

Р и с. 2. Зависимость сечения рассеяния в парах воды (а) и бензола (б) от степени их неидеальности

причем

$$K_{ij}^{\sigma} = \sigma_s(\lambda, T, P_i) / \sigma_s(\lambda, T, P_j); \quad (3)$$

$$K_{ij}^C = C(T, P_i) / C(T, P_j),$$

а величины $C(T, P)$ определяются соотношением (2). Результаты для паров воды и бензола представлены на рис. 2. Погрешности K_{ij}^C (~3%) не указаны. Эти результаты можно аппроксимировать линейными зависимостями

$$K_{ij}^{\sigma} = (-0,2 \pm 0,1) + (1,2 \pm 0,1) K_{ij}^C(\text{H}_2\text{O}); \quad (4)$$

$$K_{ij}^{\sigma} = (0,09 \pm 0,08) + (0,90 \pm 0,08) K_{ij}^C(\text{C}_6\text{H}_6).$$

Сравнение соотношений (1) и (4) показывает, что экспериментальные результаты настоящей работы близ-

ки к выводам теории [1] о росте сечения рассеяния нейтронов в газе со степенью его неидеальности.

Поступило в Редакцию 12/IV 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fulinski A., Zgierski M. «Acta Phys. Polon», 1968, v. 34, N 5, p. 867.
2. Fulinski A. Ibid., 1964, v. 26, N 1, p. 19.
3. Fulinski A., Zgierski M. [1], N 1, p. 119.
4. Житарев В. Е., Степанов С. Б. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 1, с. 53.
5. Степанов С. Б. и др. В кн.: Труды конф. «Нейтронная физика». Т. 4. Обнинск, изд. ОНТИ ФЭИ, 1974, с. 257.

УДК 539.172.1

Абсолютный выход и спектр нейтронов из реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$

КОНОНОВ В. Н., ПОЛЕТАЕВ Е. Д., ЮРЛОВ Б. Д.

Реакция ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ широко используется в ядерно-физических исследованиях в качестве источника моноэнергетических нейтронов [1]. В последние годы

эта реакция также часто применяется в экспериментах на импульсных электростатических ускорителях для получения непрерывного спектра нейтронов в области

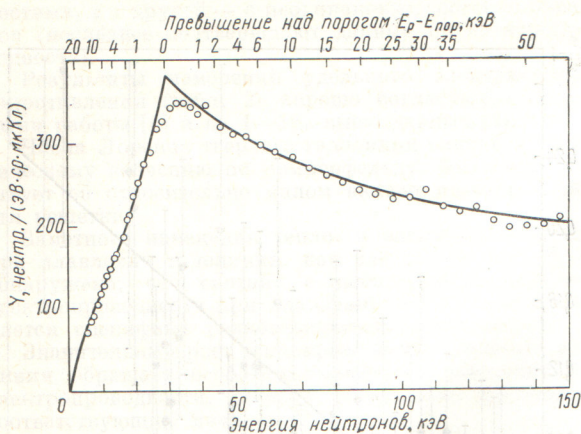


Рис. 1. Экспериментальный (O) и расчетный (—) дифференциальный выход нейтронов из реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^6\text{Be}$ вблизи порога

от нескольких единиц до нескольких сот килоэлектрон-вольт. Реакция ${}^7\text{Li}(p, n){}^6\text{Be}$ может оказаться эффективным источником нейтронов для целей нейтронозахватной радиотерапии [2]. Достоинством этой реакции как источника нейтронов для радиотерапии и радиобиологических исследований является возможность получения нейтронов в килоэлектронвольтовой области (оптимальная для некоторых видов нейтронозахватной терапии), низкий уровень сопутствующего γ -излучения и возможность использования естественной коллимации пучка нейтронов вблизи порога реакции.

Хотя в настоящее время характеристики реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^6\text{Be}$ исследованы достаточно хорошо [1, 3], данные по абсолютному выходу и спектру нейтронов, особенно в области порога реакции, практически отсутствуют. Для оценочных расчетов в ядерно-физических исследованиях и в прикладных задачах часто возникает необходимость в таких данных.

Из рассмотрения кинематики реакции на основании законов сохранения энергии и импульса, а также имеющихся экспериментальных данных по основным характеристикам реакции в ${}^7\text{Li}(p, n){}^6\text{Be}$ вблизи порога может быть получено следующее выражение для дифференциального выхода нейтронов из этой реакции [4]:

$$Y = 3 \cdot 10^3 \sqrt[3]{E_p - 1881} \left(1 + 6 \sqrt{\frac{E_p - 1881}{E_p}} \right)^{-2} \times$$

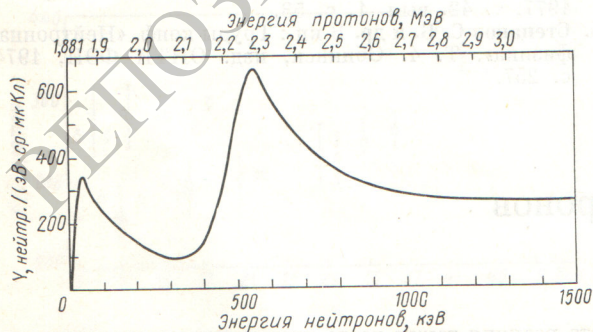


Рис. 2. Дифференциальный выход нейтронов из реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^6\text{Be}$ в широкой области энергий протонов

$$\times \frac{\alpha(z \pm \cos \psi)}{[z \cos \psi \pm (49 - \sin^2 \psi)]}, \text{ нейтр./}(\text{эВ} \cdot \text{ср} \cdot \text{мКл}), \quad (1)$$

где E_p — энергия протонов, кэВ; ψ — угол вылета нейтронов в лабораторной системе; z и α — безразмерные параметры, $z = \alpha^{-2} - \sin^2 \psi$, $\alpha = M_p M_n E_p \times [M_{\text{Be}} M_{\text{Li}} (E_p - 1881)]^{-1}$, в которые входит также масса частиц, участвующих в реакции. Энергия нейтронов в лабораторной системе в этих обозначениях определяется известным соотношением [1]:

$$E_n = M_p M_n (M_{\text{Be}} + M_n)^{-2} E_p (z \pm \cos \psi)^2.$$

При значении $\alpha < 1$ энергия нейтронов в лабораторной системе имеет однозначную связь с энергией протонов и необходимо использовать только знак «плюс». Абсолютная величина выхода нейтронов соответствует мишени из металлического лития.

Область применения формулы (4) ограничена энергией протонов $E_p \leq 2$ МэВ, до которой угловое распределение нейтронов в системе центра масс является изотропным. При большей энергии протонов дифференциальный выход нейтронов может быть получен из соотношения

$$Y = \frac{d\sigma}{d\Omega} \left(\frac{dE_p}{dx} \frac{dE_n}{dE_p} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Экспериментальные данные по дифференциальному сечению реакции $d\sigma/d\Omega$ представлены в работе [3], а величина dE_n/dE_p и атомное сечение торможения протонов dE_p/dx в материале мишени могут быть рассчитаны по соотношениям, приведенным в [1].

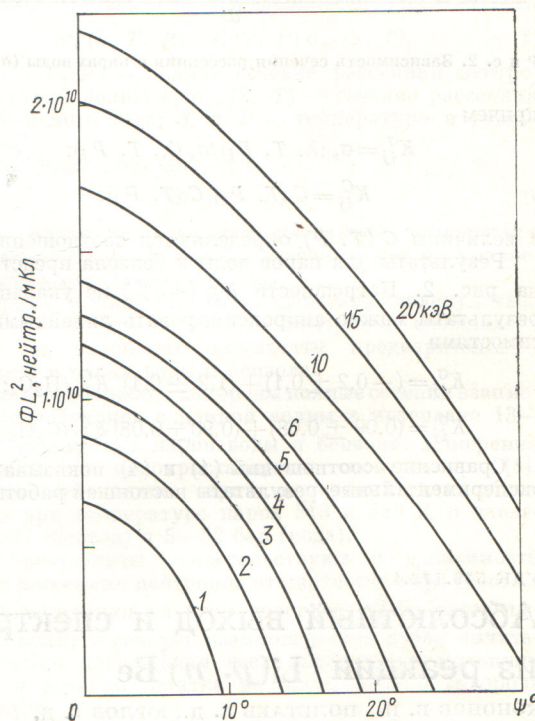


Рис. 3. Зависимость полного выхода нейтронов из реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^6\text{Be}$ от угла их вылета в лабораторной системе для превышения над порогом реакции 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 15 и 20 кэВ

Дифференциальный выход нейтронов из реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ в припороговой области, рассчитанный по формуле (1), а также спектр нейтронов из толстой металлической литиевой мишени, измеренный с помощью метода времени пролета, представлены на рис. 1. Результаты расчета дифференциального выхода нейтронов в более широкой области энергий протонов с использованием соотношения (2) представлены на рис. 2. В припороговой области наблюдается хорошее согласие рассчитанного и экспериментального выхода нейтронов. Расчетные данные в широкой области энергий протонов хорошо подтверждаются также имеющимися в литературе экспериментальными данными по полному абсолютному выходу нейтронов из толстых мишеней. В области энергии протонов 1,95–2,0 МэВ, где для расчета могут быть использованы оба подхода, значения дифференциального выхода нейтронов, полученные из соотношений (1) и (2), хорошо согласуются.

Это позволяет заключить, что приведенные соотношения могут быть использованы для расчета формы спектра нейтронов и их абсолютного выхода в различных условиях, причем абсолютный выход может быть получен с погрешностью ~10%.

Из соотношений (1) и (2) можно получить важные для приложений характеристики нейтронного источ-

ника с использованием реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$. В качестве примера на рис. 3 представлен полный выход нейтронов вблизи порога реакции в зависимости от их угла вылета. При токе пучка протонов 1 мА в реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ может быть получен узконаправленный пучок нейтронов со средней энергией 30 кэВ, углом расходимости ~15° и величиной плотности потока нейтронов $\Phi = 10^{10}/R^2$ нейтр./см²·с. Пучок нейтронов с такими характеристиками может представлять интерес для решения ряда прикладных задач.

Поступило в Редакцию 16/IV 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика быстрых нейтронов. Под ред. Д. Мариона и Д. Фаулера. Т. 1. М., Госатомиздат, 1963.
2. Кононов В. Н. и др. Труды Второго Всес. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Т. 2. Л., изд. НИИЭФА, 1976, с. 60.
3. Liskien H., Paulsen A. «Atomic Data and Nucl. Data Tables», 1975, v. 15, p. 57.
4. Кононов В. Н., Полетаев Е. Д., Юрлов Б. Д. Препринт ФЭИ-752, Обнинск, 1977.

Рецензии

Боршанский В. М., Кутателадзе С. С., Новиков И. И., Федынский О. С. **Жидкометаллические теплоносители**. М., Атомиздат, 1976, 328 с., 2 р. 33 к.

Промышленное использование жидкометаллических теплоносителей расширило сферу интересов к этой области. Атомиздат за относительно короткий период выпустил в свет ряд книг, посвященных проблеме жидких металлов. Особое место принадлежит рецензируемой книге, первое издание которой в 1958 г. (в виде приложения к журналу «Атомная энергия») явилось, по-видимому, первой отечественной монографией о применении жидкометаллических теплоносителей в ядерной энергетике. Существенно переработанное и дополненное третье издание сохранило основные достоинства предыдущих: комплексность изложения проблемы и лаконизм, как правило, без потери информативности и глубины.

Хорошим введением в проблему является первая глава книги, где рассматриваются физические и химические свойства жидких металлов. Суммируя и критически анализируя современную экспериментальную информацию, авторы в то же время изложили основы термодинамического подхода к определению обобщенных зависимостей характеристических свойств, что особенно важно для жидких металлов, сведения о конкретных параметрах которых во многих случаях отсутствуют.

Гидродинамика жидких металлов как в отсутствие, так и при наложении магнитного поля (третья глава) представляет интерес не только в связи с проблемами МГД-генераторов, применительно к которым она описывается, но и в связи с развитием работ по инженерным проблемам термоядерного реактора. Повышенное внимание обращено, в частности, на реализацию теплоотвода в бланкете термоядерного реактора.

Наиболее подробно и полно изложен в книге теплообмен в жидких металлах, что естественно для авторского коллектива, включающего ведущих исследователей в области теплопередачи. Теплообмену посвящены семь основных глав монографии. Рассматривается теплоотдача при течении металлической среды в трубах и кольцевых зазорах, при внешнем обтекании пластин, трубных и стержневых сборок в условиях свободной и вынужденной конвекции, при кипении и конденсации пара. Авторы не только приводят расчетные и экспериментальные результаты, но и с учетом расчетных допущений, методики экспериментов оценивают достоверность, применимость того или иного значения, зависимости. Степень детализации, форма представления информации в этих разделах книги наиболее полно соответствует запросам читателей, которым она адресована: инженерно-техническому персоналу эксплуатационных и проектных организаций соответствующего профиля.

Стремление к сохранению комплексности изложения при сравнительно небольшом объеме книги, очевидно, послужило причиной включения в нее разделов, информативность которых не в полной мере отражает современную проработку вопроса. В первую очередь это относится к главе 12, особенно в части рассмотрения работоспособности конструктивных материалов в жидких металлах. Недостатком полной является и библиография по этому разделу. Заслуживает, на наш взгляд, и более подробного изложения применимость жидкометаллических теплоносителей (глава вторая).

Несмотря на эти недостатки, а также на пропущенные, к сожалению, и автором, и издательством опечатки, рецензируемая монография является существенным вкладом в библиотеку литературы о жидких металлах.

АДАМОВ Е. О.