

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.039

Дарья Андреевна Малыгина

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», студент кафедры ядерных реакторов и энергетических установок, Россия, Нижний Новгород, e-mail: darya.malygina.2002@mail.ru

Андрей Николаевич Семенов

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», начальник службы радиационной безопасности, Россия, Нижний Новгород, e-mail: semenenko7@yandex.ru

Сравнительный анализ расчетных и фактических нейтронных и гамма-полей нейтронного конвертора

Авторское резюме

Состояние вопроса. На настоящий момент такая установка как нейтронный конвертор представлена лишь в нескольких университетах нашей страны, что обуславливает малое количество научных работ по данной тематике и уникальность каждой из них. В связи с этим необходима инструментальная проверка результатов расчетов программного модуля DOT при решении задач на установках со сложной геометрией. Целью настоящего исследования является проверка соответствия расчетных (теоретических) значений, полученных в программном пакете DOT, с данными, полученными при проведении эксперимента.

Материалы и методы. Для получения фактических результатов использован поверенный дозиметр-радиометр. Для получения расчетных результатов использованы программные модули DOT-GEOM и DOT-III, а также вспомогательные программы ListinG и Surfer 7.0.

Результаты. В результате проведения эксперимента получены фактические нейтронные и гамма-поля нейтронного конвертора. Путем моделирования с последующими расчетами в программном модуле получены расчетные нейтронные и гамма-поля того же конвертора. Установлено равенство в пределах погрешности распределений мощностей доз нейтронного и гамма-излучений на расстоянии 10 см и 100 см от поверхности тепловой колонны нейтронного конвертора, полученных в ходе эксперимента и расчета в программном комплексе.

Выводы. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение данного расчетного кода для моделирования установок сложной геометрии позволяет упростить решение аналогичных задач с использованием источников излучения другого типа. Данная методика может быть применена для теоретического расчета нейтронных и гамма-полей от установок сложной геометрии, например учебных лабораторных установок, используемых при изучении дисциплин «Нейтронная физика» и «Биологическая защита». Однако одного исследования недостаточно для полноценного анализа работы программного кода на установках сложной геометрии. В связи с этим дальнейшее развитие исследований предполагает их повторение на других установках, с другой геометрией и другими источниками излучений.

Ключевые слова: нейтронный конвертор, нейтронное излучение, гамма-излучение, плутоний-бериллиевый источник, дозиметр-радиометр

Darya Andreevna Malygina

Nizhny Novgorod State Technical, Student of Nuclear Reactors and Power Plants Department, Russia, Nizhny Novgorod, e-mail: darya.malygina.2002@mail.ru

Andrey Nikolaevich Semenenko

Nizhny Novgorod State Technical University, Head of Radiation Safety Service, Russia, Nizhny Novgorod, e-mail: semenenko7@yandex.ru

Comparative analysis of calculated and actual neutron and gamma-fields of neutron converter

Abstract

Background. At the moment, only a few universities in Russian Federation have such an installation as a neutron converter, which results in a small number of scientific papers on this issue and the uniqueness of each of them. In this regard, it is necessary to carry out instrumental verification of the calculation results of the DOT software module when solving problems on installations with complex geometry. The purpose of this study is to verify the correspondence of the calculated (theoretical) values obtained in the DOT software package with the data obtained during the experiment.

Materials and methods. A trusted dosimeter-radiometer has been used to obtain the actual results. To obtain the calculated results, the software modules DOT-GEOM and DOT-III, as well as the auxiliary programs ListinG and Surfer 7.0 have been used.

Results. As a result of the experiment, the actual neutron and gamma fields of the neutron converter have been obtained. The authors have obtained calculated neutron and gamma fields of the same converter by modeling with subsequent calculations in the software module. The power distributions of neutron and gamma radiation doses at a distance of 10 cm and 100 cm from the surface of the thermal column of the neutron converter, obtained during the experiment and calculated in the software package, are equal within the error limits.

Conclusions. The results obtained allow us to conclude that the use of this computational code for modeling installations of complex geometry makes it possible to simplify the solution of similar problems using radiation sources of a different type. This technique can be used for the theoretical calculation of neutron and gamma fields of installations of complex geometry, for example, educational laboratory installations to study "Neutron Physics" and "Biological Protection". However, a single study is not enough to fully analyze the operation of the program code on installations of complex geometry. Therefore, further research involves similar studies on other installations with different geometries and other radiation sources.

Key words: neutron converter, neutron radiation, gamma radiation, plutonium-beryllium source, dosimeter-radiometer

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.2.081-086

Введение. Давно известно, что использование программной симуляции процессов распространения ионизирующего излучения дает возможность быстро и с меньшими финансовыми затратами произвести расчеты под конкретную геометрию и материалы. Многие программы находятся на вооружении инженеров годами и десятилетиями. Данная тема представляет интерес тем, что позволяет верифицировать данные, полученные в программном коде при решении задач с установками сложной геометрии.

Нейтронный конвертор представляет собой уникальную установку, представленную лишь в нескольких вузах нашей страны, что определяет небольшое количество научных работ по данной тематике.

Целью настоящего исследования является проверка соответствия расчетных (теоретических) значений, полученных в программном пакете DOT, с данными, полученными при проведении эксперимента.

Достижение вышеуказанной цели предполагает выполнение следующих задач:

1) построение геометрической модели нейтронного конвертора в программе DOT-GEOM (входные данные);

2) построение полей распределения мощностей доз нейтронного и гамма-излучения;

3) проведение эксперимента;

4) сравнительный анализ полученных расчетных данных с фактическими значениями.

Методы исследования. Нейтронный конвертор представляет собой выполненный из нержавеющей стали контейнер (рис. 1), содержащий конструкционные элементы и графитовый замедлительный блок [1]¹. Функции нейтронного отражателя и биологической защиты выполняет периферийная заливка из смеси парафина и борной кислоты. Конвертор содержит в себе шесть плутоний-бериллиевых закрытых радиационных источников, расположенных по три штуки на двух высотах. Имеется один экспериментальный (рабочий) канал, предназначенный для размещения образцов и расположенный в центре конвертора.

Схема нейтронного конвертора представлена на рис. 1.

¹ Колонна тепловая. Техническое описание КЖРУ.412159.001Д // АО «Опытно конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантов». – Нижний Новгород, 2021; Тепловая колонна. Руководство по эксплуатации КЖРУ.412159.001РЭ // АО «Опытно конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантов». – Нижний Новгород, 2021.

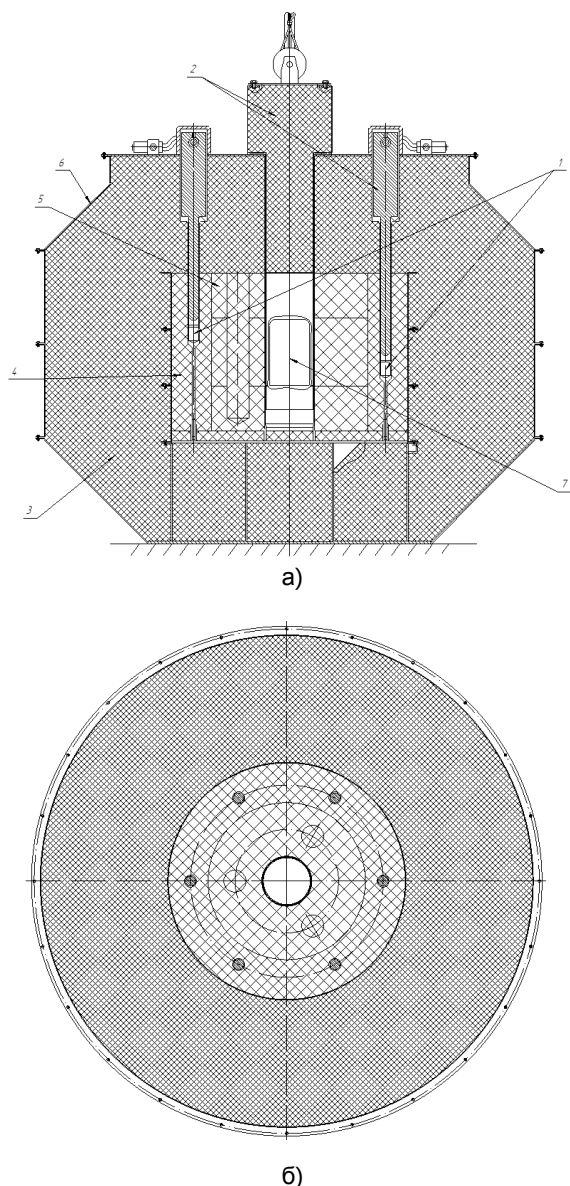


Рис. 1. Конструктивная схема нейтронного конвертора: а – вертикальный разрез; б – горизонтальный разрез; 1 – источники нейтронов; 2 – пробки; 3 – парафин с борной кислотой; 4 – парафин; 5 – графит; 6 – корпус; 7 – рабочий канал

Для расчетов используются следующие программные модули:

1) DOT-GEOM – универсальная интегрированная среда, нацеленная на сокращение времени и снижение вероятности ошибок при подготовке входных данных для проектных расчетов биологической защиты реакторных установок и иных источников ионизирующего излучения по кодам DOT-III и DORT [2];

2) DOT-III – программа, использующая выходной файл программы DOT-GEOM для расчета необходимых функционалов. Расчет выполняется в 2D-геометрии с использованием библиотек констант CASK-40². В основе математической модели данной программы

лежит численный метод решения кинетического уравнения Больцмана для частиц, движущихся по дискретным направлениям. Предел основной погрешности работы программы $\pm 0,1\%$.

Для оформления полученных результатов необходимы вспомогательные программы:

1) ListingG – программа, предназначенная для перевода выходного файла формата *.out в формат *.dat в целях последующей визуализации полученных функционалов;

2) Surfer 7.0 – программа, предназначенная для технического моделирования. С помощью данной программы ведется преобразование выходного файла ListingG в удобный для визуального восприятия формат.

В качестве основных исходных данных принимаются мощность и энергетический спектр излучения плутоний-бериллиевого источника, ядерные концентрации материалов, влияющие на процесс замедления и поглощения нейтронов и гамма-излучения, а также геометрия установки. В качестве источников нейтронов используются источники типа ИБН-8, представляющие собой герметичные двойные капсулы из нержавеющей стали, заполненные смесью плутония-239 и бериллия-9³. Мощность каждого нейтронного источника составляет $1,8 \cdot 10^6$ бн/с. Энергетический спектр излучения плутоний-бериллиевого источника представлен в табл. 1.

Таблица 1. Спектр плутоний-бериллиевого источника

Группа	Спектр	Группа	Спектр
1	0,00	21	0
2	1,13740E-06	22	0
3	1,42540E-05	23	0
4	2,18580E-05	24	0
5	1,94130E-05	25	0
6	1,93620E-05	26	0
7	2,63420E-05	27	0
8	8,49360E-06	28	0
9	1,29800E-06	29	0
10	4,85310E-06	30	0
11	5,16780E-06	31	0
12	4,32200E-06	32	0
13	8,67830E-07	33	8,62470E-08
14	6,63390E-09	34	2,28190E-05
15	3,56530E-12	35	2,78950E-06
16	0	36	3,91740E-05
17	0	37	2,46130E-05
18	0	38	5,89120E-04
19	0	39	9,08990E-01
20	0	40	9,02040E-02

При расчете в программе DOT-III мощность излучения плутоний-бериллиевого источника требует перерасчета для учета испускания гамма-квантов. Для каждого источника приве-

² 40 Groups Coupled Neutron and Gamma ray Cross Section Data. RSIC Data Library DLC23, 1973.

³ Источники нейтронного излучения [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.isotop.ru/files/treecontent/nodes/attaches/0/96/naname..pdf> CASK

денная мощность после перерасчета составляет $1,4367 \cdot 10^{10}$ бн/с.

Результаты исследования. В связи с особенностями расчета в программе DOT-GEOM необходимо произвести нормировку значения приведенной мощности с помощью поправки на бесконечность, так как XY-геометрия бесконечна. Нормировка позволяет выявить коэффициент, компенсирующий разность при переходе из системы RZ к системе XY.

Таким образом, работа с программным комплексом сводится к следующему [3, 4]:

1) расчету уровней излучения от одного источника в RZ-геометрии;

2) расчету уровней излучения в XY-геометрии от одного источника с биологической защитой, аналогичной использованной в RZ-геометрии;

3) вычислению поправки на бесконечность и нормированной мощности с учетом поправки;

4) выполнению проверки правильности вычисления нормировочного коэффициента;

5) расчету уровней излучения в XY-геометрии от шести источников;

6) определению уровней излучения на расстоянии 10 см и 100 см от колонны с последующим сравнением полученных результатов с фактическими величинами.

Результаты расчета уровней излучения от одного источника в RZ-геометрии представлены на рис. 2.

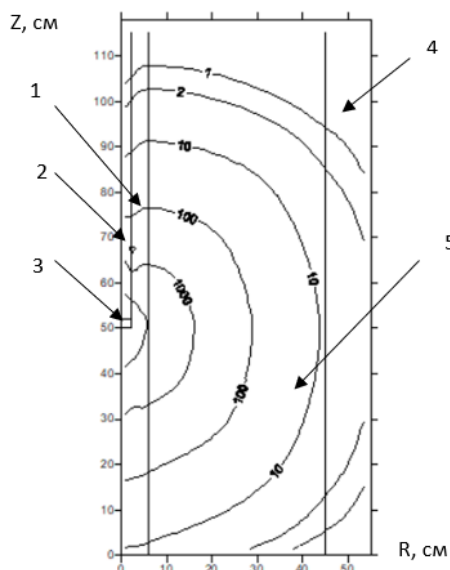


Рис. 2. Распределение суммарной мощности дозы нейтронного и гамма-излучения от одного источника в RZ-геометрии, мкЗв/ч; 1 – парафин; 2 – сталь 08X18H10T; 3 – источник; 4 – воздух; 5 – парафин с борной кислотой

По результатам расчета в RZ-геометрии для одного источника на расстоянии 10 см от поверхности колонны суммарная мощность дозы составляет $(2 \pm 0,002)$ мкЗв/ч.

Результаты расчета уровней излучения от одного источника в XY-геометрии представлены на рис. 3.

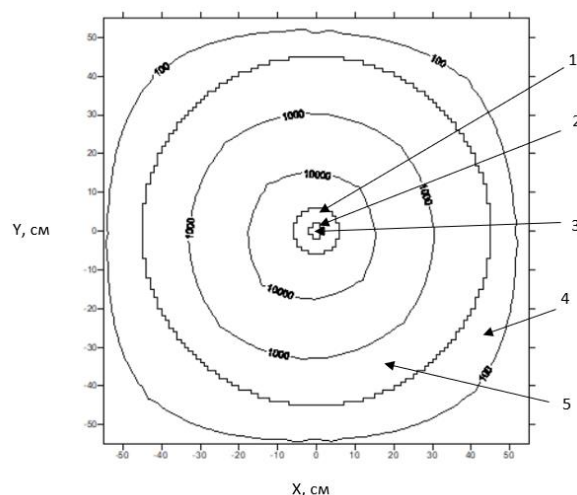


Рис. 3. Распределение суммарной мощности дозы нейтронного и гамма-излучения от одного источника в XY-геометрии, мкЗв/ч: 1 – парафин; 2 – сталь 08X18H10T; 3 – источник; 4 – воздух; 5 – парафин с борной кислотой

По результатам расчета в XY-геометрии для одного источника на расстоянии 10 см от поверхности колонны суммарная мощность дозы составляет $(100 \pm 0,1)$ мкЗв/ч.

Расчетная поправка на бесконечность, вычисленная как отношение суммарной мощности дозы в XY-геометрии к суммарной мощности дозы в RZ-геометрии на расстоянии 10 см, составила 50.

Нормированная мощность для последующих расчетов в XY-геометрии составляет $2,8734 \cdot 10^8$ бн/с.

Представляется необходимым проведение проверки в виде расчета суммарной мощности дозы в XY-геометрии для одного источника, отнормированного на бесконечность геометрии.

Результаты проведения описанной выше проверки представлены на рис. 4.

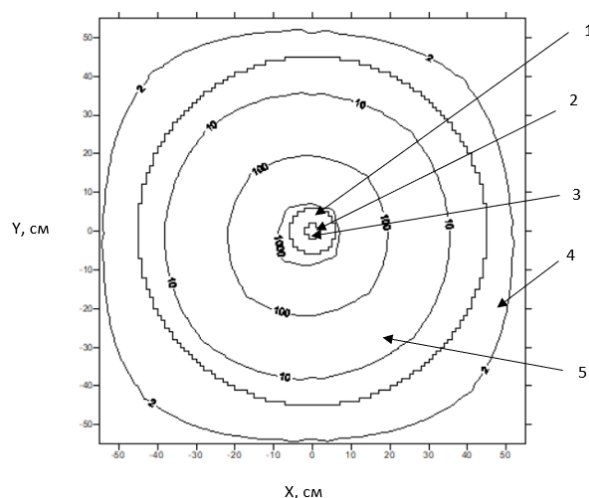


Рис. 4. Распределение суммарной мощности дозы нейтронного и гамма-излучения от одного источника в XY-геометрии после нормировки, мкЗв/ч; 1 – парафин; 2 – сталь 08X18H10T; 3 – источник; 4 – воздух; 5 – парафин с борной кислотой

Таким образом, в XY-геометрии суммарная мощность дозы одного источника после нормировки на расстоянии 10 см от поверхности колонны составляет $(2 \pm 0,002)$ мкЗв/ч, что соответствует результату расчета в RZ-геометрии. На основании этих данных можно сделать вывод об успешности проведенной проверки.

Результаты расчета мощностей доз нейтронного и гамма-излучения в XY-геометрии от 6 источников (суммарная нормированная мощность для шести источников рассчитывается как сумма нормированных мощностей для каждого источника и составляет $1,7240 \cdot 10^9$ (бн/с)) представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

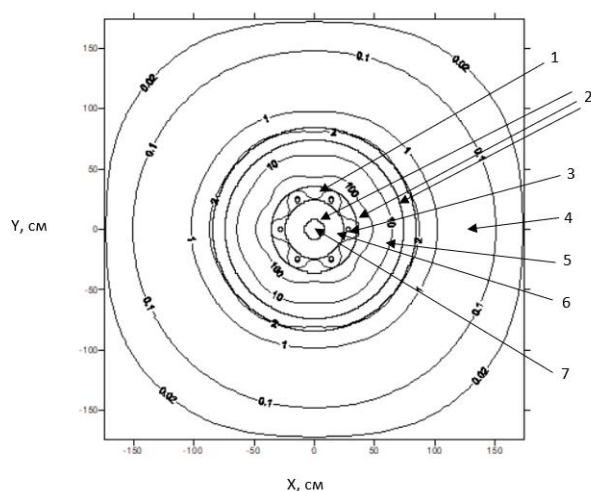


Рис. 5. Распределение мощности дозы нейтронного излучения от шести источников в XY-геометрии, мкЗв/ч: 1 – парафин; 2 – сталь 08Х18Н10Т; 3 – источник; 4 – воздух; 5 – парафин с борной кислотой; 6 – графит; 7 – воздушная полость

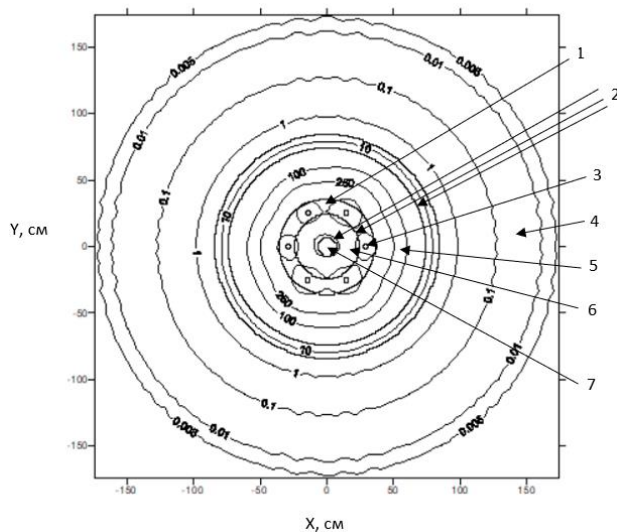


Рис 6. Распределение мощности дозы гамма-излучения от шести источников в XY-геометрии, мкЗв/ч: 1 – парафин; 2 – сталь 08Х18Н10Т; 3 – источник; 4 – воздух; 5 – парафин с борной кислотой; 6 – графит; 7 – воздушная полость

Измерения фактических мощностей доз нейтронного и гамма-излучения проводились с помощью поверенного дозиметра-радиометра типа МКС-АТ1117М. Предел основной погрешности измерения прибора, согласно паспорту, составляет $\pm 15\%$.

Результаты проведенных расчетов и фактические значения мощностей доз нейтронного и гамма-излучения на расстоянии 10 см и 100 см представлены в табл. 2. Представленные значения являются результатом усреднения значений, полученных со стороны всех шести источников. Значения для гамма-излучения представлены за вычетом фона (величина фона составила 0,095 мкЗв/ч⁴).

Таблица 2. Результаты расчетов и фактические значения мощностей доз нейтронного и гамма-излучения на расстоянии 10 см и 100 см

Расстояние от поверхности колонны	Мощность дозы гамма-излучения (расчетная/измеренная), мкЗв/ч	Мощность дозы нейтронного излучения (расчетная/измеренная), мкЗв/ч
10 см от колонны	1,6±0,00160 / 1,795±0,26920	2±0,00200 / 1,82±0,27300
100 см от колонны	0,03±0,00003 / 0,033±0,00495	0,02±0,00002 / 0,019±0,00285

Следует отметить, что, как отмечено выше, источники располагаются на двух разных высотах по три штуки на каждой высоте. Однако в RZ-геометрии невозможно учесть влияние нескольких источников излучения на мощность дозы, а в XY-геометрии – указанную разность высот. Таким образом, полученные для шести источников излучения значения мощностей доз нейтронного и гамма-излучения следует считать приближенными, отражающими более неблагоприятную ситуацию распределения мощностей дозы.

Выводы. В ходе выполнения поставленных задач были получены распределения мощностей доз нейтронного и гамма-излучения для нейтронного конвертора на расстоянии 10 см и 100 см от поверхности колонны. Установлено, что измеренные в ходе эксперимента фактические значения соответствующих мощностей доз с учетом погрешности работы программного модуля DOT и измерения дозиметра оказались равны теоретическим величинам.

Список литературы

1. **Научно-исследовательская** установка для подготовки инженеров-физиков / С.М. Дмитриев, В.А. Малышев, М.С. Осипов, В.В. Самусенков // Труды НГТУ. – Нижний Новгород, 2010.

4 СанПиН 2.6.1.2523–09. Нормы радиационной безопасности НРБ 99/2009 [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553>; СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) [Электронный ресурс]. – URL: <http://nucloweb.jinr.ru/nucloserv/inform/instructions/osprb-99-2010.pdf>

2. **Андреев Н.Г., Вавилкин В.Н.** Разработка программы DOT-Activ для расчета источников и уровней излучения остановленного реактора в 2D-геометрии // Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях: сб. ст. X Российской науч. конф. – М., 2015.

3. **Расчетно-теоретическое** обоснование конструкции нейтронного конвертера / В.В. Андреев, Н.Г. Андреев, А.А. Кувшинова и др. // Труды НГТУ. – Нижний Новгород, 2018. – С. 164–168.

4. **Обоснование** радиационной безопасности нейтронного конвертера на всех этапах жизненного цикла в рамках проектно-ориентированного обучения студентов НГТУ им. Р.Е. Алексеева / В.В. Андреев, Н.Г. Андреев, К.Г. Галстян, С.Л. Леванов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 3. – С. 99–101.

References

1. Dmitriev, S.M., Malyshev, V.A., Osipov, M.S., Samusenkov, V.V. Nauchno-issledovatel'skaya ustanovka dlya podgotovki inzhenerov-fizikov [Scientific research facility for the training of physics engineers]. *Trudy NGTU* [Proceedings of the NSTU]. Nizhny Novgorod, 2010.

2. Andreev, N.G., Vavilkin, V.N. Razrabotka programmy DOT-Activ dlya rascheta istochnikov i urovney

izlucheniya ostanovlennogo reaktora v 2D-geometrii [Development of the DOT-Activ program for calculating sources and radiation levels of a stopped reactor in 2D geometry]. *Sbornik statey X Rossiyskoy nauchnoy konferentsii «Radiatsionnaya zashchita i radiatsionnaya bezopasnost' v yadernykh tekhnologiyakh»* [Collection of articles of the X Russian Scientific Conference "Radiation protection and radiation protection in nuclear technologies"]. Moscow, 2015.

3. Andreev, V.V., Andreev, N.G., Kuvshinova, A.A., Levanov, S.L., Khudyakov, I.S. Raschetno-teoreticheskoe obosnovanie konstruktssii neytronnogo konvertera [Computational and theoretical substantiation of the neutron converter design]. *Trudy NGTU* [Proceedings of the NSTU]. Nizhny Novgorod, 2018, pp. 164–168.

4. Andreev, V.V., Andreev, N.G., Galstyan, K.G., Levanov, S.L. Obosnovanie radiatsionnoy bezopasnosti neytronnogo konvertera na vseh etapakh zhiznennogo tsikla v ramkakh proektno-orientirovannogo obucheniya studentov NGTU im. R.E. Alekseeva [Justification of the radiation safety of a neutron converter at all stages of the life cycle within the framework of project-oriented training for students of NSTU R.E. Alekseeva]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya*, 2019, no. 3, pp. 99–101.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

В журнал принимаются рукописи в электронном виде. Средний объем статьи – 6 страниц. Статьи сопровождаются двумя рецензиями – кафедральной (с места работы автора с указанием даты обсуждения и номера протокола) и внешней.

Правила оформления статьи.

Обязательно указывается УДК.

Фамилия, имя, отчество авторов полностью, место работы, должность, звание, ученая степень, страна и город, контактная информация (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Название статьи (на русском и английском языках), *авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Основной текст располагается **в две колонки**, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – **10**.

Графики и рисунки должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики либо в Word. Надписей на рисунках (кроме основополагающих понятий) быть не должно, они обозначаются цифрами и далее расшифровываются, а все расшифровки выносятся под рисунок, размер шрифта – 9 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть **только черными**, любые другие цвета недопустимы.

Формулы набираются в редакторе формул Math Type (шрифт **Arial**), размер шрифта – **10**, располагаются в тексте в одну колонку.

В конце статьи размещаются пристатейные библиографические списки (на русском языке и References).

Примеры оформления авторского резюме и библиографических списков см. на сайте:

<http://vestnik.ispu.ru/ru/node/14>

Редакционно-издательский отдел оставляет за собой право на редактирование статей.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 2

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 17.04.2025. Выход в свет 30.04.2025. Формат 60x84 ¹/₈.
Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 10,81. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции журнала: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Адрес издательства: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8