

Теории, концепции, парадигмы

Theories, Conceptions, Paradigms /
Theorien, Konzeptionen, Paradigmen

УДК 53.06

DOI 10.24411/2227-9490-2018-11024



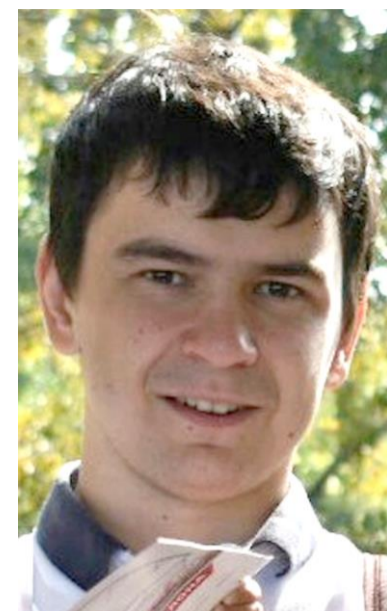
Ю.Д. Кацер



В.О. Козицин



К.И. Коцоев



А.Ю. Фролов

Кацер Ю.Д.*,
Козицин В.О.**,
Коцоев К.И.***,
Фролов А.Ю.****

Исследование влияния объектов различной геометрии и из различных материалов на рассеяние нейтронов

*Кацер Юрий Дмитриевич, инженер-физик (ядерные реакторы и материалы), аспирант, Сколковский институт науки и технологий

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-5468-4079>

E-mail: yuriy-d-katser@j-spacetime.com; katseryuriy@gmail.com

**Козицин Вячеслав Олегович, инженер-физик (ядерные реакторы и материалы), аспирант, Сколковский институт науки и технологий

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-0770-9798>

E-mail: vyacheslav-o-kozitsin@j-spacetime.com; rfptk2525@yandex.ru

***Коцоев Константин Игоревич, инженер-физик (ядерные реакторы и материалы), аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-5081-8818>

E-mail: konstantin-i-kotsoev@j-spacetime.com; kotsoevk@mail.ru

****Фролов Алексей Юрьевич, инженер-физик (ядерные реакторы и материалы), аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-1965-7339>

E-mail: alexey-yu-frolov@j-spacetime.com; rfptk2525@yandex.ru

Высокоэнергетические нейтроны, ввиду отсутствия у них заряда, обладают большой проникающей способностью. Проходя через некоторый объект и взаимодействуя с ядрами его вещества, нейтроны рассеиваются, то есть изменяют направление движения, и теряют часть кинетической энергии. В зависимости от геометрии и материала исследуемого объекта получаются разные картины рассеянных нейтронов. В перспективе возможно появление компактных нейтронных детекторов, на основе которых можно будет создавать нейтроночувствительные поверхности. Это позволит получать картины пространственного распределения нейтронов, рассеянных при прохождении через предметы. В данной работе с помощью ПК MCU-FREE были получены и проанализированы флюенсы нейтронов с гипотетических нейтроночувствительных поверхностей. Нейтроны рассеивались на объектах различных форм и из различных материалов. В работе продемонстрировано влияние геометрии исследуемого объекта и его материала на картину рассеяния нейтронов.

Ключевые слова: флюенс; нейтроны; нейтроночувствительные поверхности; спектр нейтронов; рассеяние нейтронов.

Введение

Как известно, нейтроны, ввиду отсутствия у них заряда, обладают большой проникающей способностью для широкого диапазона материалов, включая тяжёлые, такие как железо и бетон. Чем выше энергия нейтрона, тем сильнее проявляется это свойство. Следовательно, нейтроны с большой энергией могут позволить решать задачи восстановления формы и материала объекта, к которому нет доступа, при этом размеры исследуемого объекта могут исчисляться метрами. Но из-за большой проникающей способности проблема детектирования и измерения спектра рассеянных нейтронов достаточно сложна.

Для объяснения описанных явлений рассмотрим пример. У точечного моноэнергетического изотропного источника в направлениях вылета нейтронов выделим некоторый малый телесный угол $\delta\Omega$ (**рис. 1**). В пределах этого угла будем считать, что нейтроны движутся мононаправленно и перпендикулярно некоторой преграде толщиной ΔH .

КАЦЕР Ю.Д., КОЗИЦИН В.О., КОЦОВ К.И., ФРОЛОВ А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ И ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ

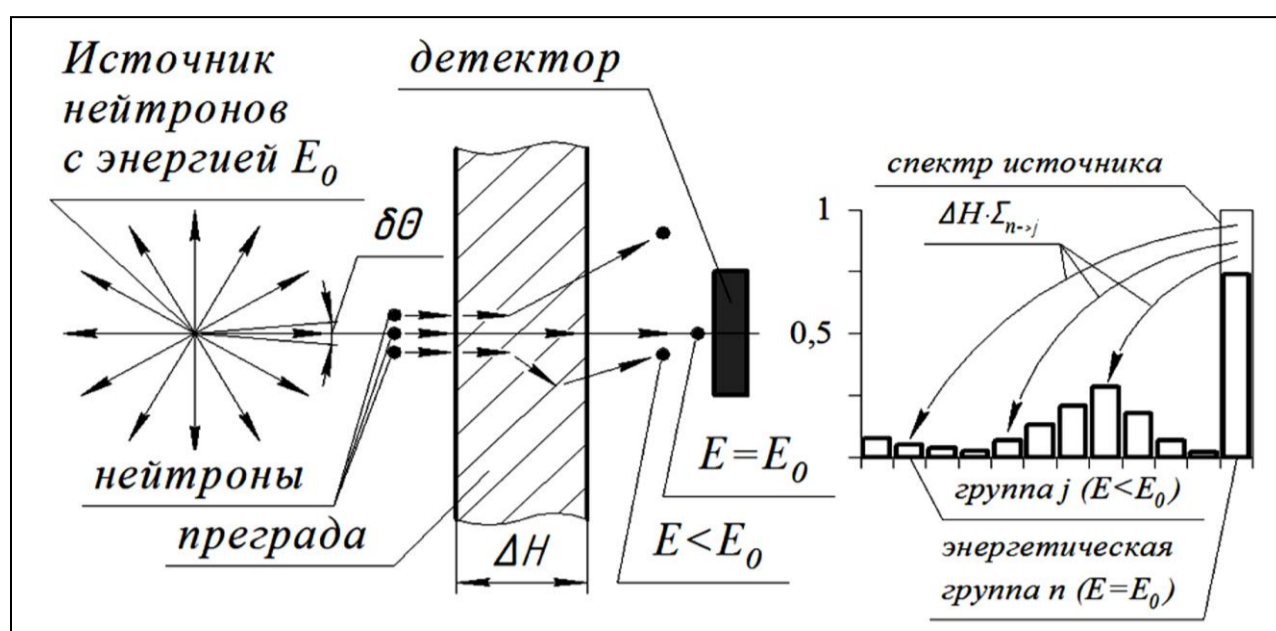


Рис. 1. Схема прохождения нейтрона через преграду определенной формы и толщины.

При прохождении через преграду часть нейтронов не испытывает столкновений с ее ядрами, а другая часть сталкивается, часто — неоднократно. До детектора долетает некоторое количество рассеянных и нерассеянных нейтронов. При рассеянии нейтрон теряет часть своей энергии ($E < E_0$) и переходит в нижележащую энергетическую группу (i). Вероятность рассеяния определяется по формуле (1) и зависит от толщины (ΔH), ядерной концентрации (N) материала преграды и микросечения выведения из группы n в группу j ($\sigma_{n \rightarrow j}$).

$$P = 1 - e^{-\Delta H \cdot N \cdot \sigma_{n \rightarrow j}} = 1 - e^{-\Delta H \cdot \Sigma_{n \rightarrow j}} \quad (1)$$

Каждый материал характеризуется своим набором микросечений выведения из группы i в группу j $\sigma_{n \rightarrow j}$. Вследствие этого вид энергетического спектра нейтронов за преградой фиксированной толщины зависит от материала этой преграды.

Если увеличивать толщину преграды (рис. 2), то энергетический спектр нейтронов деформируется. А именно, некоторое количество нейтронов из вышележащих энергетических групп перейдет в нижележащие группы. Изменение спектра также зависит от индивидуального для каждого материала набора микросечений $\sigma_{n \rightarrow j}$.

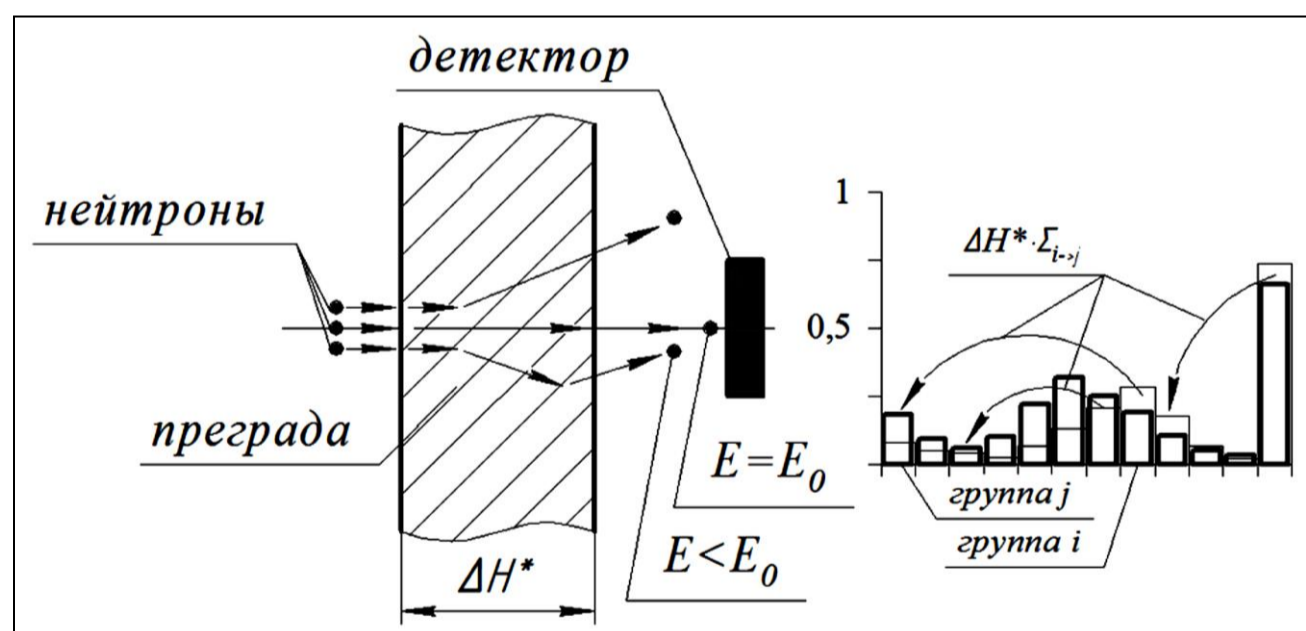


Рис. 2. Схема прохождения нейтрона через преграду определенной формы и увеличенной толщины.

При изменении формы преграды, например, если отсечь её часть (рис. 3), некоторые нейтроны вылетают из неё и не долетают до датчика. Таким образом, детектор фиксирует меньший флюенс. Однако если разместить не один датчик, а целую серию, то можно зафиксировать утерянные нейтроны, и таким образом судить о форме преграды.

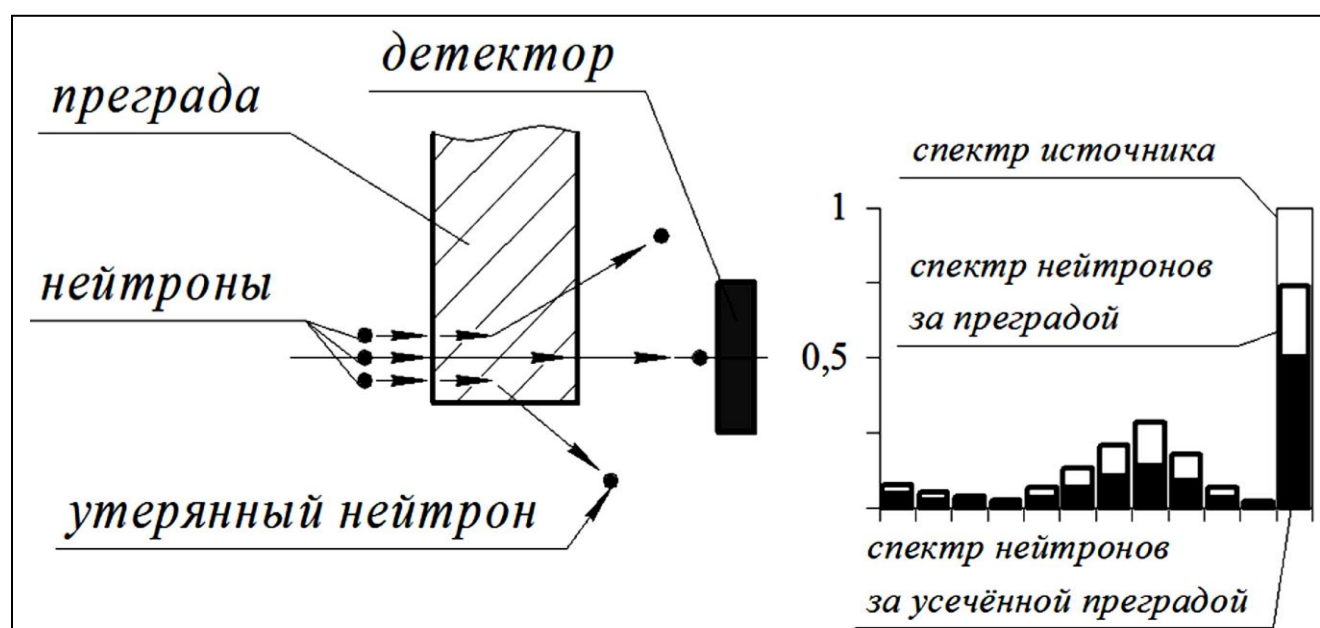


Рис. 3. Схема прохождения нейтрона через преграду определенной толщины и измененной формы.

КАЦЕР Ю.Д., КОЗИЦИН В.О., КОЦОВ К.И., ФРОЛОВ А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ И ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ

На современном этапе развития нейтронных детекторов можно допустить существенный прогресс в решении данной проблемы в обозримом будущем. В работе [Микеров 2002] продемонстрирована возможность высокоточного измерения нейтронных потоков в широком энергетическом диапазоне с помощью детекторов на базе приборов с зарядовой связью (ПЗС-детекторы). Некоторыми из важнейших свойств этих детекторов являются: малые размеры (рабочая площадь — 10×10 мм) и возможность работы в режиме on-line. Наличие этих свойств у детекторов позволит собирать компактные нейтроночувствительные детектирующие поверхности. Эти поверхности можно будет использовать для составления картины рассеянных нейтронов, пролетающих через исследуемый объект. В качестве источника нейтронов можно использовать электрофизическую конденсаторную установку КПУ-200 с газом дейтерия, ее достоинствами являются простота, точное место генерации моноэнергетических нейтронов, транспортабельность и доступность [Маслов и др. 2014] или другие подходящие установки, обзор на которые приведен в [Tang, Rusnak 2009]. Используя полученную информацию о рассеянии, можно определять геометрический вид и материал объекта.

Целью данной работы является демонстрация принципиальной возможности первоначального анализа получаемой с гипотетической нейтроночувствительной поверхности информации о нейтронах, прошедших через определённые объекты из определённых материалов. Показано существенное влияние геометрии исследуемого объекта и его материала на общую картину рассеянных нейтронов. Сделаны выводы о дальнейших путях исследования вопроса обработки данных с таких детекторов с целью поиска способов восстановления информации об объектах.

Постановка задачи

В рамках этой работы были поставлены следующие задачи:

- доказать возможность определения размеров и формы объекта, через который пропускается мононаправленный пучок нейтронов;
- установить характерные зависимости рассеяния нейтронов от материала.

Для рассмотрения данных проблем моделировалось рассеяние нейтронов на объектах небольших геометрических размеров (10–15 см) в ограниченном пространстве малых размеров — 20×20×20 см. Были выбраны объекты следующих геометрий: шар, куб, пирамида с квадратным основанием, выполненные из следующих материалов: вода, алюминий, железо, медь.

Для моделирования процессов переноса нейтронов через исследуемые объекты использовался ПК MCU-FREE [Гуревич, Шкаровский 2012]. Схема моделирования представлена на рис. 4. В кубическую область с размерами ребра 20 см помещается исследуемый объект. На нижней грани куба расположен мононаправленный вверх, равномерно распределённый по этой грани источник нейтронов с энергией 2,5 МэВ. На верхней и боковых гранях расположены гипотетические нейтроночувствительные поверхности, каждая из которых состоит из 1600 пластинок с размерами 5×5×0,5 мм, лежащих большей гранью на поверхности куба. В результате расчётов были получены флюенсы через каждую пластину для 25 энергетических групп с шириной группы 0,1 МэВ.

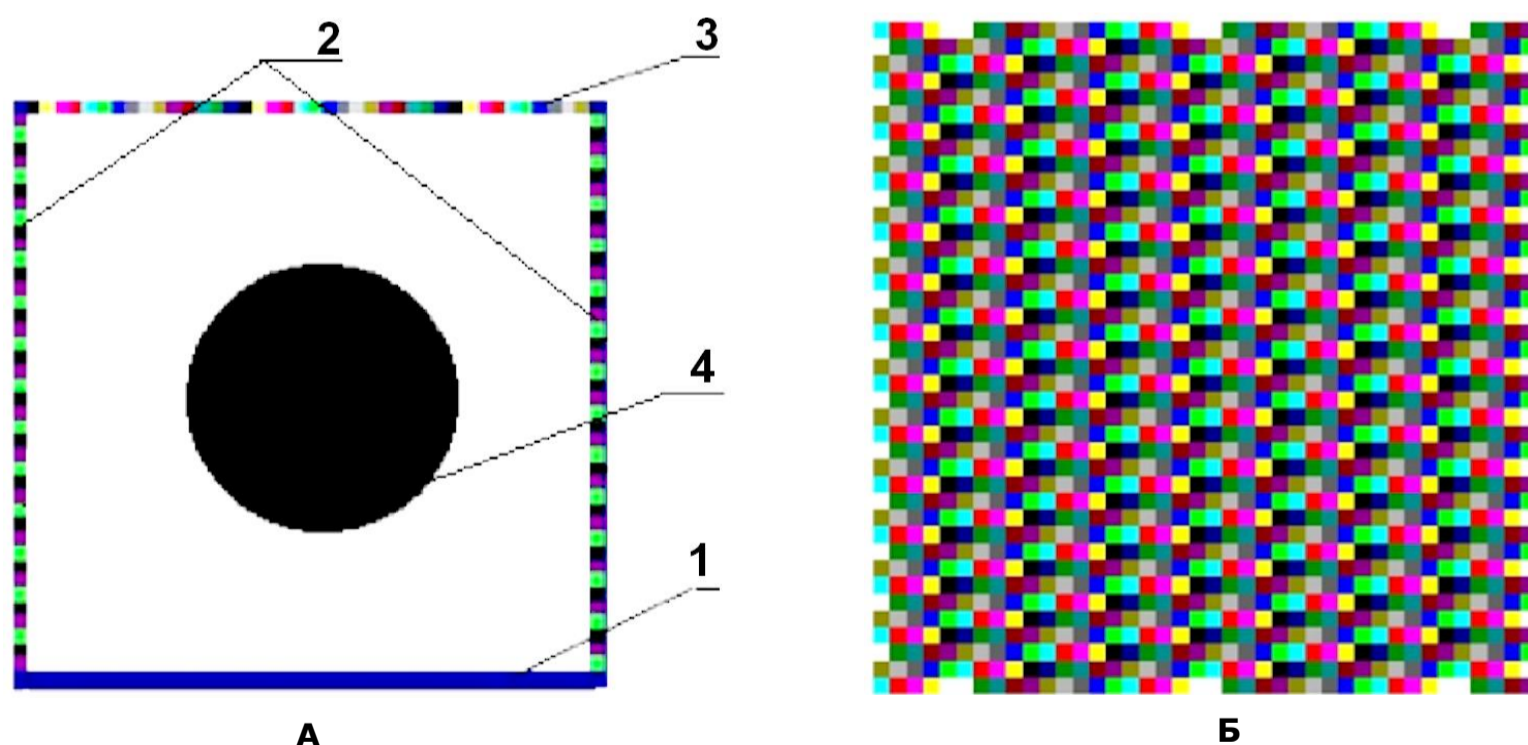


Рис. 4. Схема моделирования процессов переноса нейтронов через исследуемые объекты: **А** — вертикальный разрез кубического объёма с детектирующими поверхностями и источником (1 — плоский мононаправленный источник нейтронов; 2 — боковые детектирующие поверхности; 3 — верхняя детектирующая поверхность; 4 — исследуемый объект), **Б** — вид детектирующей поверхности (40×40 пластин)

В результате моделирования были получены диаграммы нормированных флюенсов (отношение величин флюенсов, пришедших на элемент детектора в присутствии исследуемого объекта и при его отсутствии) нейтронов разных энергий для гипотетических нейтроночувствительных поверхностей.

При определении влияния размеров объекта на рассеяние нейтронов были выбраны шары радиусами 3, 5, 7 см. На рис. 5 показаны диаграммы нормированных флюенсов, полученных при моделировании. Как видно из рис. 5, при увеличении размера шара падает интенсивность нейтронного потока, приходящегося на верхние нейтроночувствительные поверхности. Картина рассеянных нейтронов на боковой детектирующей пластине смещается к ее центру.

КАЦЕР Ю.Д., КОЗИЦИН В.О., КОЦОВ К.И., ФРОЛОВ А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ И ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ

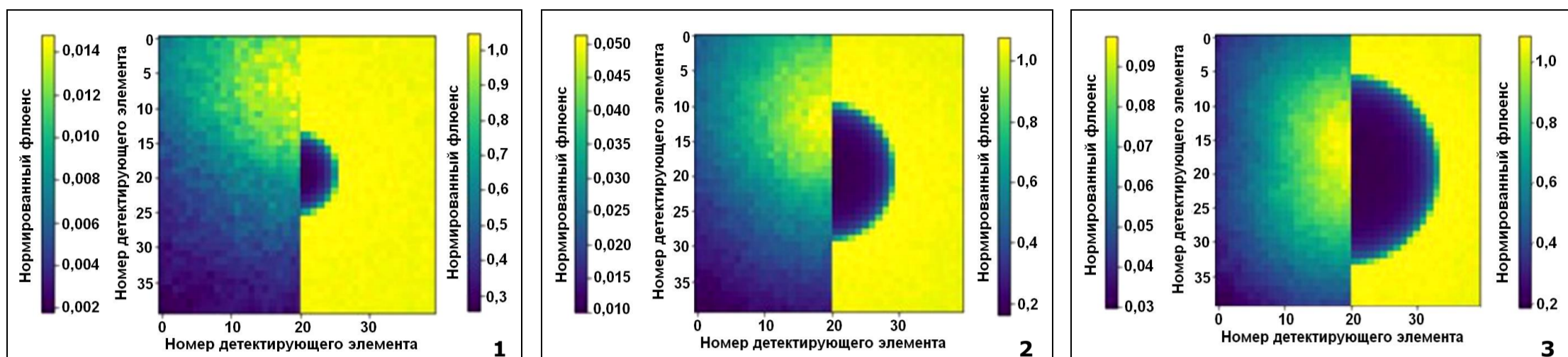


Рис. 5. Диаграммы нормированных флюенсов нейтронов для сфер различного радиуса: **1** — левая (слева) и верхняя (справа) нейтроночувствительные поверхности при радиусе сферы 3 см; **2** — левая и верхняя нейтроночувствительные поверхности при радиусе сферы 5 см; **3** — левая и верхняя нейтроночувствительные поверхности при радиусе сферы 7 см

Далее было исследовано влияние формы исследуемого объекта на картину рассеяния и на флюенс нейтронов. На **рис. 6** приведены диаграммы флюенса нейтронов на детектирующих поверхностях и графики флюенсов нейтронов на осях симметрии диаграмм.

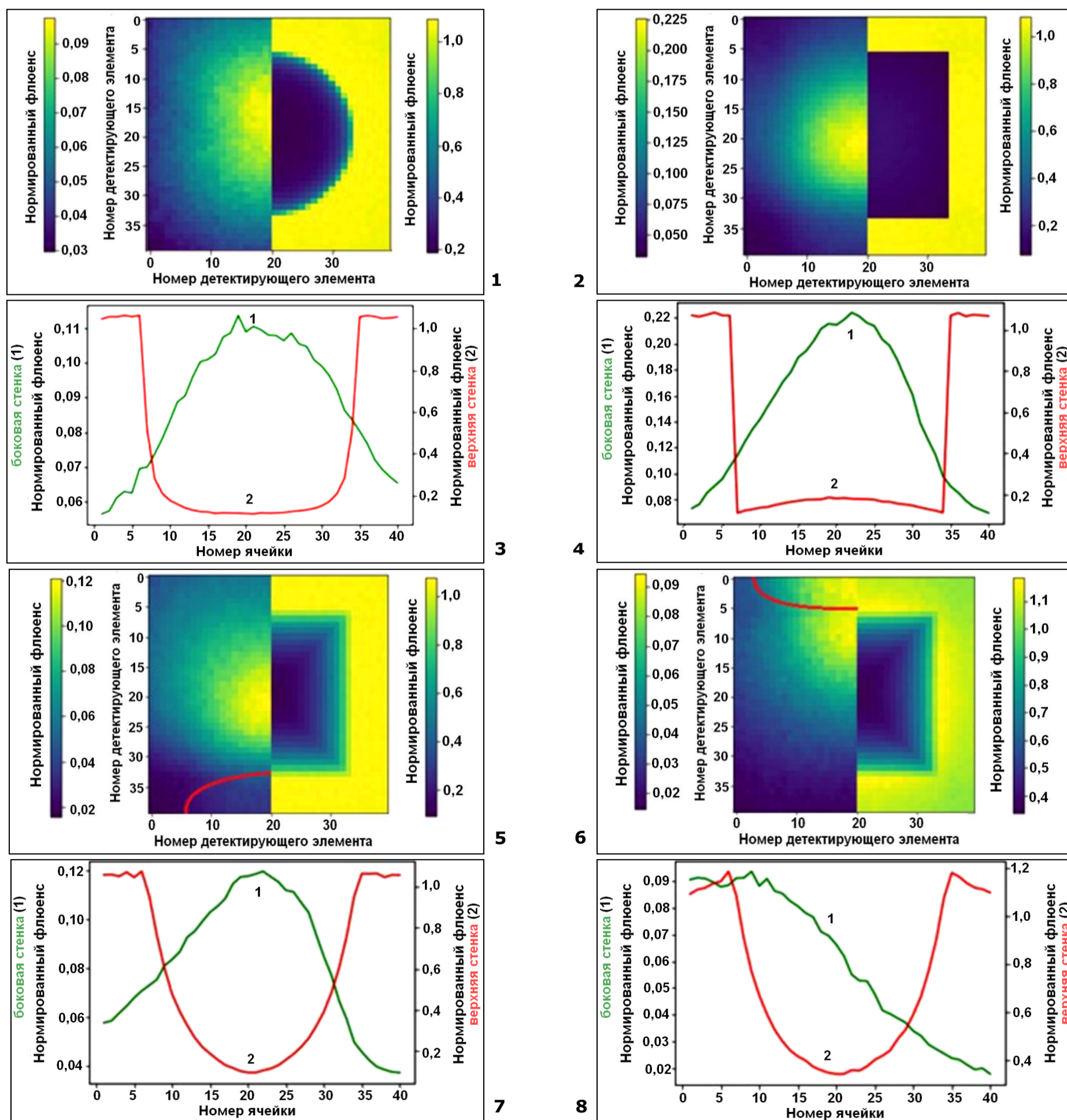


Рис. 6. Диаграммы и графики нормированного флюенса нейтронов: **1, 3** — сфера радиусом 7 см; **2, 4** — куб со стороной 14 см; **5, 7** — пирамида с квадратным основанием стороной 14 см, вершиной вверх; **6, 8** — пирамида с квадратным основанием стороной 14 см, вершиной вниз

КАЦЕР Ю.Д., КОЗИЦИН В.О., КОЦОВ К.И., ФРОЛОВ А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ И ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ

По графикам флюенса видно, что количество нейтронов, попадающих на детектирующие поверхности, зависит от формы объекта. При монотонном изменении толщины пропускающей нейтроны части объекта, как в сфере, наблюдается монотонная зависимость величины флюенса от номера детектирующей ячейки. При резком изменении толщины, как в кубе, картина имеет ступенчатый вид. Следовательно, по верхней детектирующей пластине, на которой фактически изображена «тень» объекта, можно определить его характерный размер. А по картине рассеяния на боковой детектирующей поверхности можно определить координаты центра фигуры, которые соответствуют пику на графиках нормированных флюенсов.

Из **рис. 6.5** и **6.6** видна зависимость картины рассеянных нейтронов от ориентации объекта в пространстве. Для пирамиды, основание которой ориентировано вниз, наблюдается заметный след в средней части картины с боковой поверхности, и менее заметный след от основания в нижней части (выделен красным). А для перевернутой пирамиды след от боковых поверхностей смещён вверх, и имеется более явный след от основания (выделен красным).

На **рис. 7** показаны диаграммы флюенсов, получаемые при рассеянии нейтронов на сферах радиусом 7 см, изготовленных из различных материалов.

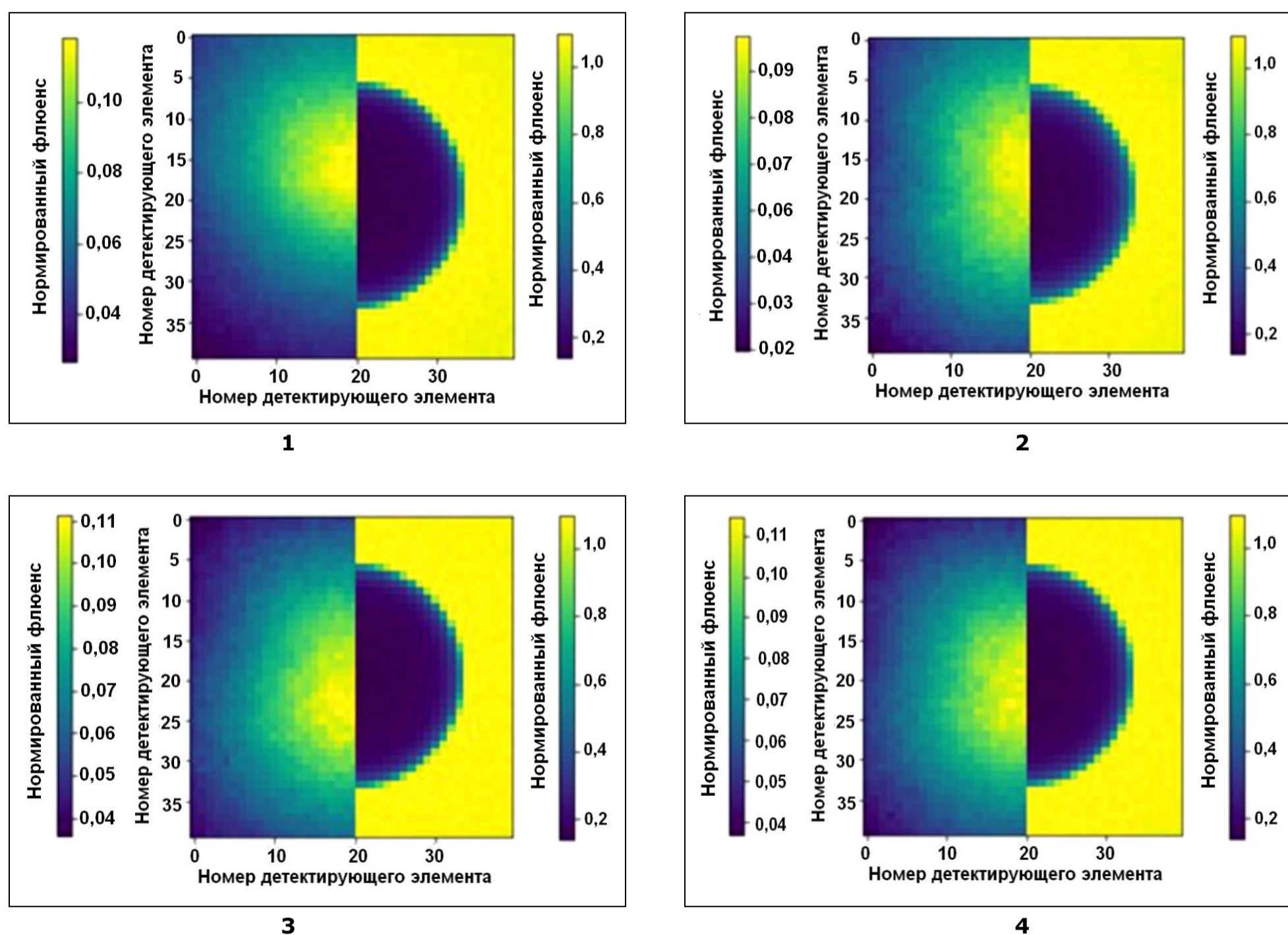


Рис. 7. Диаграммы флюенса нейтронов для сфер, изготовленных из различных материалов:
1 — алюминий; **2** — вода; **3** — медь; **4** — железо

Для сфер из легких материалов, таких как вода и алюминий, центр изображений с боковых детекторов смещается в верхнюю часть пластины. При увеличении атомного числа материала центр изображений смещается в противоположную сторону. Это является следствием того, что при увеличении массы ядер, из которых состоит материал, увеличивается средний угол отклонения траектории движения нейтронов при упругом рассеянии. Поэтому для более тяжелых материалов большее количество нейтронов рассеивается в сторону, противоположную направлению их начального движения.

Было промоделировано энергетическое перераспределение нейтронов, прошедших через изготовленные из различных материалов объекты разной толщины. На **рис. 8** приведены графики флюенса нейтронов на элементы детектора, расположенные за объектом. В качестве объекта для данного эксперимента выбрана перевернутая пирамида. Рассматривалось 25-групповое разбиение по энергиям, от 0 до 2,5 МэВ, с шагом 0,1 МэВ.

Из **рис. 8** видно, что флюенс нейтронов, приходящий на одну ячейку детектирующей поверхности, при уменьшении толщины объекта от максимума (в центре) до минимума (на краю) увеличивается в несколько раз. Кроме того, в зависимости от материала наблюдаются разные картины изменения спектра нейтронов.

КАЦЕР Ю.Д., КОЗИЦИН В.О., КОЦОВ К.И., ФРОЛОВ А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ И ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ

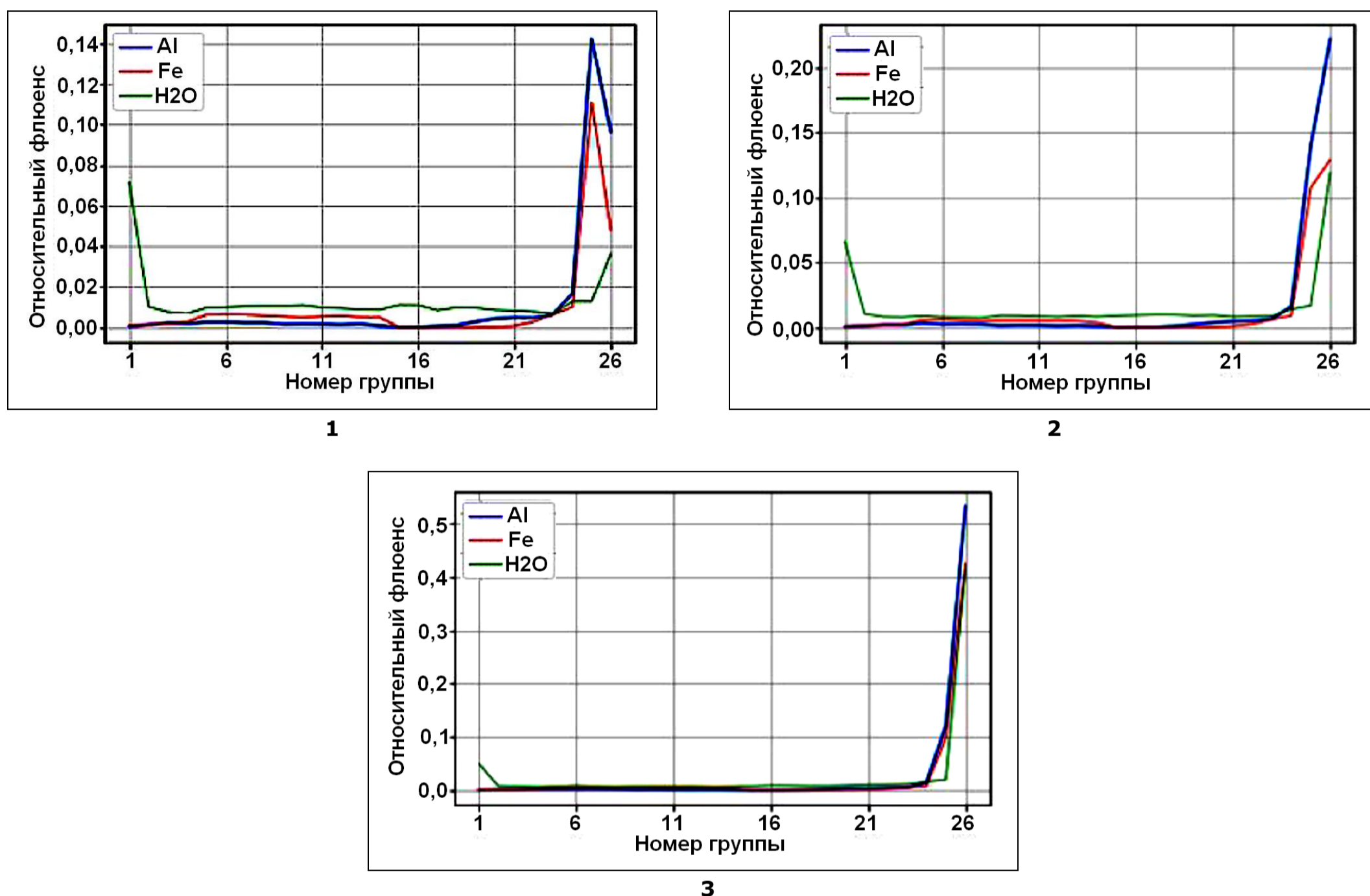


Рис. 8. Графики зависимости прохождения потока нейтронов через разные толщины объекта для разных материалов:
1 — детектирующий элемент, находящийся в центре пластины; **2** — шестой элемент от центра пластины;
3 — одиннадцатый элемент от центра пластины

Для железа и алюминия наблюдается малое количество нейтронов, замедленных до тепловых энергий, но большое количество нейтронов, с энергией близкой к первоначальной. А для более лёгкого материала спектр нейтронов имеет ярко выраженный максимум в области тепловых нейтронов. Это связано с величиной микросечений упругого рассеяния, которое, как известно, для воды (водорода и кислорода) больше чем для железа и алюминия. Таким образом, по величине изменения флюенса и энергетического спектра нейтронов можно судить о материале объекта.

Выводы

В результате выполнения данной работы продемонстрирована принципиальная возможность определения размеров, местоположения, формы и материала объектов, посредством обработки информации о рассеянных нейтронах, получаемых с перспективных детекторов в виде нейтроночувствительных поверхностей.

Для восстановления информации о форме, материале и месторасположении различных объектов необходимо формировать базы данных о характерных картинах рассеяния на них нейтронов. В перспективе подобный способ определения внутреннего содержимого труднодоступных предметов может быть полезен, например, при проведении спасательных работ на завалах с целью спасения людей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блохин А.И., Демин Н.А., Чернов В.М. Нейтронные источники для исследования конструкционных материалов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2006. № 1. С. 70–87.
2. Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 154 с.
3. Кутеев Б.В., Гончаров П.Р., Сергеев В.Ю., Хрипунов В.И. Мощные нейтронные источники на основе реакций ядерного синтеза // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 4. С. 307–346.
4. Лебедев В.Т., Лебедев В.М. Исследование надатомной структуры облученных образцов реакторных конструкционных материалов на основе сплавов алюминия методом малоуглового рассеяния нейтронов с использова-

КАЦЕР Ю.Д., КОЗИЦИН В.О., КОЦОВ К.И., ФРОЛОВ А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ И ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ

нием аппарата пространственных корреляционных функций. Отчет по программе фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН. М.: ПИЯФ РАН, 2011.

5. Маслов В.В., Румянцев В.Г., Басманов В.Ф., Будников Д.В., Гарин А.В., Дроздов И.Ю., Ершов Д.А., Коркин Д.С., Макеев Н.Г., Молодцев Д.А., Москвин Н.И., Назаренко С.Т., Петрушин О.Н., Фалин А.П., Юхневич В.А. Передвижная конденсаторная установка КПУ-200 // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 2. С. 43–47.
6. Микеров В.И. Нейтронные методы исследования надмолекулярной структуры вещества (Рефлектометрия, цифровая радиография и томография). Дисс. ... д. ф.-м. н. М., 2002. 205 с.
7. Микеров В.И., Андреев А.В., Житник И.А., Кошелев А.П., Макаров С.А., Тукарев В.А., Крутов В.В., Корнеев В.В., Кучин С.В., Перцов А.А. Реализация радиографии в быстрых нейтронах на стационарном нейтронном генераторе с помощью ПЗС – детектора // Приборы и техника эксперимента. 2000. № 2. С. 29–32.
8. Микеров В.И., Железов И.Н., Конашенков В.В., Тукарев В.А., Зайцев К.Н., Петров В.Н., Яковлев МХЛ Нейтронно-физический измерительный комплекс ДНМ-1 // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 1. С. 20–24.
9. Свергун Д.И., Фейгин Л.А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. М.: Наука, Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1986. 280 с.
10. Mikerov V.I., Isakov V.I., Koshelev A.P., Bykov A.A., Tukarev V.A., Khodeev V.I., Waschowski W. "Simulation of Artifacts Concerned with Neutron Scattering in Fast Neutron Radiography." *Nondestructive Testing and Evaluation* 16.2–6 (2001): 403–412.
11. Mikerov V.I., Waschowski W. "A Two-dimensional Detector for Fast Neutron Fields Imaging." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 424 (1999): 48–52.
12. Mikerov V.I., Zhitnik I.A., Ignat'ev A.P., Isakov A.A., Korneev V.V., Krutov V.V., Kuzin S.V., Oparin S.N., Pertsov A.A., Podolyak E.R., Sobel'man I.I., Tindo I.P., Tukarev V.A. "High-resolution Neutron Tomography." *Physica Scripta* 57 (1995): 190–195.
13. Mikerov V.I., Zhitnik I.A., Korneev V.V., Pertsov A.A., Tindo I.P., Ignatiev A.P., Tukarev V.A., Waschowski W. "A Two-Coordinate High-Resolution Detector for Registering Thermal Neutron Images." *J. Moscow Phys. Soc.* 2 (1992): 181–188.
14. Mikerov V.I., Zhitnik I.A., Barmakov Yu.N., Bogolubov E.P., Ryzhkov V.I., Koshelev A.P., Soshin N.P., Waschowski W., Lansa R., Hall J.M. "Prospects for Efficient Detectors for Fast Neutron Imaging." *Applied Radiation and Isotopes* 61.4 (2004): 529–535.
15. Tang V., Rusnak B. "Review of Dense Plasma Focus Technology for Intense and Directional Neutron Sources. LLNL-TR-401875." *Official Website of Lawrence Livermore National Laboratory*. Lawrence Livermore National Laboratory, 29 Feb. 2008. PDF-file. <<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/358470.pdf>>.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11–2011:

Кацер, Ю. Д., Козицин, В. О., Коцоев, К. И., Фролов, А. Ю. Исследование влияния объектов различной геометрии и из различных материалов на рассеяние нейтронов [Электронный ресурс] / Ю.Д. Кацер, В.О. Козицин, К.И. Коцоев, А.Ю. Фролов // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. — 2018. — Т. 16. — Вып. 1–2. — Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-aprov_r_e-ast16-1_2.2018.24. DOI 10.24411/2227-9490-2018-11024.

STUDY IN INFLUENCE OF VARIOUS GEOMETRIES AND VARIOUS MATERIALS OBJECTS ON NEUTRON SCATTERING

Yuriy D. Katser, M.Sc. (Nuclear Reactors and Materials), engineer-physicist, postgraduate student at Skolkovo Institute of Science and Technology

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-5468-4079>

E-mail: yuriy-d-katser@j-spacetime.com; katseryuriy@gmail.com

Vyacheslav O. Kozitsin, M.Sc. (Nuclear Reactors and Materials), engineer-physicist, postgraduate student at Skolkovo Institute of Science and Technology

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-0770-9798>

E-mail: vyacheslav-o-kozitsin@j-spacetime.com; rfptk2525@yandex.ru

Konstantin I. Kotsoev, M.Sc. (Nuclear Reactors and Materials), engineer-physicist, postgraduate student at Moscow Bauman State Technical University

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-5081-8818>

E-mail: konstantin-i-kotsoev@j-spacetime.com; kotsoevk@mail.ru

Alexey Yu. Frolov, M.Sc. (Nuclear Reactors and Materials), engineer-physicist, postgraduate student at Moscow Bauman State Technical University

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-1965-7339>

E-mail: alexey-yu-frolov@j-spacetime.com; rfptk2525@yandex.ru

High-energy neutrons, due to their lack of charge, have a great penetrating power. This fact allows using them, for example, to penetrate into containers without opening them. Passing through some object and interacting with the nuclei of its substance, neutrons scatter, change the direction of motion, and lose some of the kinetic energy. Depending on the geometry and material of the object being studied, different patterns of scattered neutrons are obtained. In the nearest future creation of compact neutron detectors will make possible to create neutron-sensitive surfaces. This will make it possible to obtain pictures of the spatial distribution of neutrons scattered as they pass through objects.

In our study, we obtained and analysed fluencies of neutrons registered on hypothetical neutron-sensitive surfaces using programming code MCU-FREE. We simulated neutrons' scattering at objects of small geometric dimensions (10–15 cm) of different geometries: a sphere, a cube, a pyramid with a square base in a confined space of small dimensions (20 × 20 × 20 cm). In our experiment, we used water, aluminium, iron and copper. As a result of the simulation, we obtained diagrams of normalized fluencies (the ratio of the fluencies that came to detector element in the presence of the object under study and in its absence) of neutrons of different energies for hypothetical neutron-sensitive surfaces. They clearly showed that as the size of the sphere increases, the intensity of the neutron flux falling on the upper neutron-sensitive surfaces decreases. The scattered neutron pattern on the lateral detection plate shifts to its center. Our experiment also showed the dependence of scattered neutron pattern on the object orientation in space. For a pyramid with downward oriented base, there is a noticeable trace in the middle of picture from the lateral surface, and a less noticeable trace from the bottom at the bottom. For inverted pyramid, the trail from side surfaces is shifted upward, and there is a more obvious trace from the base. For spheres of light materials, such as water and aluminum, the center of images from the side detectors is shifted to the top of the plate. As the atomic number of the material increases, the center of the images shifts in the opposite direction. We suppose this is a consequence of the fact that the average angle of deviation of the trajectory of neutron motion in elastic scattering increases with increasing the mass of nuclei that make up the material. Therefore, for heavier materials, more neutrons are scattered to the side opposite to the direction of their initial motion. We also simulate the energy redistribution of neutrons that have passed through objects of different thicknesses made of different materials. For iron and aluminum, we observed a small number of neutrons retarded to thermal energies, but a large number of neutrons, with an energy close to the original one. And for a lighter material, the neutron spectrum has a pronounced maximum in the region of thermal neutrons. We associate this with the value of the micro-cross sections for elastic scattering, which is known to be greater for water (hydrogen and oxygen) than for iron and aluminum. Thus, from the magnitude of the variation in the fluence and the energy spectrum of neutrons, one can judge the material of the object.

Thus, we demonstrated the possibility of determining the size, location, shape and material of the hidden objects, by processing information about neutrons scattering which is obtained from neutron-sensitive surfaces. We conclude that to restore information about the form, material and location of various objects, it is necessary to create databases on the characteristic patterns of scattering of neutrons by them. In the long term, such method could use, for example, to search for people under debris during rescue operations.

Keywords: neutrons; fluency; neutron-sensitive surfaces; neutron spectrum; neutron scattering.

References:

1. Blokhin A.I., Demin N.A., Chernov V.M.. "Neutron Sources for Studying Structural Materials." *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Materials Science and New Materials* 1 (2006): 70–87. (In Russian).
2. Gurevich M.I., Shkarovsky D.A. *Neutron Transport Calculation by Monte-Carlo Method According to MCU Code*. Moscow: National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute Publisher, 2012. 154 p. (In Russian).
3. Kuteev B.V., Goncharov P.R., Sergeev V.Yu., Khripunov V.I. "Powerful Neutron Sources Based on Nuclear Fusion Reactions." *Plasma Physics* 4 (2010): 307–346. (In Russian).
4. Lebedev V.T., Lebedev V.M. *Investigation of Super-atomic Structure of Irradiated Samples of Reactor-based Structural Materials Based on Aluminum Alloys by Small-angle Neutron Scattering Method Using Spatial Correlation Apparatus: Report on the Basic Research Program of the Physical Sciences Division of the Russian Academy of Sciences*. Moscow: RAS St. Petersburg Institute of Nuclear Physics Publisher, 2011. (In Russian).
5. Maslov V.V., Rumyantsev V.G., Basmanov V.F., Budnikov D.V., Garin A.V., Drozdov I.Ju., Ershov D.A., Korokin D.S., Makeev N.G., Molodtsev D.A., Moskvina N.I., Nazarenko S.T., Petrushin O.N., Falin A.P., Yukhnevich V.A. "KPU-200 Mobile Capacitor Unit." *Devices and Experimental Technique* 2 (2014): 43–47. (In Russian).
6. Mikerov V.I. *Neutron Methods for Studying Supramolecular Structure of Matter (Reflectometry, Digital Radiography and Tomography)*. Doctoral diss. Moscow, 2002. 205 p. (In Russian).
7. Mikerov V.I., Andreev A.V., Zhitnik I.A., Koshelev A.P., Makarov S.A., Tukarev V.A., Krutov V.V., Korneev V.V., Kuchin S.V., Pertsov A.A.. "Radiography Realization in Fast Neutrons on Stationary Neutron Generator by CCD Detector." *Apparatus and Experimental Technique* 2 (2000): 29–32. (In Russian).
8. Mikerov V.I., Isakov V.I., Koshelev A.P., Bykov A.A., Tukarev V.A., Khodeev V.I., Waschkowski W. "Simulation of Arti-

КАЦЕР Ю.Д., КОЗИЦИН В.О., КОЦОВЕВ К.И., ФРОЛОВ А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ И ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ

- facts Concerned with Neutron Scattering in Fast Neutron Radiography." *Nondestructive Testing and Evaluation* 16.2–6 (2001): 403–412.
9. Mikerov V.I., Waschowski W. "A Two-dimensional Detector for Fast Neutron Fields Imaging." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 424 (1999): 48–52.
 10. Mikerov V.I., Zhelezov I.N., Konashenok V.V., Tukarev V.A., Zaytsev K.N., Petrov V.N., Yakovlev M.L.. "DNM-I Neutron-physical Measuring Complex." *Devices and Experimental Equipment* 1 (1996): 20–24. (In Russian).
 11. Mikerov V.I., Zhitnik I.A., Ignat'ev A.P., Isakov A.A., Korneev V.V., Krutov V.V., Kuzin S.V., Oparin S.N., Pertsov A.A., Podolyak E.R., Sobel'man I.I., Tindo I.P., Tukarev V.A. "High-resolution Neutron Tomography." *Physica Scripta* 57 (1995): 190–195.
 12. Mikerov V.I., Zhitnik I.A., Korneev V.V., Pertsov A.A., Tindo I.P., Ignatiev A.P., Tukarev V.A., Waschowski W. "A Two-Coordinate High-Resolution Detector for Registering Thermal Neutron Images." *J. Moscow Phys. Soc.* 2 (1992): 181–188.
 13. Mikerov V.I., Zhitnik I.A., Barmakov Yu.N., Bogolubov E.P., Ryzhkov V.I., Koshelev A.P., Soshin N.P., Waschowski W., Lansa R., Hall J.M. "Prospects for Efficient Detectors for Fast Neutron Imaging." *Applied Radiation and Isotopes* 61.4 (2004): 529–535.
 14. Svergun D.I., Feygin L.A. *X-ray and Neutron Small-angle Scattering*. Moscow: Nauka Publisher, 1986. 156 p. (In Russian).
 15. Tang V., Rusnak B. "Review of Dense Plasma Focus Technology for Intense and Directional Neutron Sources. LLNL-TR-401875." *Official Website of Lawrence Livermore National Laboratory*. Lawrence Livermore National Laboratory, 29 Feb. 2008. PDF-file. <<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/358470.pdf>>.

Cite MLA 7:

Katser, Yu. D., V. O. Kozitsin, K. I. Kotsoev, and A. Yu. Frolov. "Study in Influence of Various Geometries and Various Materials Objects on Neutron Scattering." *Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time* 16.1–2 (2018). Web. <2227-9490e-aprov_rast16-1_2.2018.24>. DOI 10.24411/2227-9490-2018-11024. (In Russian).