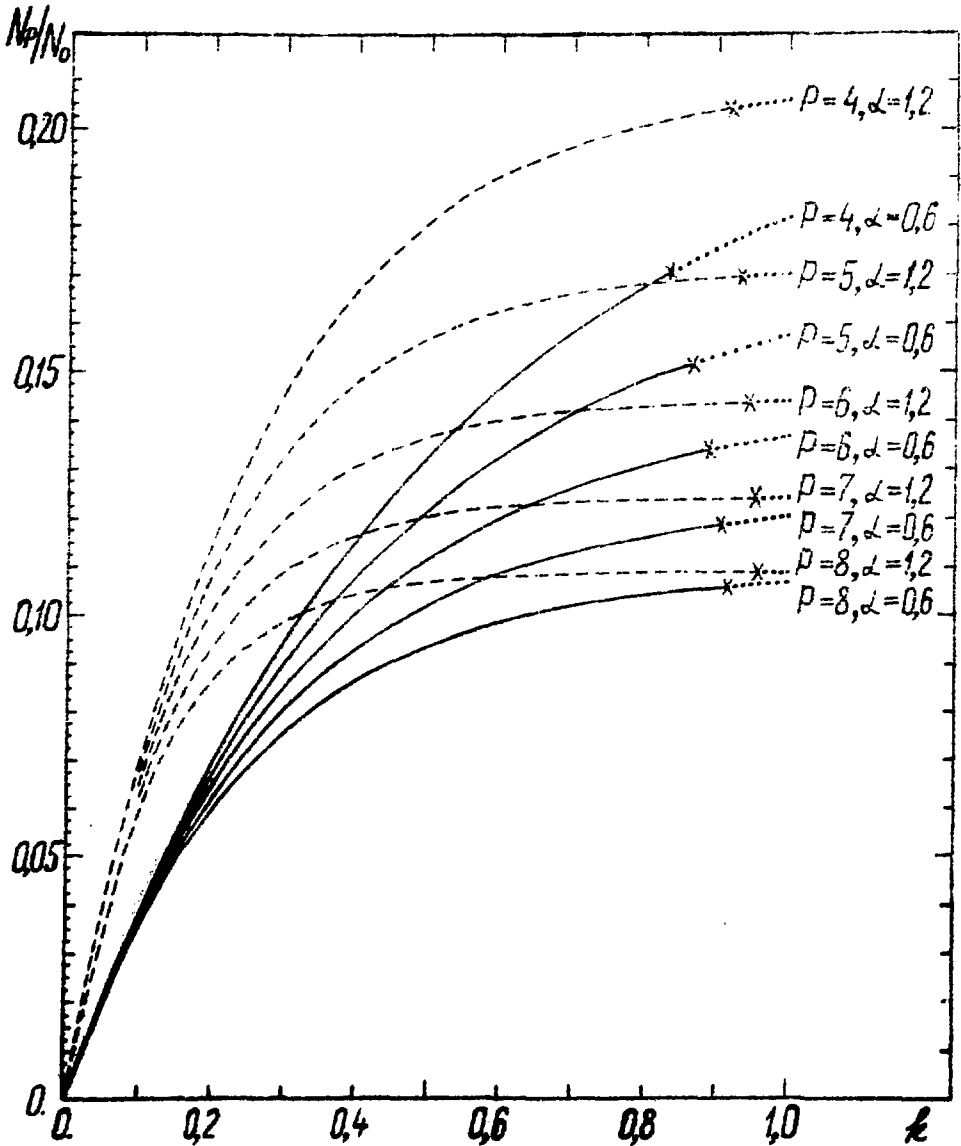


Рис. 4. Относительное число литиевых \bar{V}_e , выпускаемых из прокачиваемого резервуара (N_p/N_0), в функции от k при различных временах прокачки объема конвертора P ($[P]_c$) и параметра α (все графики построены для времени доставки лития из конвертора в резервуар $t_d = 0,4$ с). Параметры α и k определяются соотношениями $\begin{cases} V_0 = V_k(t + \alpha) \\ V_p = V_k \alpha k \end{cases}$, где V_0 - полный объем системы; V_k - объем конвертора; V_p - объем резервуара, $0 < k < 1$.

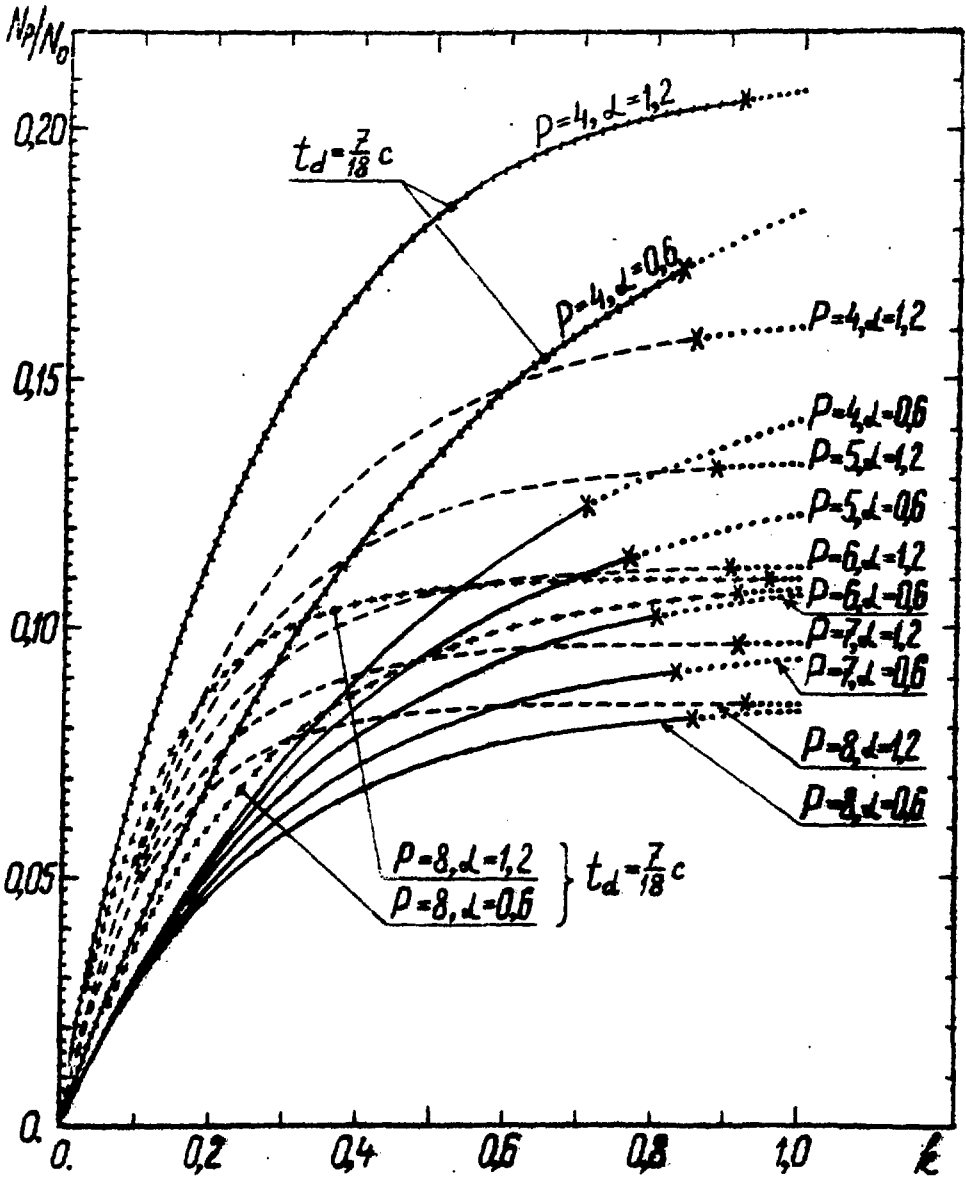


Рис. 5. Относительное число литевых \bar{V}_e , испускаемых из прокачиваемого резервуара (N_p/N_0), в функции от k при: различных временах прокачки объеме конвертора P ($[P]=c$), параметрах α , временах доставки лития из конвертора в резервуар $t_d = 7/18$ с и 0,7 (на рисунке отмечены графики с $t_d = 7/18$ с) Параметры α и k определяются соотношениями $\left\{ \begin{matrix} V_0 = V_K(1+\alpha) \\ V_p = V_K \alpha k \end{matrix} \right.$, где V_0 - полный объем системы; V_K - объем конвертора; V_p - объем резервуара, $0 < k < 1$.

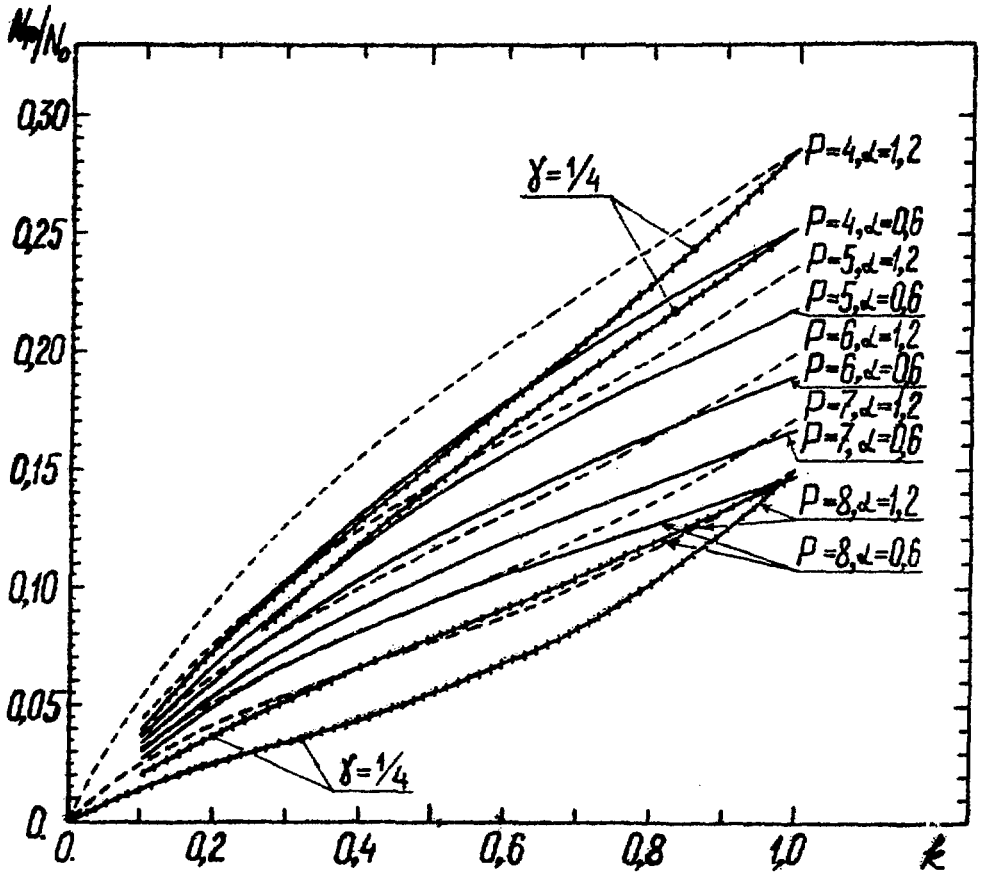


Рис. 6. Относительное число литевых \bar{V}_e , выпускаемых из прокачиваемого резервуара (N_p/N_0), в функции от k при: различных временах прокачки объема конвертора P ($[P]=c$), параметрах α и $\gamma = 1/4, 1/6$ ($\gamma = (\text{объем канала доставки лития в резервуар}) / (\text{полный объем каналов в системе})$); на рисунке отмечены графики с $\gamma = 1/4$. Параметры α и k определяются соотношениями $\begin{cases} V_0 = V_k(1+\alpha) \\ V_p = V_k \alpha k \end{cases}$, где V_0 - полный объем системы, V_k - объем конвертора, V_p - объем резервуара, $0 < k < 1$.

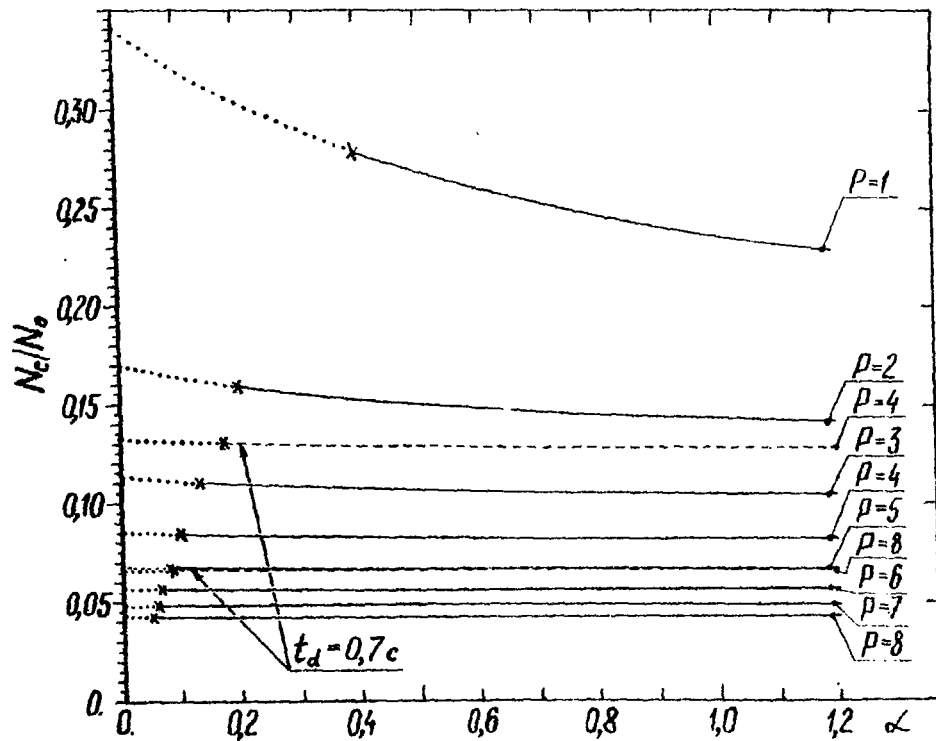


Рис. 7. Относительное число литевых $\tilde{V}_e - N_c/N_0$, выпускаемых из канала доставки лития в прокачиваемый резервуар, в функции от α при различных временах прокачки объема конвертора P ($P=c$) и временах доставки лития из конвертора в резервуар $t_d = 0,4; 0,7$ с (на рисунке отмечены графики с $t_d = 0,7$ с). Параметр α определяется соотношением $V_0 = V_K(1+\alpha)$, где V_0 - полный объем системы, V_K - объем конвертора.

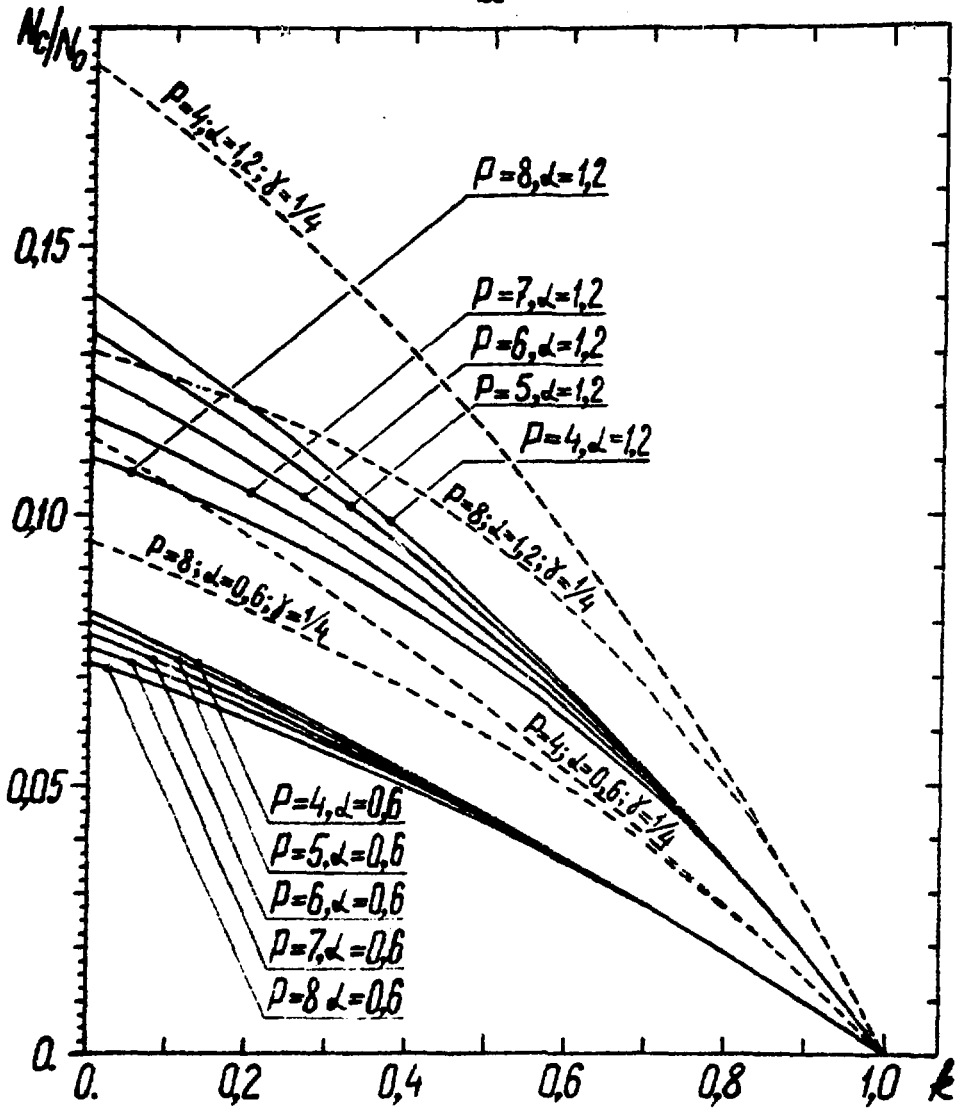


Рис. 8. Относительное число литиевых \bar{V}_c , испускаемых из канала доставки лития в прокачиваемый резервуар (N_c/N_0), в функции от k при: различных временах прокачки объема конвертора P ($[P]=c$), параметрах d и $\gamma = 1/4, 1/6$ ($\gamma = (\text{объем канала доставки лития в резервуар}) / (\text{полный объем каналов в системе})$); на рисунке отмечены графики с $\gamma = 1/4$. Параметры d и k определяются соотношениями $\begin{cases} V_0 = V_k(1+d) \\ V_p = V_k d k \end{cases}$, где V_0 - полный объем системы, V_k - объем конвертора, V_p - резервуара, $0 < k < 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фейнберг С.М., Шевелев Я.В. Возможности импульсного реактора для исследования нейтрино. I. Труды III Международной конференции по использованию атомной энергии в мирных целях. Нью-Йорк: ООН, 1965, т.7: Исследовательские и испытательные реакторы, с.455-457.
2. Микаэлян Л.А., Спивак П.Е., Циноев В.Г. Предложения экспериментов по исследованию физики антинейтрино малых энергий. // ЯФ, 1965, т.1, вып.5, с.853-855.
3. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. О возможности использования конвертора нейтронов в нейтринных экспериментах. Материалы I Международной конференции по нейтронной физике. Киев, 14-18 сентября 1987 г., М.:ЦНИИатоминформ, 1988, т.4, с.182-186.
4. Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Литиевый конвертор реакторных нейтронов в антинейтрино. I. Статический режим работы. М., Препринт ИТЭФ, 1989, № 66.
5. Ачкасов С.К., Лухминский Б.Е., Лютостанский Ю.С. и др. Расчеты функционалов нейтронных полей методом Монте-Карло (программа МАМОНТ). М., Препринт ИТЭФ, 1986, № 6.
6. Боршанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Фёдоровский О.С. Жидкометаллические теплоносители, Изд. 2-е. М.: Атомиздат, 1967.
7. Vogel P., Schenter G.K., Mann F.M. et al. Reactor antineutrino spectra and their application to antineutrino-induced reaction. II. //Phys.Rev., 1981, v.24C, pp.1543-1553.
8. Барабанов И.Р., Боровой А.А., Гаврин В.Н. и др. Предложения эксперимента по исследованию различия ν_e и $\bar{\nu}_e$. Препринт ИЯИ П-0466. М., 1986.
9. Боровой А.А., Лютостанский Ю.С., Панов И.В. и др. Силовая функция германия-71 и проблема ν_e - $\bar{\nu}_e$ осцилляций. //Письма в ЖЭТФ, 1987, т.45, вып.11, с.511-523.

В.С.Игостанский, В.М.Милух

**Литиевый конвертор реакторных нейтронов в антинейтринно.
П. Динамический режим работы.**

Редактор Н.В.Леснова

Корректор О.В.Олександровичева

Работа поступила в ОПТИ 5.04.89

Подписано к печати 12.04.89 Т10057 Формат 60x90 1/16
Офсетн.печ. Усл.-печ.л.1,75. Уч.-изд.л.1,3, Тираж 260 экз.
Заказ 82 Издано 3649 Цена 19 коп.

Отпечатано в ИТЭ, И17259, Москва, Б.Черемушкинская, 25

19 ксч.

ИНДЕКС 3624

М., Препринт ИТЭФ, 1989, № 82, с. I-28