

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sidorov A., Sirebkov Y.S., Shchipakin O.L. Fusion reactor blanket with 17Li—83Pb eutectic. — Fusion Engng Design, 1991, v. 146, p. 427—444.
2. Несмеянов А.Н. Давление пара химических элементов. М.: АН СССР, 1963. 396 с.
3. Борисов Н.В. Сорбционно-фильтрующие материалы для комплексного улавливания аэрозолей и паров радиоактивных и химических вредных веществ. — В кн.: Избр. труды Межд. аэрозольного симп., март 21—25, 1994. М., т. ДТ-1, с. 30—40.
4. Brooks L. The vapor pressure of Polonium. — J. Amer. Chem. Soc., 1955, v. 77, p. 3211.
5. Абакумов А.С. Термические реакции полония. — Успехи химии, 1982, т. L1, вып. 7, с. 1091—1101.
6. Петрянов И.В., Борисов Н.В., Чуркин С.Л. и др. Образование и выделение газообразной фракции полония из его твердых препаратов. — Докл. АН СССР, 1992, т. 322, № 3, с. 557—559.
7. Нормы радиационной безопасности ИРБ-76/87. М.: Энергоатомиздат, 1988. 90 с.

Поступило в Редакцию 23.01.95

УДК 539.17

СИСТЕМА САДКО-2 ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАСЧЕТА ПЕРЕНОСА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГРУППОВЫМИ МЕТОДАМИ

Горбатков Д.В., Крючков В.П. (ГНЦ РФ — ИФВЭ)

Расчетное исследование формирования полей излучения за радиационной защитой ускорителей является актуальной задачей. В связи с повышением требований к точности их расчета, особенно в задачах глубокого проникновения частиц, электроядерной энергетики, трансмутации долгоживущих радионуклидов, минимизации фоновых нагрузок на детекторах, значительно возрос интерес к развитию традиционных в реакторной физике методов расчета переноса излучения (многогрупповой подход в описании энергетической зависимости сечений и метод дискретных ординат для решения кинетического уравнения) на область высокой энергии [1—3]. Такой подход позволяет разделить математический и физический аспекты расчета переноса частиц в вещество. При этом расчетные программы являются универсальными по типу частиц и их энергии, а основная исходная физическая информация — ядерные константы для различных типов частиц и энергии — содержится в заранее подготовленных библиотеках групповых сечений.

В настоящее время известны такие библиотеки групповых ядерных констант, как БИД-400 [4], HILO [1], Садко-1 [5], однако первые две содержат данные только для нейтронов в энергетическом диапазоне до 400 МэВ, а система Садко-1 обеспечивает проведение расчетов для протонов и нейтронов энергией до 600 МэВ.

Разработка нового быстродействующего кода [6] для расчета выхода вторичных адронов в неупругих $\Lambda\Lambda$ -взаимодействиях, который позволил существенно уточнить ядерные данные, расширить энергетический диапазон и увеличить число поддерживаемых типов частиц, явилась основой для создания новой версии библиотеки групповых ядерных сечений. Разработанная в ИФВЭ система адронных констант Садко (версия 2) осуществляет константное обеспечение расчета групповыми методами для протонов, π -мезонов в диапазоне энергии от 20 МэВ до 10 ТэВ, нейтронов — от тепловой до 10 ТэВ, фотонов — от 0,01 до 15 МэВ.

В настоящей работе описываются структура и основные параметры новой версии константной системы.

Структура Садко-2 (рис. 1). Составляющие систему части представляют собой независимые блоки программ и алгоритмов, которые объединяются задачей создания файла групповых сечений в определенном формате. Этапы решения этой задачи и определяют структуру Садко:

расчет полных и дважды дифференциальных сечений неупругого $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия для заданного изотопа и энергетического диапазона;

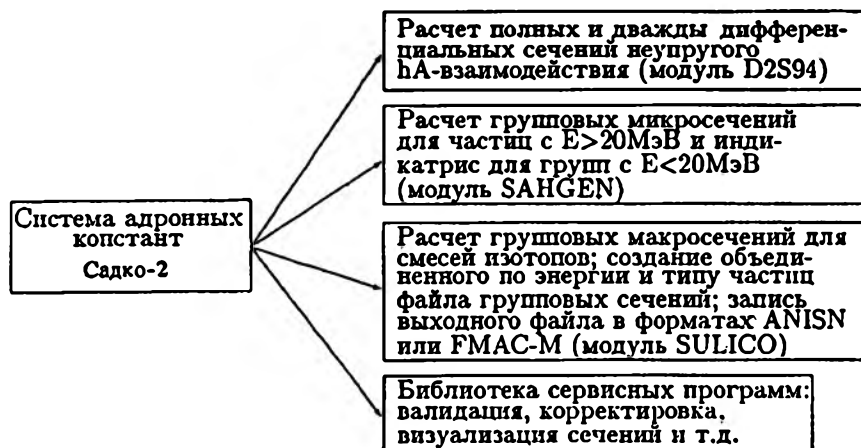
выбор оптимального числа энергетических групп и рационального способа усреднения сечений, расчет групповых микросечений и индикатрисы для изотопа в области энергии протонов, нейтронов, пионов >20 МэВ и вероятностей переходов в группы для нейтронов энергией <20 МэВ;

подготовка низкоэнергетического файла групповых сечений взаимодействия нейтронов и фотонов с веществом для расчетной композиции;

создание объединенного по типу частиц и энергии файла групповых макросечений.

Расчет групповых констант. Ядром константной системы является алгоритм и реализующий его код для расчета полных и дважды дифференциальных сечений неупругого $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия, представленный в работе [6]. В основе алгоритма лежит аппроксимация экспериментальных и расчетных оцененных данных, накопленных в банке данных RD [7] и Садко.

Для определения оцененных элементарных сечений использовалась процедура минимизации функционала χ^2



Р и с. 1. Схема системы адронных констант Садко-2

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(\sigma'_{on} - \sigma'_p)^2}{(\Delta\sigma'_{on})^2},$$

где σ_{on} — опорные (экспериментальные и расчетные) сечения при энергии E ; σ_p — расчетное сечение для этой же энергии; $\Delta\sigma_{on}$ — погрешность опорного сечения.

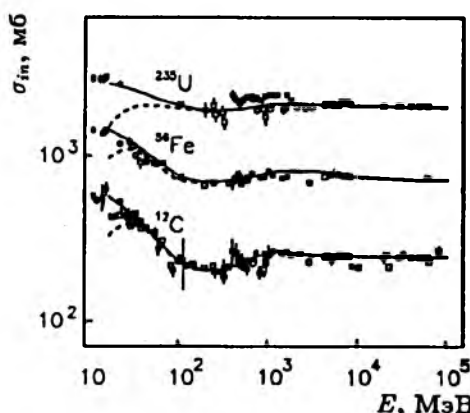
Интегральные сечения определяются на основе экспериментальных и расчетных оцененных данных, представленных в компиляциях [8, 9]. На рис. 2 расчетные и экспериментальные данные [8, 9] сравниваются.

Многочисленные оценки и сравнения с экспериментальными данными показали, что система подготовки интегральных сечений в Садко позволяет получать результаты с погрешностью 10% для энергетического диапазона 20 МэВ—10 ТэВ. Исключением является область нескольких десятков МэВ для пионов, где беден набор экспериментальных данных. Дважды дифференциальные сечения используемая методика позволяет получать с погрешностью не хуже 50%. Качество методики иллюстрируют рис. 3—5.

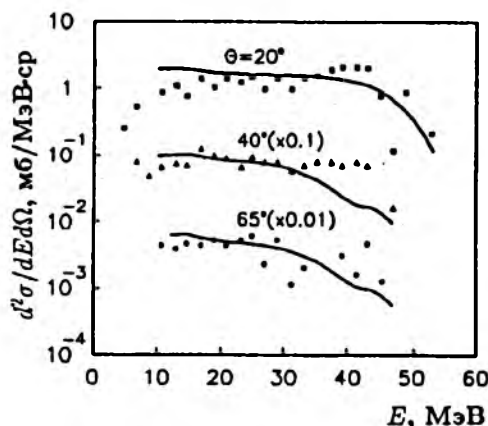
На основе оцененных элементарных сечений вычисляются групповые константы, которыми характеризуются в рамках многогруппового подхода взаимодействия частицы со средой: (σ_i^q) — групповое микроскопическое сечение столкновения частицы l -го типа q -й группы, определяемое выражением

$$\sigma_i^q = \frac{\int_{E^q}^{E^{q+1}} \sigma_i(E) \varphi_i(E) dE}{\int_{E^q}^{E^{q+1}} \varphi_i(E) dE},$$

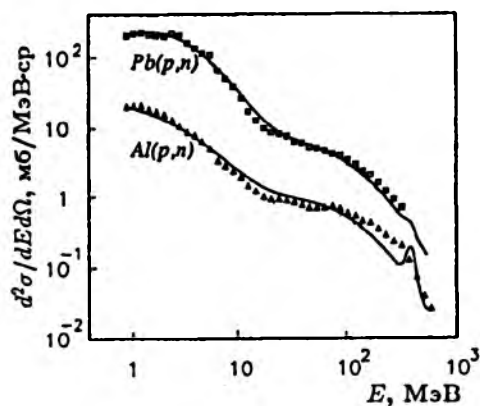
где $\varphi_i(E)$ — функция дифференциальной плотности потока частиц l -го типа; $\sigma_i(E)$ — микроскопическое интегральное сечение; E^q, E^{q+1} — границы q -й энергетической группы. Оно характеризует ослабление «узкого» пучка адронов q -й группы при прохождении через ве-



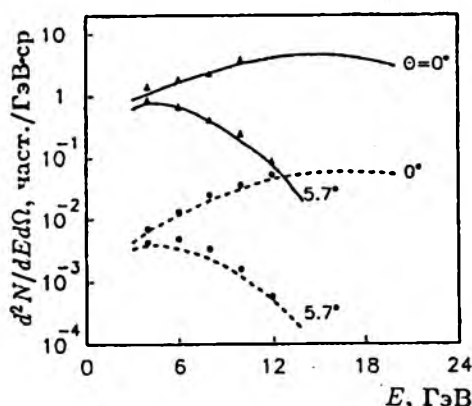
Р и с. 2. Энергетическая зависимость интегрального неупругого сечения hA -взаимодействия для различных ядер-мишеней в сравнении с экспериментальными данными: —, - - - — (n, A) - и (p, A) -реакции соответственно



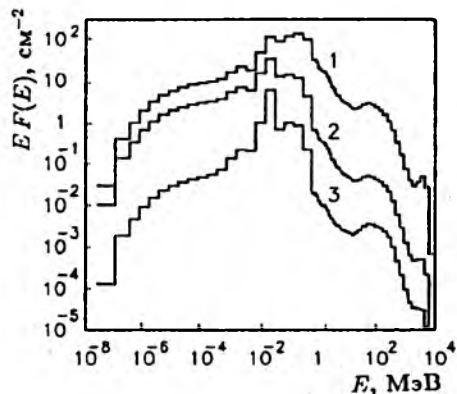
Р и с. 3. Дважды дифференциальные сечения образования протонов на ядре кислорода под действием нейтронов энергией 60,7 МэВ: $\circ, \Delta, \square$ — эксперимент [10], — — расчет с использованием системы Садко-2



Р и с. 4. Дважды дифференциальные сечения образования нейтронов на ядрах алюминия и свинца под углом 30° под действием протонов энергией 585 МэВ: Δ , $\square$ — эксперимент [11], — — — данные системы Садко-2



Р и с. 5. Дважды дифференциальные сечения образования протонов на ядрах бериллия (— — —) и свинца (—) под действием протонов энергией 22,2 ГэВ: $\circ$, $\blacktriangle$ — эксперимент [12, 13]; — — — — расчет с использованием системы Садко-2



Р и с. 6. Спектр нейтронов за защитой из железа толщиной 60 (1), 150 (2), 200 см (3) для энергии падающего протона 10 ГэВ

щество, определяя распространение частиц в среде. Процесс рождения вторичных частиц различного сорта в неупругих hA -взаимодействиях учитывается в индикатрисе $\sigma_i^{p \rightarrow q}$ — микроскопическом дифференциальном сечении рассеяния частицы из группы p в группу q :

$$\sigma_i^{p \rightarrow q}(\mu_i) = \frac{\int_{E^q}^{E^{q-1}} dE' \int_{E^p}^{E^{p-1}} dE' \sigma_i(E' \rightarrow E, \mu_i) \varphi(E')}{\int_{E^p}^{E^{p-1}} \varphi(E) dE},$$

где $\sigma_i(E' \rightarrow E, \mu_i)$ — дифференциальное сечение рассеяния; $\mu_i = \vec{\Omega}' \cdot \vec{\Omega}$ — косинус угла рассеяния.

Для расчета переноса заряженного компонента в приближении непрерывного замедления определяются ионизационные потери $\beta(E) = -dE/dx$, которые в соответствии с разработанным алгоритмом [14] задаются для энергии, соответствующей границам групп. В том случае, когда используется диффузионное приближение для учета потерь энергии на ионизацию, необходим расчет $\xi(E)$, равных среднему квадрату энергии, теряемой частицей на единице пути (см. работу [15]). В этой же работе показано, что в задачах с сильной анизотропией рассеяния предпочтительнее использовать уравнение Больцмана—Фоккера—Планка для аппроксимации угловой зависимости индикатрисы, а также приведены соответствующие выражения для расчета коэффициентов Фоккера—Планка $T(E)$. Значения $\beta(E)$ и $\xi(E)$ рассчитывались в соответствии с формулами работы [16].

При составлении многогрупповых систем констант важное значение имеет выбор энергетических интервалов групп, а также рациональных способов усреднения эффективных сечений по энергетическим интервалам отдельных групп. Для энергии больше 20 МэВ использовано равномерное по шкале летаргии $u = \ln(E_0/E)$ расположение границ групп, так как при этом типичные эффективные сечения изменяются при переходе от данной группы к соседней по энергии группе приблизительно на одинаковое число раз.

Приращение летаргии Δu в группе принято равным 0,72, что приблизительно соответствует Δu в многогрупповой библиотеке БВФ [17] для расчета переноса нейтронов и фотонов энергией меньше 20 МэВ. Использование большего числа более узких групп вряд ли целесообразно, так как сами исходные данные обладают определенной погрешностью и для увеличения точности расчетов требуется дальнейшее уточнение ядерных оценочных данных. Кроме того, известно, что в области энергии больше 20 МэВ сечения слабо изменяются с энергией (см. рис. 2).

Выбор стандартной формы внутригруппового спектра $\varphi(E)$ также не столь важен, как для задач реакторной физики, где энергетическая зависимость сечений имеет ярко выраженную резонансную структуру. Обычно погрешность за счет выбора формы спектра $\varphi(E)$, как показано в работе [5], не превышает 2%, что меньше вероятной ошибки в определении большинства сечений. На рис. 6, 7 представлены полученные в работе [18] наиболее типичные для ускорителей спектры нейтронов за защитой из бетона и железа. Они хорошо аппроксими-

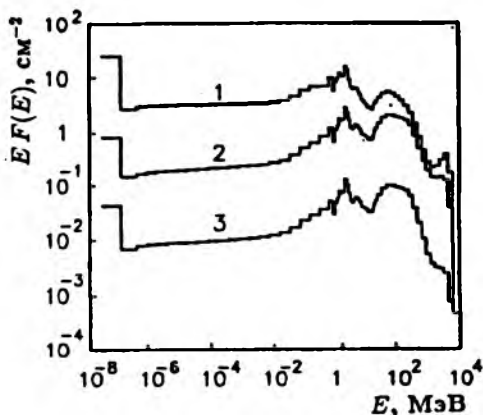
руются зависимостью вида $\varphi \sim E^{-\alpha}$, где $\alpha = 1$ для $10 \text{ МэВ} < E < 200 \text{ МэВ}$ и $\alpha = 1,5$ для $E > 200 \text{ МэВ}$, которая была принята в данной версии Садко в качестве стандартной формы спектра, что не приводит к существенной погрешности для всех типичных случаев распространения излучения в защите и детектирующих установках на ускорителях.

Угловая зависимость индикатрисы в Садко-2 представляется либо разложением в ряд по полиномам Лежандра, либо в точках по μ_z . При подготовке групповых сечений для энергии меньше 20 МэВ в данной версии системы применяется константная система USCONS [19] с групповой структурой и ядерными данными библиотеки нейтронных и фотонных сечений БВФ (49n + 15у групп). Для удобства формат исходных данных для модуля SULICO (см. рис. 1) унифицирован с форматом исходных данных системы USCONS.

Результатом работы константной системы Садко-2 является файл групповых сечений в определенном формате, подготовленный с учетом компонентного состава вещества защиты или детектора, включающий в себя как высокоэнергетические, так и низкоэнергетические ($E < 20 \text{ МэВ}$) групповые константы. Порядок следования групп для частиц различного сорта оптимизируется в целях минимизации числа внешних итераций при расчете переноса.

Выходной формат Садко-2 определяется программой, использующей групповые сечения. Система обеспечивает создание групповых библиотек в формате данных следующих программ: PO3-6,4 [20], MOSKIT [21], ANISN [22] или DOT [23].

Расчеты переноса частиц с применением системы Садко-2 не приводятся в настоящей статье, однако заинтересованный читатель может найти результаты таких расчетов в работах [18, 24]. Подробное описание работы с системой, примеры задания исходных данных даны в работе [25].



Р и с. 7. То же, что на рис. 6, за защитой из бетона толщиной 100 (1), 200 см (2), гетерогенной защитой по 100 см железа и бетона (3)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alsmiller R., Barish J. Neutron-Photon Multigroup Cross Sections for Neutron Energies $\leq 400 \text{ MeV}$. — Nucl. Sci. Engng, 1982, v. 80, p. 448; Alsmiller R., Barnes J., Drischler J. Neutron-Photon Multigroup Cross Sections for Neutron Energies $\leq 400 \text{ MeV}$, Revision 1. ORNL/TM-9801, 1986.
2. Kotegawa H. Neutron-Photon Multigroup Cross Sections for Neutron Energies up to 400 MeV: HILO86R, Revision of IILLO86 Library. JAERI-M93-020, 1993.
3. Sakamoto Y., Nakashima H., Nakane Y. Shielding experiments with quasi-monoenergetic neutrons between 15 and 90 MeV at 90 MV AVF cyclotron facility TIARA. — In: Proc. Intern. Conf. on Radiation Shielding, Arlington, Texas, 1994.
4. Крючков В.П. Константное обеспечение расчетов переноса нейтронов в области энергий 0,01 эВ—400 МэВ: Препринт ИФВЭ 80-35, 1980.
5. Горбатков Д.В., Крючков В.П., Семенова Г.И. Разработка системы константного обеспечения расчета переноса нейтронов и протонов с энергией до 600 МэВ в веществе. — Вопросы атомной науки и техники, Сер. Ядерные константы, 1990, вып. 1, с. 63.
6. Горбатков Д.В., Крючков В.П., Стриганов С.И. Дифференциальные сечения рождения адронов в неупругих hA -взаимодействиях для энергии первичных частиц 20 МэВ—10 ТэВ: Препринт ИФВЭ 92-172, 1992.
7. Алехин С.И., Базесса В.В., Грудцин С.Н. и др. PPDS компас-букварь: Препринт ИФВЭ 87-125, 1987.
8. Барашенков В.С. Сечения взаимодействия частиц и ядер с ядрами. Дубна, ОИЯИ, 1993.
9. Сычев Б.С., Калмыков А.Р., Отрощенко Е.А. Сечения неупругого взаимодействия адронов с атомными ядрами (феноменологический анализ): Препринт МПТИ 834, 1983.
10. Subramanian T., Romero J., Brady F. Double-differential inclusive hydrogen and helium spectra from neutron-induced reactions at 27,4, 39,7, and 60,7 MeV: oxygen and nitrogen. — Phys. Rev. C, 1986, v. 34(5), p. 1580.
11. Cierjacks S., Hino Y., Raupp F. Systematics of angular-dependent neutron production by 585 MeV protons on targets with $12 < A < 238$: differential cross sections measurements. — Ibid., 1976, v. 36(87).
12. Dekkers D. — Phys. Rev., 1965, v. 137, p. 962.
13. Lundy R., Novey T., Yovanovitch D. π^+ and K^+ production cross sections for 12,5-BeV protons on Be. — Phys. Rev. Lett., 1965, v. 14(13), p. 504.

14. Voloschenko A.M., Gorbalkov D.V., Kryuchkov V.P. Numerical solution of the Boltzmann—Fokker—Planck equation for charged-particle transport. — В кн.: Межд. симп. «Численные методы решения уравнения переноса». М., 1992.
15. Горбатков Д.В., Крючков В.П. Особенности применения сеточных методов для расчета переноса высокоэнергетических адронов: Препринт ИФВЭ 92-171, 1992.
16. Ремизович В.С., Рогозкин Д.В., Рязанов М.И. Флуктуации пробегов заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1988.
17. Дубинин А.А., Колесов В.Е., Кривцов А.С. и др. Библиотека групповых констант для расчета источников фотонов в ядерно-технических установках БВФ (49 + 15). — Труды IV Всес. научной конф. по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. Томск, 1985.
18. Горбатков Д.В., Крючков В.П. Характеристики фонового излучения за одномерными радиационными защитами пучков высокоэнергетических частиц: Препринт ИФВЭ 94-47, 1994.
19. Voronkov A.V., Juravlev V.I. USCONS: Code System to Compute Group Cross Sections Using GNDL Data Library. Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, 1983.
20. Averin A.V., Voloschenko A.M., Kondratenko E.P. ROZ-6 code system for the solution of the transport equation in 1-D geometries. — In: Proc. Top. Mtg Adv. in Mathem., Comput. and Reactor Physics, Pittsburgh, USA, 1991, v. 5, p. 30.
21. Крючков В.П., Суманев О.В. MOSKIT1 — программа для решения задачи переноса частиц (n, p, π, γ) в веществе методом Монте-Карло. (Алгоритм. Инструкция): Препринт ИФВЭ 92-132, 1992.
22. Engle W.Jr. A User's Manual for ANISN, a One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code. Union Carbide Report K-1693, 1967.
23. Rhoades W., Munatt F. The DOT-III Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code. ORNL-TM-4280, 1973.
24. Gorbalkov D.V., Kryuchkov V.P. Space-energy characteristics of radiation components behind high-energy accelerator shielding. — In: Proc. Fourth European Particle Accelerator Conference, London, 1994, v. 3, p. 2591.
25. Горбатков Д.В., Крючков В.П. Садко-2 — система адронных констант для обеспечения расчетов переноса высокоэнергетического излучения групповыми методами: Препринт ИФВЭ 95-11, 1995.

Поступило в Редакцию 6.03.95

УДК 621.039.52

ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Ионайтис Р.Р., Котов В.В. (НИКИЭТ), Щукин И.М. (ОКБМ)

Сплавы с памятью формы представляют собой материалы, которые приобретают ранее заданную форму при нагревании до некоторой температуры, называемой температурой превращения, и восстанавливают исходные формы при охлаждении. Такие сплавы разрабатываются ввиду уникальности свойств этих материалов: восстановление формы при нагреве, крутизна характеристики (перемещение — температура), возможность сжиматься при нагреве, многократность срабатывания, большие сдвиговые деформации, большие развиваемые усилия, эффективное демпфирование, звукопоглощение, пластичность, сверхупругость, длительное сохранение свойств, возможность объединения чувствительного и исполнительного элементов, простота конструкции [1—3].

Разработана и освоена опытно-промышленная технология изготовления различных геометрических форм материалов с памятью формы: прутки диаметром от 8 до 230 мм, проволока диаметром от 0,2 до 7 мм, трубы диаметром от 14 до 60 мм, листы толщиной от 0,5 до 10 мм, ленты толщиной от 0,04 до 3 мм [4]. Получены материалы с различной температурой превращения: до 200 °С — Ti—Ni (Nb), Cu—Al—Zn (Ni, Mn), Mn—Cu, Mn—Cu—Cr, In—Ti; 200—300 °С — Fe—Mn—Si, Co—Ni, Ni—Al; 300—400 °С — Cu—Al; 400—500 °С — Fe—Ni, Ti—Ta; 500 °С — Ti—Pd—Ni, Ti—Pt—Ni, Ti—Ag—Ni.

Области применения сплавов с памятью формы в ядерной энергетике. Возможные направления использования сплавов с памятью формы в ядерной энергетике включают пассивные системы безопасности, соединительные, уплотняющие, герметизирующие элементы (термомуфты) труб и электропроводов, устройства оперативного ремонта и монтажной сборки узлов ЯЭУ, термомеханические приводы и двигатели, демпферы, регуляторы расхода среды, термодетекторы, прямодействующие (самосрабатывающие) аварийные устройства, узлы и элементы (компенсаторы) линий электропередач, электроконтактные устройства и др. [5].

Рассматривается прямодействующая аварийная защита, в первую очередь для воздействия на реактивность активной зоны ядерного реактора и/или температуру теплоносителя или конструкционного элемента. Некоторые разработанные устройства, например, муфты, заглушки для труб, самоуплотняющиеся