

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА ВНЕШНИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Д.И. Алексеев

alekseev_d@internet.ru

SPIN-код: 9070-4522

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Повышение требований безопасности к разрабатываемым реакторным установкам обуславливает внедрения систем, способных предотвратить возникновение запроектных аварий. В данной статье приведено описание системы управления реактивностью для жидкосолевого реактора, основанной на использовании поляризованного магнитного отражателя нейтронов. Для рассматриваемой системы безопасности сформулированы основные технические преимущества и выполнено сравнение с традиционными методами регулирования. Обобщены основные физические закономерности и экспериментальные данные, затрагивающие перенос нейтронов в поляризованном материале отражателя. Получена качественная оценка отрицательной реактивности, вносимой за счет изменения коэффициента диффузии отражателя при его намагничивании.

Ключевые слова

Ядерный реактор, поляризация, коэффициент диффузии, спин, магнитное поле, микроскопическое сечение, альбеда, отражатель нейтронов

Поступила в редакцию 14.12.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. В теории переноса нейтрон рассматривают как точечную частицу, поскольку его положение и скорость может быть описана с достаточной точностью, не нарушая соотношений неопределенностей Гейзенберга. Точечное описание оказывается вполне приемлемым, поскольку длина волны де Бройля нейтронов реакторного спектра мала по сравнению с межъядерным расстоянием и его средним свободным пробегом в веществе. При этом не принимают во внимание эффекты поляризации, которые могут влиять на процессы переноса [1]. Обычно считают, что их учет во встречающихся на практике случаях не оправдан, поскольку в типовых реакторах у поляризации нет выделенного направления. Теоретически возможно создание системы, которая благодаря влиянию внешнего магнитного поля позволит задавать направление поляризации в области отражателя, изменяя баланс нейтронов в активной зоне реактора. Данная система обладает следующими достоинствами:

1) время внесения реактивности при ее включении составляет около 1 мкс, что по сравнению со временем срабатывания традиционных органов регулиро-

вания, которое определяется скоростью падения в активную зону (примерно 4 с), дает существенное преимущество с точки зрения соблюдения критериев безопасности;

2) появляется возможность использования реактора в исследовательских целях — как источника частично поляризованных нейтронов;

3) повышается эффективность использования топливных материалов;

4) комбинирование поляризованного магнитного отражателя с традиционными системами безопасности жидкосолевого реактора значительно улучшает его технические характеристики и повышает безопасность его эксплуатации.

Для описания принципа работы данной системы безопасности рассмотрим процесс рассеяния поляризованных нейтронов.

Физические основы поляризации. Поляризационные эффекты возникают благодаря тому, что нейтрон имеет спин, магнитный и электрический момент. Поляризовавшись при первом рассеянии, нейтроны распространяются дальше, обладая некоторой средней поляризацией, которая, в свою очередь, влияет на все последующие рассеяния. Полное микроскопическое сечение рассеяния можно представить как функцию энергии нейтронов с учетом поправок на поляризацию в виде следующего уравнения [2]:

$$\sigma_{tr}(E_n) = \sigma_s(E_n) + \sigma_{in}(E_n) + \sigma_{sch}(E_n) + \sigma_l(E_n) + \sigma_{sol}(E_n), \quad (*)$$

где $\sigma_s(E_n)$ — сечение упругого рассеяния; $\sigma_{in}(E_n)$ — сечение некогерентного рассеяния; $\sigma_{sch}(E_n)$ — сечение швингеровского рассеяния; $\sigma_l(E_n)$ — вклад от спин-орбитального взаимодействия с угловым моментом $l > 0$; $\sigma_{sol}(E_n)$ — поправка на эффекты конденсированных сред.

Все компоненты в правой части соотношения (*), кроме первого, имеют ядерное происхождение, обусловленное сравнительно небольшими, но далекодействующими электромагнитными силами, поскольку сам нейтрон не является полностью нейтральной частицей [3]. При дальнейшем рассмотрении поправку на эффекты конденсированных сред можно не учитывать в силу ее малости.

Сечение некогерентного рассеяния определяется взаимодействием электрического дипольного момента нейтрона с кулоновским полем ядра и зависит от взаимной ориентации спинов. В общем виде оно может быть записано следующим образом [4]:

$$\sigma_{in} = P_N \frac{J_i}{2J_i + 1} (a_+^2 - a_-^2),$$

где P_N — степень поляризации ядер рассеивающей среды; J_i — спин поляризованного ядра; a_+ и a_- — амплитуды рассеяния составного ядра в триплетном и синглетном состояниях соответственно.

Для нейтронов высоких энергий в области малых углов доминирует швингеровское рассеяние. В борновском приближении его вклад описывается дифференциальным сечением [5]:

$$\frac{d\sigma_{sch}}{d\Omega} = \frac{\gamma_n^2}{4} \left(\frac{e^2}{M_n c^2} \right)^2 [Z - F(q)]^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta}{2},$$

где γ_n — гиромангнитное отношение нейтрона; e — заряд электрона; M_n — масса нейтрона; c — скорость света; Z — заряд ядра рассеяния; $F(q)$ — атомный форм-фактор; θ — угол рассеяния.

Наиболее значительна поляризация, возникающая на больших углах в результате спин-орбитального взаимодействия нуклонов с ядрами вещества. Она может быть учтена с привлечением модельных представлений теории ядра либо измерена. Теория диффузии быстрых нейтронов в веществе с учетом спин-орбитального взаимодействия была разработана в работах [6–8].

Принцип работы реакторной установки. Двигаясь в отражателе, нейтроны преимущественно рассеиваются в направлении, обратном их диффузии [9]. При воздействии магнитного поля по направлению диффузии ориентация ядер ферромагнитного материала отражателя примет заданное направление. Утечка нейтронов тепловых и промежуточных энергий увеличится благодаря вкладу поляризационного сечения рассеяния. При достаточно большой напряженности поля ($\sim 10^3$ А/м), когда за время между столкновениями спины быстрых нейтронов успевают совершить несколько оборотов, их средняя поляризация обращается в нуль и диффузия будет происходить так, как если бы спин-орбитальное и швингеровское взаимодействие отсутствовало. Коэффициент диффузии при этом увеличивается, альбеда уменьшается.

По результатам некоторых проведенных экспериментов было показано, что коэффициент диффузии при некоторых энергиях может изменяться до 20 %. Для качественных оценок эта величина может быть выбрана в качестве основного параметра.

Принципиальная схема реакторной установки с поляризованным отражателем показана на рис. 1.

Методика расчета. Для упрощения вычислений требуется принять следующие допущения:

- диффузионные стационарные уравнения переноса решаются в однополовом приближении для энергии, соответствующей нижней границе промежуточных нейтронов [10] (10^4 эВ);

- активная зона реактора имеет цилиндрическую форму с высотой $H_{аз} = 130$ см и радиусом $R_{аз} = 60$ см;

- все механические органы регулирования находятся в верхнем положении, поэтому их влиянием можно пренебречь;

– рассеяние нейтронов в активной зоне и материале отражателя принимается изотропным;

– отражатель разделен на два слоя: для первого нейтронно-физические свойства постоянны; для второго изменяются в результате воздействия магнитного поля (рис. 2). Влияние магнитного поля на первый слой считается незначительным.

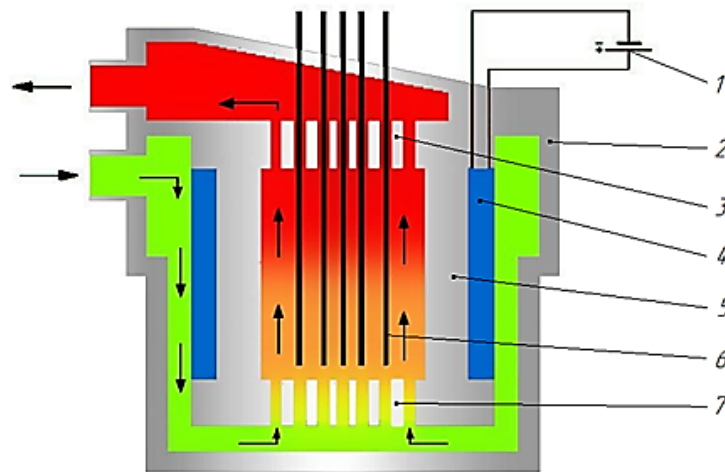


Рис. 1. Схема реактора:

1 — источник питания; 2 — корпус; 3 — верхний отражатель; 4 — поляризованный отражатель; 5 — боковой отражатель; 6 — регулирующие стержни; 7 — нижний отражатель

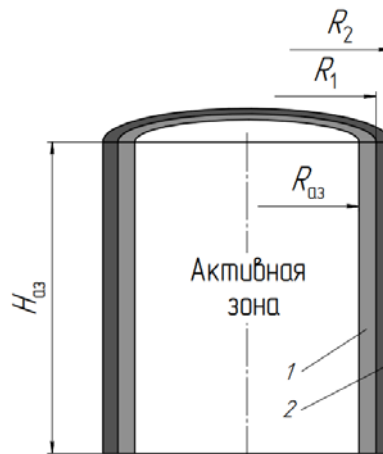


Рис. 2. Расчетная схема:

1 — неполяризованный отражатель;
2 — поляризованный отражатель

Диффузионные уравнения для активной зоны, первого и второго отражателя имеют вид

$$\Delta\Phi_1 + \left(3(v_{f1}\Sigma_{f1} - \Sigma_{a1})\Sigma_{tr1} - \left(\frac{\pi}{H_{a3}}\right)^2 \right) \Phi_1 = 0;$$

$$\Delta\Phi_2 - \left(3\Sigma_{a2}\Sigma_{tr2} + \left(\frac{\pi}{H_{a3}}\right)^2 \right) \Phi_2 = 0;$$

$$\Delta\Phi_3 - \left(3\Sigma_{a3}\Sigma_{tr3} + \left(\frac{\pi}{H_{a3}}\right)^2 \right) \Phi_3 = 0,$$

где Φ_1, Φ_2, Φ_3 — функции распределения потока нейтронов в активной зоне, первом и втором отражателе соответственно; $v_{f1} = 2,97$ — число нейтронов на один акт деления; $\Sigma_{i,j} = \sum_{i,j} \sigma_i N_j$ — полные макроскопические сечения взаимодействия, рассчитываемые по данным таблицы (см. ниже). Микроскопические сечения нуклидов для энергии нейтронов 10^4 эВ взяты из библиотеки ядерных данных ENDF/B-VII.0 [11].

Микроскопические сечения материалов активной зоны и отражателя

Микроскопическое сечение i -го взаимодействия, барн	Нуклид j				
	Pu-239	Li-7	Be-9	F-19	сталь
Поглощение, σ_a	2,92	10^{-4}	$1,63 \times 10^{-5}$	$4,34 \times 10^{-5}$	3×10^{-3}
Деление, σ_f	1,76	–	–	–	–
Рассеяние, σ_{tr}	12,79	1,06	6,05	3,6	10,3

Ядерные концентрации N_j изменяются в зависимости от обогащения. В качестве базового состава принята соль $0,85(0,73\text{LiF} - 0,27\text{BeF}_2) + 0,15\text{PuF}_3$.

Результаты расчета. На первой итерации свойства обоих отражателей считали идентичными, как для случая, при котором поляризация второго отражателя равна нулю. Из условия критичности была найдена их суммарная толщина ΔR_Σ .

Для нахождения толщины второго отражателя при включении магнитного поля варьировали обогащение топливной соли при постоянном значении ΔR_Σ .

Приращение коэффициента диффузии второго отражателя $\left(D_2 = \frac{1}{\Sigma_{tr2}} \right)$ изме-

няли от 5 до 20 % с шагом 5 %. Графики безразмерной толщины поляризованного отражателя $\left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 - R_{a3}} \right)$ от относительного изменения обогащения представлены на рис. 3.

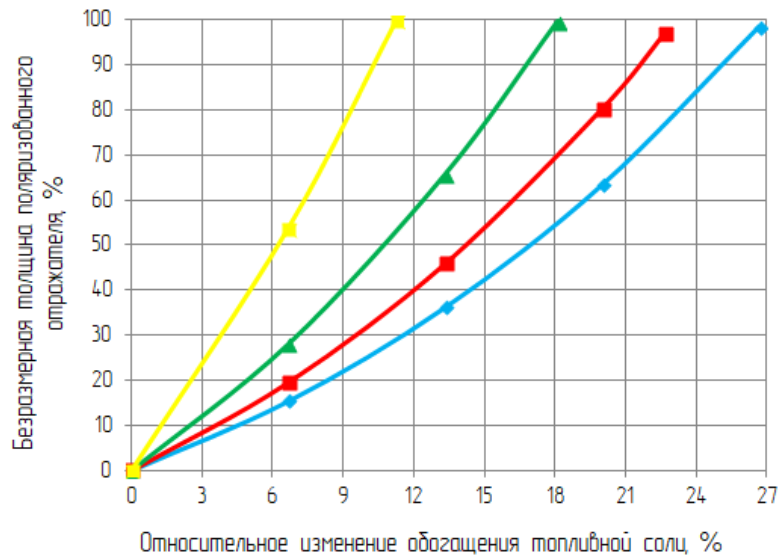


Рис. 3. Толщина поляризованного отражателя:
синий — изменение коэффициента диффузии 20 %, красный — 15 %, зеленый — 10 %, желтый — 5 %

Наличие высоких температурных градиентов в отражателе при работе реактора в стационарном режиме ограничивает максимальную толщину его поляризованной части. При толщине второго отражателя, равной $\Delta R_{\Sigma}/4$, минимальная вносимая отрицательная реактивность, с учетом принятых допущений, составит примерно 3 %, что вполне достаточно для обеспечения требуемой подкритичности реактора в случае останова.

Выводы. Полученные результаты дают основания для следующих важных выводов:

- 1) необходимо совершенствование расчетных методик оценки влияния поляризации элементов отражателя на физику реактора;
- 2) требуется увеличение количества экспериментальных данных по неядерным процессам рассеяния нейтронов с энергиями реакторного спектра для различных нуклидов;
- 3) в комбинации с механическими органами регулирования такая система теоретически может создать требуемую подкритичность на время, необходимое для их падения в активную зону в случае возникновения аварийной ситуации.

Литература

- [1] Широков С.В. *Физика ядерных реакторов*. Минск, Высшая школа, 2011, 352 с.
- [2] Александров Ю.А. Поляризуемость нейтрона. Возможности ее определения из нейтронных экспериментов. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, 2001, т. 32, вып. 6, с. 1406–1464.
- [3] Поздняков Н.И. Электрический заряд нейтрона как феномен электрогравитации. *Динамика сложных систем – XXI век*, 2017, т. 11, вып. 2, с. 30–44.
- [4] Абов Ю.Г., Гулько А.Д., Крупчинский П.А. *Поляризованные медленные нейтроны*. Москва, Атомиздат, 1966, 268 с.
- [5] Кунашенко Ю.П. Швингеровское рассеяние быстрых нейтронов на кристаллах. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2012, № 3, с. 89–95.
- [6] Казаченков Ю.Н., Орлов В.В. Диффузия нейтронов при спин-орбитальном взаимодействии. *Атомная энергия*, 1965, вып. 18, с. 179–181.
- [7] Казаченков Ю.Н. Поляризационные эффекты при диффузии нейтронов. *Ядерная физика*, 1965, т. 1, вып. 5, с. 763–775.
- [8] Bell G., Goad W. Polarization effects on neutron transport. *Nucl. sci. and engng.*, 1965, vol. 23, pp. 380–391. <https://doi.org/10.13182/NSE65-A21075>
- [9] Казаченков Ю.Н., Орлов В.В. Влияние магнитного поля на диффузию нейтронов. *Атомная энергия*, 1972, т. 33, вып. 2, с. 681–685.
- [10] Джебпаров Ф.С., Львов Д.В. *Нейтронные исследования конденсированных сред*. Москва, НИЯУ МИФИ, 2012, 188 с.
- [11] Chadwick M.B., Obložinský P., Herman M. et al. ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology. *Nuclear Data Sheets*, 2006, vol. 107, pp. 2931–3060. <http://doi.org/10.1016/J.NDS.2006.11.001>

Алексеев Даниил Ильич — студент кафедры «Ядерные реакторы и материалы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Сатин Александр Анатольевич, ассистент кафедры «Ядерные реакторы и материалы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алексеев Д.И. Система регулирования реактивности реактора внешним магнитным полем. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 12 (89).
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-955>

SYSTEM OF NUCLEAR REACTIVITY CONTROL USING THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD

D.I. Alekseev

alekseev_d@internet.ru

SPIN-code: 9070-4522

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Increasing safety requirements to reactor facilities being designed and developed necessitates introduction of systems capable of preventing the beyond-design-basis accidents. The paper describes a reactivity control system for the molten salt reactor based on using the polarized magnetic neutron reflector. Main technical advantages are formulated, and a comparison with the traditional control methods is made for the security system under consideration. Basic physical laws and experimental data affecting the neutrons transfer in the polarized reflector material are summarized. Qualitative assessment of the negative reactivity introduced by altering the reflector diffusion coefficient during its magnetization was obtained.

Keywords

Nuclear reactor, polarization, diffusion coefficient, spin, magnetic field, microscopic cross section, albedo, neutron reflector

Received 14.12.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] Shirokov S.V. *Fizika yadernykh reaktorov* [Physics of nuclear reactors]. Minsk, Vysheyskaya shkola Publ., 2011, 352 p. (In Russ.).
- [2] Aleksandrov Yu.A. Neutron polarizability. Possibilities of its determination in neutron experiments. *Physics of elementary particles and atomic nuclei*, 2001, vol. 32, iss. 6, pp. 1406–1464. (In Russ.).
- [3] Pozdnyakov N.I. Neutron electric charge as a phenomenon of electrogravity. *Dynamics of complex systems – XXI century*, 2017, vol. 11, iss. 2, pp. 30–44. (In Russ.).
- [4] Abov Yu.G., Gul'ko A.D., Krupchinskiy P.A. *Polyarizovannyye medlennyye neytrony* [Polarized slow neutrons]. Moscow, Atomizdat Publ., 1966, 268 p. (In Russ.).
- [5] Kunashenko Yu.P. Schwinger scattering of fast neutrons in crystals. *Journal of surface investigation: X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 2012, no. 3, pp. 89–95. (In Russ.).
- [6] Kazachenkov Yu.N., Orlov V.V. Neutron diffusion during spin-orbit interaction. *Atomnaya energiya*, 1965, iss. 18, pp. 179–181. (In Russ.).
- [7] Kazachenkov Yu.N. Polarization effects during neutron diffusion. *Yadernaya fizika*, 1965, vol. 1, iss. 5, pp. 763–775. (In Russ.).
- [8] Bell G., Goad W. Polarization effects on neutron transport. *Nucl. sci. and engng.*, 1965, vol. 23, pp. 380–391. <https://doi.org/10.13182/NSE65-A21075>

- [9] Kazachenkov Yu.N., Orlov V.V. Influence of magnetic field on neutron diffusion. *Atomnaya energiya*, 1972, vol. 33, iss. 2, pp. 681–685. (In Russ.).
- [10] Dzheparov F.S., L'vov D.V. *Neytronnyye issledovaniya kondensirovannykh sred* [Neutron studies of condensed matter]. Moscow, NIYaU MIFI Publ., 2012, 188 p. (In Russ.).
- [11] Chadwick M.B., Obložinský P., Herman M. et al. ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology. *Nuclear Data Sheets*, 2006, vol. 107, pp. 2931–3060. <http://doi.org/10.1016/J.NDS.2006.11.001>

Alekseev D.I. — Student, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Academic advisor — Satin A.A., Assistant, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Alekseev D.I. System of nuclear reactivity control using the external magnetic field. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 12 (89). (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-955>