

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

### РАДИОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОР НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ВЫСОКОПОТОЧНЫХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

**С.Г. Лебедев**, ст. научн. сотр. ФГБУН Институт ядерных исследований РАН, канд. физ.-мат. наук, [lebedev@inr.ru](mailto:lebedev@inr.ru)

Рецензент: М.Ю. Егоров, ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ», [egorov12m2u@mail.ru](mailto:egorov12m2u@mail.ru)

*Проточный газовый радиохимический метод предлагается использовать для мониторинга нейтронного потока в высокопоточных ядерных реакторах, таких как ПИК Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Особенность технологии состоит в пространственном разделении детектирования нейтронов и их регистрации посредством транспортировки образовавшегося радиоактивного газа — продукта ядерной реакции — из активной зоны с помощью транспортного газа He (гелий) в оборудованный защитой удаленный счетчик распадов. В такой постановке технология позволяет кардинально снизить фоновую нагрузку от  $\gamma$ -квантов и других конкурирующих процессов. Для регистрации рекордной плотности нейтронного потока реактора ПИК до  $5 \cdot 10^{15}$  нейтрон  $\cdot$  см $^{-2}$   $\cdot$  с $^{-1}$  достаточно очень небольшого количества активного вещества в детектирующей ампуле. Фактически речь может идти о точечноподобной детектирующей ампуле, что весьма удобно для ее размещения в узком технологическом канале ядерного реактора ПИК. Малое количество активного вещества в ампуле детектора, кроме того, позволит снизить счет распадов и нагрузку на систему обработки информации.*

**Ключевые слова:** нейтроны, ядерные реакции, радиохимический монитор, ПИК.

### RADIOCHEMICAL NEUTRON MONITOR FOR HIGH FLUX NUCLEAR FACILITIES

**S.G. Lebedev**, Senior Researcher, Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, [lebedev@inr.ru](mailto:lebedev@inr.ru)

*The flow-through gas radiochemical method is proposed to be used for monitoring the neutron flux in high-current nuclear reactors, such as the PIK of the Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre «Kurchatov Institute». A special feature of the technology is the spatial separation of neutron detection and their registration by transporting the formed radioactive gas — the product of a nuclear reaction — from the core using helium transport gas to the decay counter. In this setting, the technology makes it possible to drastically reduce the background load from gamma quanta and other competing processes. A very small quantity of the active substance in the detection ampoule is sufficient to register the record density of the neutron flux of the PIK reactor up to  $5 \cdot 10^{15}$  neutrons  $\cdot$  cm $^{-2}$   $\cdot$  s $^{-1}$ . In fact, we can talk about a point-like detecting ampoule, which is very convenient for its placement in a narrow technological channel of the PIK nuclear reactor. A small quantity of the active substance in the ampoule of the detector, in addition, will reduce the decay rate and the load on the information processing system.*

**Keywords:** neutrons, nuclear reactions, radiochemical monitor, PIK.

## Введение

Введение в эксплуатацию высокопоточного ядерного реактора ПИК на территории ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» с максимальной тепловой мощностью 100 МВт и максимальной плотностью потока нейтронов до  $5 \cdot 10^{15}$  нейтрон  $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$  [1], а также международного термоядерного реактора ИТЭР с плотностью потока нейтронов до  $1,5 \cdot 10^{14}$  нейтрон  $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$  [2] потребует применения радиационно-стойких, компактных, простых по своему устройству и функционированию детекторов нейтронного потока. Хотя в настоящее время имеются периферийные нейтронные детекторы, в основном на основе ионизационных камер и позиционно-чувствительных детекторов [3], все же отсутствуют мониторы нейтронного потока в центре активной зоны (АЗ). Проблемы их размещения связаны с чрезвычайно высокими нейтронными потоками, перегружающими систему сбора и обработки информации (readout electronics), с фоновой загрузкой от  $\gamma$ -квантов, а также высоких температур в окрестности АЗ. Решением указанной проблемы может оказаться размещение в центре АЗ высокопоточных ядерных реакторов, таких как ПИК (Россия) [4], HFR (Франция) [5], HFIR (США) [6], FRM (Германия) [7], а также вблизи активной зоны международного термоядерного реактора ИТЭР [8] проточных газовых радиохимических мониторов нейтронного потока [9–13].

## Проточный газовый радиохимический монитор нейтронов

В проточном газовом радиохимическом мониторе используется свойство свободного выхода атомов инертного радиоактивного газа  $^{37}\text{Ag}$ , образующихся в ядерной реакции  $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)^{37}\text{Ag}$ , из кристаллической решетки оксалата кальция  $\text{CaC}_2\text{O}_4$ . Образующийся в ампуле детектора инертный радиоактивный газ  $^{37}\text{Ag}$  транспортируется газом-носителем He (гелием) в удаленный пропорциональный газовый счетчик проточного типа, где производится измерение скорости распадов ядер радиоактивного инертного газа, однозначно связанной с плотностью потока нейтронов в активной зоне. Преимуществами предлагаемого нейтронного монитора являются небольшое количество активного вещества  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  и малые размеры детектора, необходимые для регистрации высоких нейтронных потоков в центре активной зоны, а также относительно высокая температура разложения  $\text{CaC}_2\text{O}_4$ , составляющая около  $350^\circ\text{C}$ . Удаленное расположение и экранирование счетчика распадов позволяет избавиться от фона  $\gamma$ -квантов. Схема газового тракта радиохимического нейтронного монитора представлена на рис. 1 [14]. Отличие от схем газового тракта, использованных в работах [9–13], состоит в конструкции микроампулы 3, наполненной порошковым оксалатом кальция 2, а также в применении азотной ловушки 20 на выходе газовой смеси из счетчика в атмосферу для очистки транспортного газа от радиоактивных примесей аргона. Конструкция микроампулы (рис. 2) выбрана так, чтобы она свободно входила в обслуживаемый канал ядерного реактора. В случае реактора ПИК это центральный экспериментальный канал с нейтронной ловушкой диаметром  $\sim 80$  мм [15].

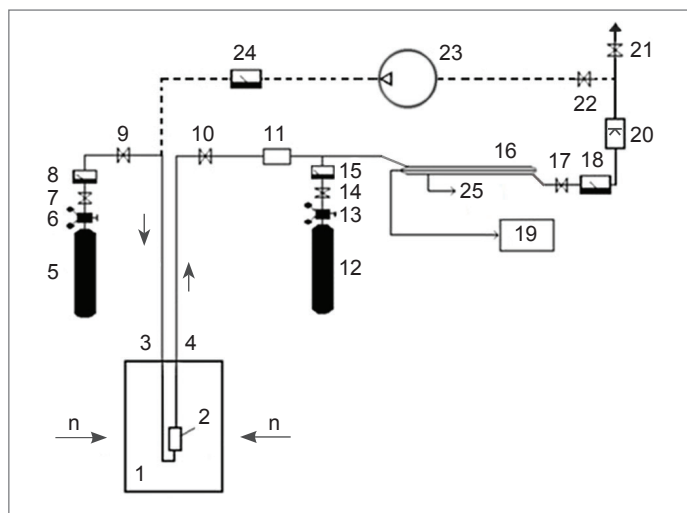
Пунктирной линией на рис. 1 показана возможность возврата отработанного He, очищенного от примесей радиоактивного газа и гасящей добавки, обратно в газовый тракт. Такая опция необходима при высоком потоке газа и длительной работе монитора из-за дороговизны транспортного газа He.

## Мониторирование нейтронного потока на нейтронной мишени РАДЭКС

Пример использования описанной методики для мониторинга нейтронного потока на нейтронной мишени РАДЭКС [16] приведен на рис. 3.

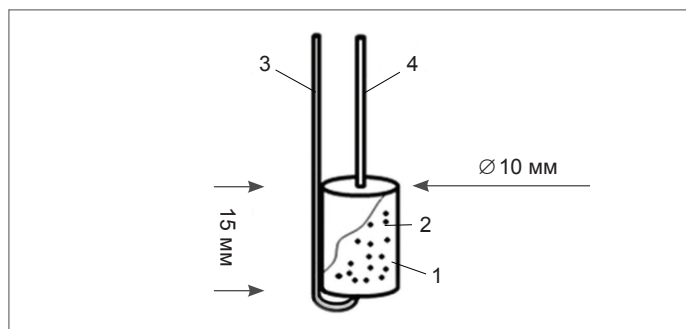
Применение нейтронного монитора в центре активной зоны является весьма полезным с точки зрения получения информации о временном поведении источника нейтронов, а также о степени выгорания ТВЭЛ. Кроме того, показания нейтронного монитора в центре

АЗ позволят контролировать и сравнить с соответствующими показаниями данные других нейтронных детекторов, находящихся в экспериментальных каналах.



**Рис. 1. Схема газового тракта проточного радиохимического монитора нейтронов**

Обозначения на схеме: 1 – канал реактора; 2 – микроампула детектора; 3 – трубка входного потока He; 4 – трубка выходного потока смеси He с радиоактивным аргоном; 5, 12 – баллоны He и гасящей добавки  $\text{CH}_4$  соответственно; 6, 13 – регуляторы давления; 7, 9, 10, 14, 17, 21, 22 – регуляторы расхода газа; 8, 15, 18, 24 – расходомеры; 11 – геттер ( $T = 700^\circ\text{C}$ , медная стружка); 16 – пропорциональный счетчик; 19 – система регистрации и обработки сигналов; 20 – азотная ловушка; 23 – насос-компрессор, 25 – высокое напряжение



**Рис. 2. Ампула детектора нейтронного монитора АЗ**

Обозначения на схеме: 1 – корпус ампулы; 2 – порошок оксалата кальция; 3 – трубка подвода транспортного газа He; 4 – трубка выходного потока смеси He с радиоактивным аргоном

### Применение проточного газового радиохимического метода на реакторе ПИК

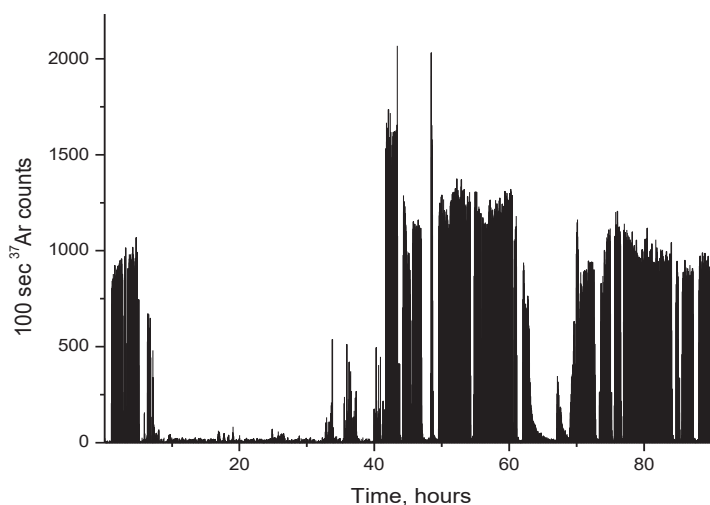
Чтобы оценить преимущества радиохимического нейтронного монитора в АЗ, необходимо определить скорость счета распадов пропорционального счетчика 16 на рис. 1.

В стационарном режиме облучения ампулы (при постоянном потоке ионизирующего излучения  $\Phi$  и постоянном расходе  $L_{\text{He}}$  газа-носителя) вся вновь образовавшаяся активность сверх равновесной удаляется из объема ампулы потоком газа-носителя. Поэтому ско-

рость счета распадов в смеси радиоактивного газа с газом-носителем связана с потоком ионизирующего излучения известным [9] соотношением:

$$I = \frac{\rho_n V_a P_c N_A \lambda_{37} \sigma_{(n,\alpha)} \Phi V_c}{M_{CaC_2O_4} L_{He}}. \quad (1)$$

В выражении (1) использованы следующие обозначения:  $I$  – количество распадов в секунду радиоактивного инертного газа в счетчике;  $\rho_n = 1 \text{ г/см}^3$  – плотность насыпного порошка оксалата кальция в ампуле;  $V_a$ ,  $V_c$  – рабочий объем в  $\text{см}^3$  ампулы и счетчика соответственно;  $P_c$  – давление в счетчике в физических атмосферах;  $N_A$  – число Авогадро;  $\lambda_{37} = 3 \times 10^6 \text{ с}$  – постоянная распада инертного радиоактивного  $^{37}\text{Ar}$ ;  $\sigma_{(n,\alpha)} = 2.0 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$  – усредненное по нейтронному спектру сечение ядерной реакции  $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)^{37}\text{Ar}$  образования радиоактивного инертного газа  $^{37}\text{Ar}$ ;  $\Phi$  – нейтронный поток (нейтрон/ $\text{см}^2/\text{с}$ ),  $M_{CaC_2O_4} = 128$  – молекулярная масса оксалата кальция;  $L_{He}$  – расход транспортного газа He,  $\text{см}^3/\text{с}$ . Выражение (1) применимо при  $V_a/L_{He} \ll 1/\lambda_{37}$ . Вычисления с помощью соотношения (1) показывают, что с помощью радиохимического монитора нейтронного пучка в центре АЗ можно контролировать нейтронный поток, используя микроампулу с оксалатом кальция буквально точечных размеров. Данные по скорости счета микроампулы в зависимости от объема микроампулы  $V_a$  и расхода транспортного газа  $L_{He}$  для потока быстрых нейтронов  $\Phi = 1.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  с энергией  $E > 0,8 \text{ МэВ}$  в центре АЗ реактора ПИК представлены на рис. 4.



**Рис. 3. Иллюстрация мониторинга нейтронного потока с помощью проточного газового радиохимического детектора на установке РАДЭКС ИЯИ РАН [15].**

Темные области соответствуют наличию нейтронного потока, светлые – его отсутствию

Как можно видеть, значения скорости счета распадов радиоактивного аргона существенно ниже достигнутого в настоящее время максимального уровня в 125 кГц. При увеличении расхода транспортного газа  $L$  и уменьшении объема ампулы детектора  $V_a$  скорость счета распадов уменьшается. Данные обстоятельства являются благоприятными для регистрации

рекордных нейтронных потоков в центрах АЗ высокопоточных ядерных реакторов, причем эти потоки могут быть зарегистрированы чрезвычайно малыми, буквально точечными детектирующими ампулами. Например, при диаметре ампулы детектора и ее высоте в 1 см объем ампулы составит  $\pi/4 \text{ см}^3$ , при этом ее легко можно будет перемещать в экспериментальном канале высокопоточного ядерного реактора. Тогда, как видно из рис. 4 и соотношения (1), при расходе транспортного газа  $L = 1 \text{ см}^3/\text{с}$  скорость счета распадов составит 27 кГц. Длина газового тракта представляет собой расстояние от места расположения ампулы нейтронного детектора в АЗ до места расположения проточного счетчика распадов. При этом время задержки сигнала из-за движения по газовому тракту длиной  $L_T = 1000 \text{ см}$  по трубкам внутренним диаметром  $d = 0,1 \text{ см}$  составит  $\tau \sim \pi d^2 L_T / L_{\text{He}} = 2,5 \text{ пс}$ . С увеличением расхода транспортного газа уменьшается время задержки. Уменьшение габаритов ампулы детектора ограничивается только возможностью механического крепления подводящих труб. В качестве материала ампулы и трубок газового тракта предполагается использовать нержавеющую сталь или алюминиевый сплав, который менее подвержен активации.

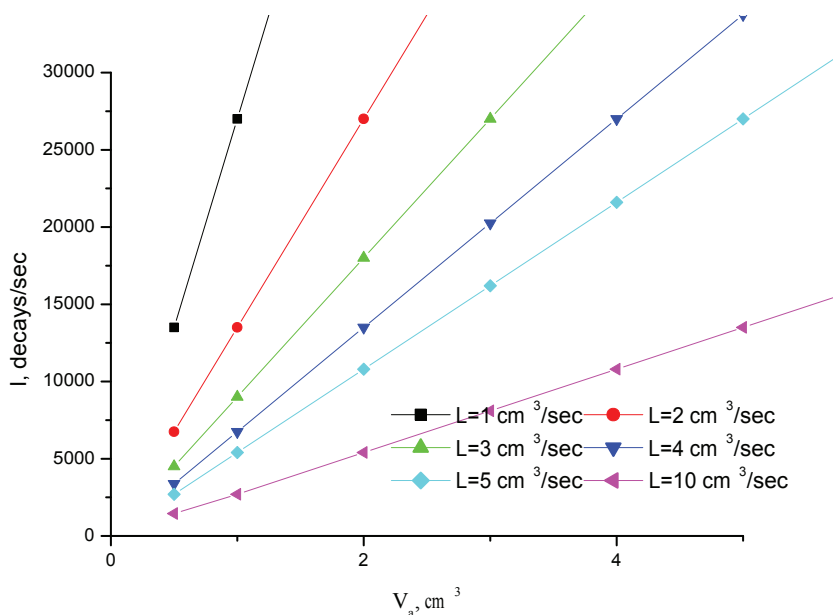


Рис. 4. Семейство зависимостей скорости счета распадов  $I$  от объема ампулы детектора  $V_a$  для различных значений расхода транспортного газа  $L$

Как минимум один фактор определяет ресурс детектора — выгорание  $\text{CaC}_2\text{O}_4$ . Рассмотрим его более подробно: выгорание  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  за счет ядерной реакции. Произведем оценку флюэнса до выгорания. Зафиксируем долю выгоревшего активного вещества  $\phi = 10\%$ , тогда  $\phi = \Phi \sigma t = 2 \cdot 10^{-26} \Phi t$ . Тогда получаем, что значение флюэнса  $\Phi t = 0,5 \cdot 10^{25} \text{ н/см}^2$ . Это соответствует времени облучения  $t \sim 10^9 \text{ с}$ , или 27 годам.

### Обсуждение

Радиохимический газовый нейтронный монитор представляет собой принципиально новый нейтронный детектор с простой конструкцией, не содержащей механических элементов. Детектирующая ампула заполнена порошкообразным активным веществом — оксалатом кальция  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  — с высокой температурой разложения (около  $350^\circ \text{C}$ ). Образовавшийся в результате  $(n, \alpha)$ -ядерной реакции инертный радиоактивный газ  $^{37}\text{Ar}$  легко выходит из

кристаллической структуры оксалата кальция и не взаимодействует с элементами газового тракта. Счетчик распада расположен удаленно за биологической защитой и соединен с ампулой детектора газовым трактом. Это решение позволяет значительно снизить фоновую загрузку счетчика. Фоновые процессы снижаются также за счет использования специфической ядерной реакции  $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)^{37}\text{Ag}$  по принципу «ключ – замок». Так, в активной зоне ядерного реактора находятся металлические (алюминиевые или нержавеющей) ампулы и трубки газового тракта, порошок оксалата кальция, а также транспортный инертный газ гелий. Относительно высокая скорость распадов  $^{37}\text{Ag}$  позволяет резко уменьшить размер детектирующей ампулы до  $\pi\text{ см}^3$  и поместить ее свободно, например, в центральном экспериментальном канале реактора ПИК диаметром  $\sim 80\text{ мм}$ . В этом случае возможно измерение нейтронного потока в нескольких точках по диаметру канала (около 8 точек), а также по всему каналу по его высоте. Пространственное разрешение детектора составляет около 1 см, чего нет у других типов детекторов. Например, минимальные размеры камеры деления составляют 5 см в диаметре и 30 см в длину [17]. Размещение камер деления в канале высокопоточного реактора проблематично из-за высокого фона, нестабильности электрических контактов, а также из-за слишком большого сечения взаимодействия нейтронов с делящимся веществом (тысячи барн) и высокой скорости распада, когда происходит наложение спонтанных альфа-распадов. Использование камер деления с очень небольшим количеством делящегося материала дает очень низкий ток в условиях высокого фона. Сечение взаимодействия  $^{40}\text{Ca}$  с нейтронами составляет около 0,2 барн, что позволяет в широких пределах управлять размерами и чувствительностью детектора. Детектор имеет свои недостатки, такие как временная задержка из-за движения транспортного газа по газовому тракту. Данный монитор нельзя использовать для оперативного контроля ядерного реактора, однако он позволяет получить информацию о таких процессах в центре активной зоны, как распределение плотности потока нейтронов по радиусу и длине нейтронного канала, выгорание топлива в центральных ТВЭЛ. Поскольку реакторы ПИК, ГФР, ВФИР и ФРМ – водоохлаждаемые с кипением, температура в центральной зоне не превышает  $200^\circ\text{C}$ , а температура в рабочей камере ИТЭР составляет  $150\text{--}200^\circ\text{C}$  [18],  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  порошок можно использовать без деградации.

### Заключение

Радиохимический газовый нейтронный монитор представляет собой принципиально новый нейтронный детектор с простой конструкцией, не содержащей механических элементов. Детектирующая ампула заполнена порошкообразным активным веществом оксалатом кальция  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  с высокой температурой разложения – около  $350^\circ\text{C}$ . Образовавшийся в результате  $(n,\alpha)$ -ядерной реакции инертный радиоактивный газ  $^{37}\text{Ag}$  легко выходит из кристаллической структуры оксалата кальция и, в силу инертности  $^{37}\text{Ag}$ , не взаимодействует с элементами газового тракта.

Счетчик распада расположен удаленно за биологической защитой и соединен с ампулой детектора газовым трактом. Это решение позволяет значительно снизить фоновую загрузку счетчика.

Пространственное разрешение детектора составляет около 1 см, чего нет у других типов детекторов.

Детектор имеет свои недостатки, такие как временная задержка из-за движения транспортного газа по газовому тракту, поэтому рассматриваемый монитор нельзя использовать для оперативного контроля ядерного реактора; однако он позволяет получить информацию о таких процессах в центре активной зоны, как распределение плотности потока нейтронов по радиусу и длине нейтронного канала, выгорание топлива в центральных ТВЭЛ.



### Список литературы

1. Ковальчук М.В., Смольский С.Л., Коноплев К.А. Исследовательский реактор ПИК // Кристаллография. 2021. № 66 (2). С. 184–190.
2. Claessens M. (2020). ITER: the giant fusion reactor. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
3. Krivshich A., Ilyin D., Hall-Wilton R. Strategy of Equipping the PIK Reactor Experimental Stations with Detection Systems // IAEA TECDOC SERIES, 2020, 251.
4. Ковальчук М.В., Воронин В.В., Григорьев С.В., Серебров А.П. Приборная база реактора ПИК // Кристаллография. 2021. № 66 (2). С. 191–213.
5. High-flux Reactor at Petten // Nature 1961, 192, 708.
6. Rush J.J. US Neutron Facility Development in the Last Half-Century: A Cautionary Tale. Phys // Perspect, 2015, 17, 135–155.
7. Axmann A., Böning K., Rottmann M. FRM-II: The new German research reactor // Nuclear engineering and design, 1997, 178 (1), 127–133.
8. Hassanein A., Sizyuk V. Potential design problems for ITER fusion device // Scientific Reports, 2021, 11 (1), 1–11.
9. Abdurashitov D.N., Koptelov E.A., Lebedev S.G., Yants V.E. A gaseous radiochemical neutron monitor // Instruments and Experimental Techniques, 2004, 47 (3), 294–299.
10. Lebedev S.G., Akulinichev S.V., Iljinov A.S., Yants V.E. A gaseous radiochemical method for registration of ionizing radiation and its possible applications in science and economy // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2006, 561(1), 90–99.
11. Lebedev S.G., Yants V.E. Radiochemical detector of spatial distribution of neutron flux density in nuclear reactor. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 916, 83–86.
12. Lebedev S.G., Yants V.E. State-of-the-art progress of gaseous radiochemical method for detecting of ionizing radiation // Nuclear Engineering and Technology, 2021, 53 (7), 2075–2083.
13. Lebedev S.G., Yants V.E. High-speed gas neutron detector for thermometry of thermonuclear plasma // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 945, 162633.
14. Лебедев С.Г. (2025). Патент РФ № 2834904 «Способ мониторингования нейтронного потока в высокопоточных ядерных установках».
15. Петров Ю.В., Ерыкалов А.Н., Котова Л.М., Онегин М.С., Сахновский Э.Г. (2003) Реактор ПИК-2 с пониженным расходом высокообогащенного урана. Атомная энергия, 95(4), 261–270.
16. Koptelov E.A., Lebedev S.G., Sobolevsky N.M., Strebkov Y.S., Subbotin A.V. (2002) Radiation damage parameters for modelling of FRM irradiation conditions at the RADEX facility of INR RAS. Journal of nuclear materials, 307, 1042–1046.

### References

1. Kovalchuk M.V., Smolsky S.L., Konoplev K.A. (2021) *Issledovatel'skiy reaktor PIK* [Research reactor PIK] *Kristallografiya* [Crystallography]. No. 66 (2). P. 184–190.
2. Claessens M. (2020) ITER: the giant fusion reactor. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
3. Krivshich A., Ilyin D., Hall-Wilton R. (2020) Strategy of Equipping the PIK Reactor Experimental Stations with Detection Systems. IAEA TECDOC SERIES. 251.
4. Kovalchuk M.V., Voronin V.V., Grigoriev S.V., Serebrov A.P. (2021) *Pribornaya baza reaktora PIK* [Instrument base of the PIK reactor] *Kristallografiya* [Crystallography]. No. 66 (2). P. 191–213.
5. High-flux Reactor at Petten. Nature 1961, 192, 708.
6. Rush J.J. US Neutron Facility Development in the Last Half-Century: A Cautionary Tale. Phys. Perspect, 2015, 17, 135–155.

7. Axmann A., Böning K., Rottmann M. FRM-II: The new German research reactor. Nuclear engineering and design, 1997, 178 (1), 127–133.
8. Hassanein A., Sizyuk V. Potential design problems for ITER fusion device. Scientific Reports, 2021, 11 (1), 1–11.
9. Abdurashitov D.N., Koptelov E.A., Lebedev S.G., Yants V.E. A gaseous radiochemical neutron monitor. Instruments and Experimental Techniques, 2004, 47 (3), 294–299.
10. Lebedev S.G., Akulinichev S.V., Iljinov A.S., Yants V.E. (2006) A gaseous radiochemical method for registration of ionizing radiation and its possible applications in science and economy. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 561(1). 90–99.
11. Lebedev S.G., Yants V.E. (2019) Radiochemical detector of spatial distribution of neutron flux density in nuclear reactor. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 916. 83–86.
12. Lebedev S.G., Yants V.E. (2021) State-of-the-art progress of gaseous radiochemical method for detecting of ionizing radiation. Nuclear Engineering and Technology. 53 (7). 2075–2083.
13. Lebedev S.G., Yants V.E. (2019) High-speed gas neutron detector for thermometry of thermonuclear plasma. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 945. 162633.
14. Lebedev S.G. (2025) Patent RF No. 2834904 «Sposob monitorirovaniya neytronnogo potoka v vysokopotochnykh yadernykh ustanovkakh» [RF Patent No. 2834904 «Method for monitoring neutron flux in high-flow nuclear installations»].
15. Petrov Yu.V., Erykalov A.N., Kotova L.M., Onegin M.S., Sakhnovsky E.G. (2003) Reaktor PIK-2 s ponizhennym raskhodom vysokoobogashchennogo urana [PIK-2 reactor with reduced consumption of highly enriched uranium] Atomnaya energiya [Atomic Energy], 95(4), P. 261–270.
16. Koptelov E.A., Lebedev S.G., Sobolevsky N.M., Strebkov Y.S., Subbotin A.V. (2002) Radiation damage parameters for modelling of FRM irradiation conditions at the RADEX facility of INR RAS. Journal of nuclear materials, 307, 1042–1046.