

УДК 537.581

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.10>

Оригинальная статья / Original paper

Влияние радиальной неравномерности энерговыделения в реакторе-преобразователе на характеристики электрогенерирующего канала

Г.Э. Лазаренко, С.С. Щербачев

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Реферат. Исследовано влияние градиента плотности потока нейтронов в активной зоне термоэмиссионного реактора-преобразователя на выходные характеристики электрогенерирующего канала (ЭГК). Расчетное исследование выполнено при помощи одномерной программы TFEDM22 по специально разработанной методике, включающей в себя разбиение электрогенерирующих элементов на продольные изолированные друг от друга сегменты и суммирование генерируемых в них токов при условии одинаковых потенциалов на торцах электрогенерирующих элементов (ЭГЭ) всех сегментов ЭГК. Расчетные точки вольт-амперной характеристики ЭГК строились методом итераций – подбором разности потенциалов на ЭГЭ по заданному суммарному току через ЭГК. Затем производилось сравнение расчетных результатов, полученных по одномерной программе и разработанной методике. Цель работы – оценка погрешности расчета выходных характеристик ЭГК при использовании одномерных программ. Методика состояла в разбиении ЭГК на продольные сегменты и расчете их характеристик в предположении адиабатических граничных условий. Показан существенный рост расчетной погрешности при увеличении размеров твэла (в частности, при расчете ЭГК сложной геометрии – с внешним расположением топлива и комбинированного ЭГК). Показана необходимость использования двух- и трехмерных программ для указанных типов ЭГК.

Ключевые слова: термоэмиссионный преобразователь, электрогенерирующий канал, электрогенерирующий канал сложной геометрии, неравномерность энерговыделения, TFEDM22.

Для цитирования: Лазаренко Г.Э., Щербачев С.С. Влияние радиальной неравномерности энерговыделения в реакторе-преобразователе на характеристики электрогенерирующего канала. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;4:138–147. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.10>

Введение

Создание в девяностых годах на основе термоэмиссионного преобразования энергии ядерных энергетических установок «Топаз» [1] и «Енисей» [2, 3] сопровождалось разработкой расчетных методов обоснования их электрофизических характеристик. Вследствие недостаточно развитых в те годы компьютерных технологий расчетные методики, как правило, ограничивались одномерным приближением [4]. Такой подход был оправдан геометрией активной зоны – использовались относительно тонкие электрогенерирующие каналы (ЭГК), поэтому перекося плотности потока нейтронов в топливном сердечнике (следовательно, и плотности тепловыделения) в радиальном направлении был незначительным и расчет по усредненным величинам не приводил к существенным ошибкам.

Дальнейшее развитие конструктивных форм ЭГК привело к появлению концепции ЭГК с внешним расположением топлива (ВРТ) [5], а затем к концепции комбинированного ЭГК [6], далее называемые ЭГК сложной геометрии, поперечные сечения которых схематически представлены на рис. 1.

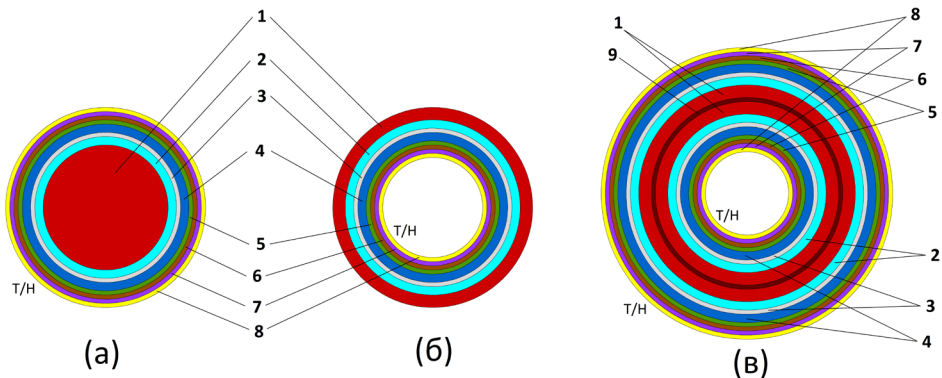


Рис. 1. Поперечные сечения различных концепций ЭГК: а) традиционная конструкция; б) с внешним расположением топлива; в) комбинированная; 1 – топливная композиция; 2 – эмиттер; 3 – межэлектродный зазор; 4 – коллектор; 5 – «мокрая» электроизоляция; 6 – охранный электрод; 7 – «сухая» электроизоляция; 8 – чехол коллекторного пакета; 9 – зазор

Характерной особенностью этих концепций является использование кольцевого твэла с поперечным размером, существенно превышающим размер в твэле ЭГК традиционного исполнения. Увеличение размера твэла, оболочка которого выполняет функцию эмиттера термоэмиссионного преобразователя, в условиях радиальной неравномерности плотности потока нейтронов в активной зоне реактора-преобразователя приводит к значительным вариациям тепловыделения по азимуту твэла, что не учитывается в существующих одномерных расчетных программах. Целью настоящей работы является оценка погрешности вычислений электрофизических характеристик ЭГК сложной геометрии и обоснование необходимости разработки новых, более точных методик расчета, учитывающих пространственное (трехмерное) распределение параметров.

Анализ расчетных методик

Поскольку решение системы нелинейных уравнений в частных производных второго порядка, описывающей распределение температуры и потенциала в традиционных ЭГК, является весьма сложной задачей, введением ряда разумных упрощений задача сводилась к одномерной относительно температуры эмиттера и разности потенциалов между электродами по длине электрогенерирующих элементов (ЭГЭ), составляющих ЭГК (расчет в распределенных параметрах) [4, 7]. Граничные условия для уравнения разности потенциалов на границах ЭГЭ получены исходя из постоянства величины тока, протекающего через ЭГК. Ввиду значительной погрешности существующих полуэмпирических зависимостей для описания вольт-амперных характеристик, как правило, для замыкания системы уравнений использовались интерполяционные зависимости на основании экспериментальных данных.

Область применения методики на основе модели ЭГЭ в распределенных параметрах довольно широка, так как позволяет получать распределение температуры электродов и плотности электрического тока вдоль оси ЭГЭ. Однако эта методика создана на основании следующих упрощений:

- продольная теплопроводность топливного сердечника мала, тепловой поток распространяется равномерно в радиальном направлении, что позволяет определить плотность теплового потока на внешней поверхности эмиттера;
- электроды тонкие, что позволяет пренебречь радиальным и азимутальным распределениями температуры и электрического потенциала в них;
- температура коллектора постоянна ввиду ее хорошего теплового контакта с теплоносителем, и, следовательно, незначительного изменения по длине ЭГЭ.

Система нелинейных дифференциальных уравнений преобразовывалась в конечноразностную форму и решалась методом итераций для заданных величин тока, проходящего через ЭГК, по которым строилась вольт-амперная характеристика (ВАХ) ЭГК. На торцах ЭГЭ задавалось значение электрического тока, что определяло граничные условия по потенциалу на электродах.

Описанная методика в настоящее время является наиболее используемой при проведении расчетов электротеплофизических характеристик ЭГК в обоснование проектных работ по созданию перспективных ТРП [6, 7].

Адаптация программы TFEDM22

В программе TFEDM22 [8] реализован численный метод решения системы тепловых и электрических уравнений ЭГЭ в одномерном приближении. В данной программе используется база исходных данных, включающая в себя геометрические, конструктивные, теплофизические и термоэмиссионные характеристики ЭГК типа ТОПАЗ, а также семейства изотермических ВАХ для значений давления паров цезия от 1 до 5 Торр. Итогом расчета является таблица «Вольт-амперная характеристика ЭГК», в которой помещены тепловая мощность, давление паров цезия и для каждого значения тока – выходное напряжение, выходная мощность и КПД ЭГК [7].

В нашем случае внутреннее расположение топлива с небольшим диаметральным размером заменяется на кольцевую топливную таблетку большего диаметра. Вследствие неравномерности энерговыделения в азимутально-радиальном направлении

активной зоны будет наблюдаться неравномерность энерговыделения по азимуту топливной таблетки. Так как при расчетах ранее не учитывалась неравномерность азимутального энерговыделения, то для расчета ЭГК сложной геометрии были внесены некоторые изменения в структуру программы, написанной на языке FORTRAN [9].

Для оценки погрешности одномерных программ была использована модель азимутально разбитого на изолированные сегменты ЭГЭ, схематически представленная на рис. 2. Расчет потенциала и температуры проводился по одномерным моделям. Такой подход позволяет определить верхнюю границу погрешности при использовании одномерных программ.

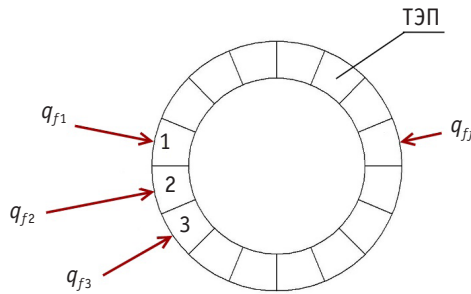


Рис. 2. Модель азимутально разбитого ЭГЭ в поперечном сечении

Учет неравномерности энерговыделения формально выполнялся добавлением вводимого перед расчетом параметра – коэффициента $\alpha = \frac{q_{fj}}{q_{f\text{ср}}}$ – отношения j -го значения энерговыделения к среднему. При расчете в программе на данный коэффициент домножается уравнение для нахождения плотности теплового потока:

$$Q_s = \frac{Q}{\pi \cdot d_E \cdot L_{\text{ЭГЭ}}} \cdot \alpha, \quad (1)$$

где Q – полная тепловая мощность ЭГК; $L_{\text{ЭГЭ}}$ – длина ЭГЭ; d_E – внешний диаметр эмиттера.

В зависимости от того, на сколько участков разделен топливный сердечник (в данном исследовании он азимутально разделен на восемь сегментов), можно получить выходные характеристики для каждого сегмента ЭГЭ. Учитывая допущение, а именно, изолированность азимутальных сегментов, можно сказать, что совокупность итераций расчета при различных значениях α образует дополнительное измерение для математической модели ЭГК, тем самым позволяя провести верхнюю оценку разброса параметров.

Чтобы была возможность расчета ЭГК сложной геометрии, в исходном коде программы были изменены выражения, в которых фигурируют внешние и внутренние диаметры электродов, а также выражения для расчета площадей поверхности эмиттера и коллектора. Это соображение объясняется тем, что только эти параметры и их соотношения отличают традиционную конструкцию ЭГК от ЭГК сложной геометрии, когда речь идет о формах и размерах (рис. 3). Таким образом программа TFEDM22 была адаптирована под задачи исследования.

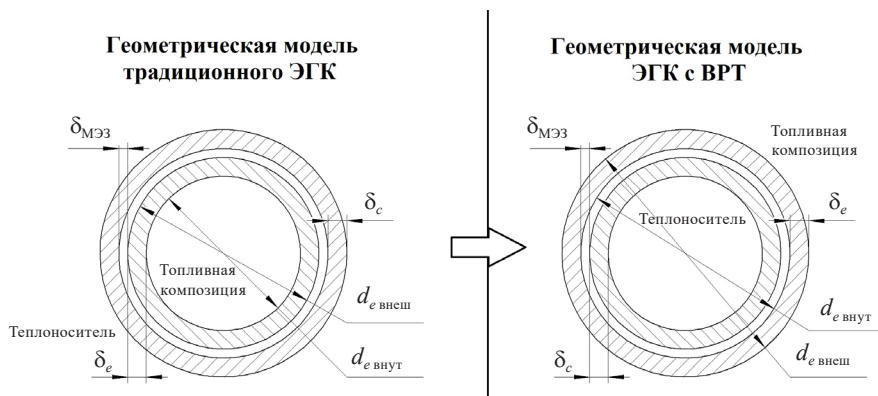


Рис. 3. Геометрическое различие конструкций ЭГЭ

Расчетные оценки

Полученные в результате расчета ВАХ сегментов ЭГК с ВРТ приведены на графике (рис. 4) в виде нескольких кривых, каждая из которых соответствует своему азимутальному сегменту; при этом предполагалось, что потенциалы на торцах всех сегментов совпадают. Рассматривался ЭГК, расположенный на периферии активной зоны, так как именно в этой области неравномерность нейтронного поля выражена наиболее явно.

Диапазон значений тока был подобран исходя из ограниченных значений входных параметров. Разброс значений электрического тока при одном значении выходного напряжения составил ~30%.

Далее на рисунке 5 представлена мощностная характеристика сегментов.

Разброс оптимумов электрической мощности составил ~35%.

На рисунке 6 представлена зависимость КПД от напряжения сегментов.

На графике виден явный разброс оптимумов КПД не только по оси ординат, но и по оси абсцисс.

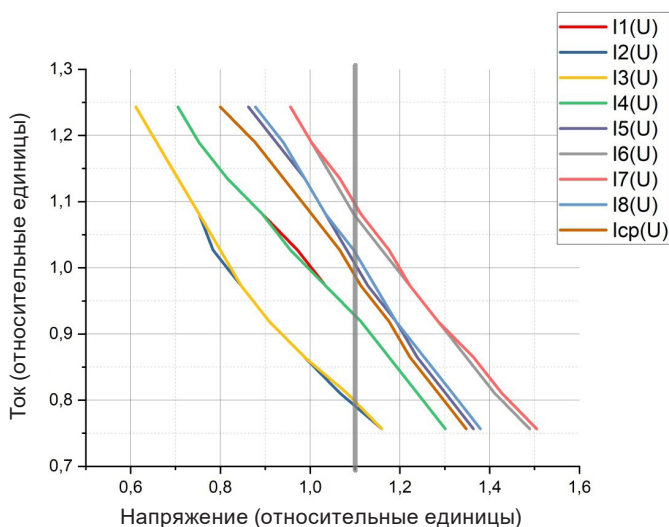


Рис. 4. Зависимость электрического тока от напряжения (ВАХ)

Влияние радиальной неравномерности энерговыделения в реакторе-преобразователе на характеристики электрогенерирующего канала

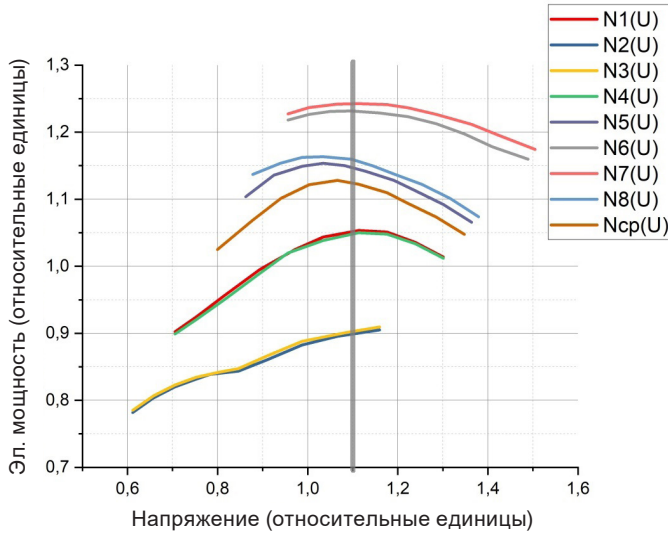


Рис. 5. Зависимость электрической мощности от напряжения

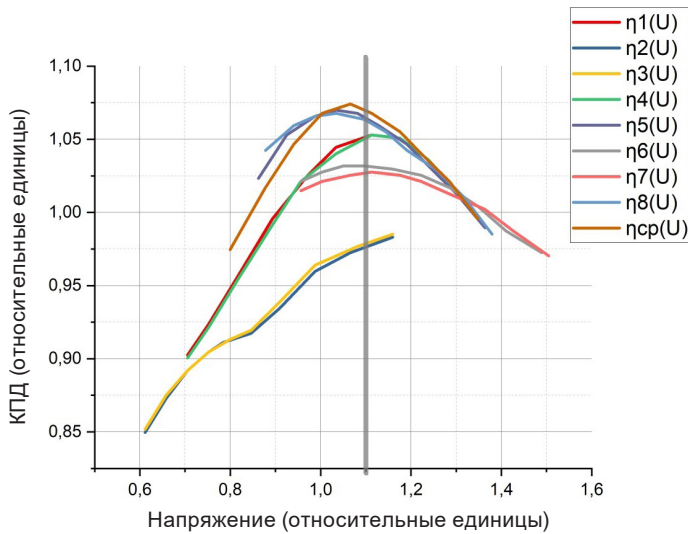


Рис. 6. Зависимость КПД от напряжения

Отдельно был рассчитан КПД азимутально разбитой модели в области совпадающих потенциалов, после чего в той же области был рассчитан КПД одномерной модели ЭГЭ без учета неравномерности энерговыделения по азимуту, что показано на рис. 7.

График показывает расхождение значений КПД $\sim 3,5\%$. Сравнение показывает, что результаты расчета КПД ЭГК сложной геометрии с помощью одномерных моделей завышены.

Распределение температуры вдоль оси ЭГЭ для каждого сегмента представлено на рис. 8.

В результате азимутального разброса температуры в материале электродов и слоях изолятора возникают термомеханические напряжения [10, 11]. Настоящая работа ограничивается расчетом электрофизических и теплофизических характеристик, поэтому более детальная оценка термомеханических напряжений и анализ возможных условий

Influence of the Radial Unevenness of Energy Release in the Converter Reactor on the Characteristics of an Electrogenating Channel

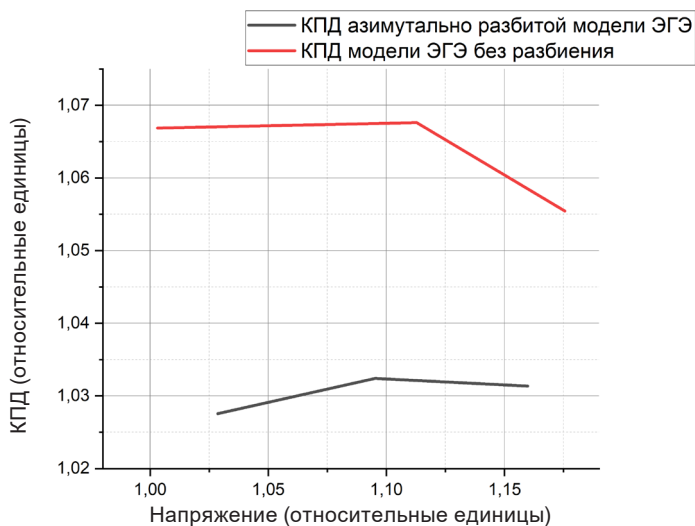


Рис. 7. Сравнение КПД

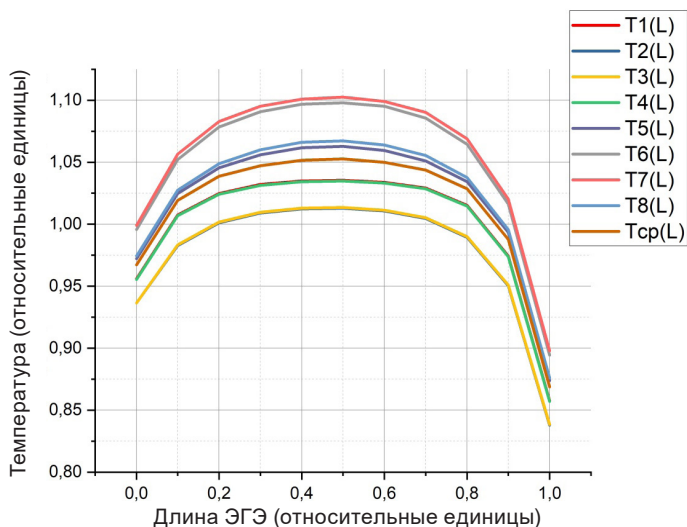


Рис. 8. Распределение температуры вдоль оси эмиттера

разрушения планируются в дальнейших исследованиях. Неравномерность энерговыделения по азимуту приводит к тому, что часть рабочей поверхности электродов работает не в оптимальном режиме. Разбросы полученных значений обосновывают необходимость доработки расчетной методики.

Заключение

Проведенный анализ выявил ограниченную применимость существующих одномерных методик для расчета ЭГК сложной геометрии, что связано с ростом размера топливного сердечника и изменением его конфигурации в условиях неравномерного тепловыделения в активной зоне ядерного реактора.

Разработанная расчетная методика, основанная на использовании одномерной программы TFEDM22 с модификацией граничных условий, позволяет оценить верхнюю границу погрешности вычислений при использовании одномерных программ, оперирующих со средними значениями тепловыделения в топливном сердечнике.

В результате тестовых расчетов показано, что для типичных ЭГК сложной геометрии при использовании одномерных расчетных программ ошибка в определении выходной мощности и КПД может достигать 10%.

Таким образом, исследование подтвердило предположение о значительном влиянии азимутальной неравномерности энерговыделения на рабочие параметры ЭГК сложной геометрии и продемонстрировало необходимость применения трехмерных программ для их расчета.

Литература

1. Грязнов Г.М., Пупко В.Я. «Топаз-1». Советская космическая ядерно-энергетическая установка. *Природа*. 1991;10:29–36. URL: https://elbib.biblioatom.ru/text/gryaznov_topaz_1991/p29/ (дата обращения 20.10.2025).
2. Никитин В.П. и др. Космическая ядерная энергетическая установка «Енисей». *Атомная энергия*. 2000;88(2):95–108. URL: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2972> (дата обращения 20.10.2025).
3. Кухаркин Н.Е. Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием «Ромашка» и «Енисей»). ИздАТ, 2008, 146 с.
4. Полоус М.А., Алексеев П.А., Ехлаков И.А. Современные расчетные технологии обоснования характеристик ядерных электродвигательных установок в проектных работах создания термоэмиссионных космических ядерных энергетических установок нового поколения. *Труды МАИ*. 2013;68:15.
5. Овчаренко М.К. и др. Концепция космической ЯЭУ на основе ЭГК с внешним расположением топлива. Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва – Подольск, 2005, т. 2, с. 240 – 246.
6. Ярыгин В.И., Ружников В.А., Синявский В.В. Космические и наземные ядерные энергетические установки прямого преобразования энергии. М: НИЯУ МИФИ, 2016, 364 с. ISBN 978-5-7262-2101-4
7. Ружников В.А. Методы расчета тепловых и электрических характеристик систем прямого преобразования энергии. Ч. 1. Термоэмиссионный электрогенерирующий канал ЭГК. Обнинск: ФЭИ, 2001, 25 с.
8. Ружников В.А., Алексеев П.А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ TFEDM22 № 2022666305 от 30.08.2022, Бюл. № 9. URL: <https://onlinepatent.ru/software/2022666305/> (дата обращения 10.10.2025).
9. Берков Н.А., Беркова Н.Н. Алгоритмический язык Фортран 90: учебное пособие. М.: МГИУ, 1998, 94 с.
10. Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Шевелев Л.П. Краткий курс сопротивления материалов. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2004, 112 с.
11. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б. П. Сопротивление материалов. М.: Юрайт, 2016, 293 с. ISBN 978-5-9916-7765-3.

Поступила в редакцию 11.08.2025

После доработки 29.10.2025

Принята к опубликованию 27.11.2025

Авторы

Лазаренко Георгий Эрикович, старший научный сотрудник, к.т.н.,

E-mail: gelazarenko2016@yandex.ru

Щербачев Сергей Сергеевич, инженер-исследователь,

E-mail: sshherbachyov@bk.ru

UDC 537.581

Influence of the Radial Unevenness of Energy Release in the Converter Reactor on the Characteristics of an Electrogenenerating Channel

Lazarenko G.E., Shcherbachev S.S.

IPPE JSC,

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

In this paper the effect of the neutron flux density gradient in the core of a thermionic converter reactor on the output characteristics of an electrogenerating channel is considered. The calculation was performed using the one-dimensional TFEDM22 program according to a specially developed methodology, which includes dividing the generating elements into longitudinal segments isolated from each other and summing the currents generated in them, provided that the potentials at the ends of the generating elements of all segments of the electrogenerating channel are the same. The calculated points of the current-voltage characteristic of the generating channel were constructed using the iterative method of selecting the potential difference on the generating element according to a given total current through the generating channel. Further the calculated results obtained using the one-dimensional program and the developed methodology were compared.

The purpose of the work is to estimate the error in calculating the output characteristics of the electrogenerating channel using one-dimensional programs. The calculation method consisted in dividing the power generating channel into longitudinal segments and calculating their characteristics under the assumption of the adiabatic boundary conditions.

A significant increase in the calculated error has been demonstrated with an increase in the size of the fuel element (in particular, in calculation of an electrogenerating channel with a complex geometry – with an external arrangement of fuel and a combined generating channel). The necessity of using two- and three-dimensional programs for these types of electrogenerating channels is shown.

Keywords: thermoionic converter, electrogenerating channel, electrogenerating channel with a complex geometry, unevenness of energy release, TFEDM22.

For citation: Lazarenko G.E., Shcherbachev S.S. Influence of the Radial Unevenness of Energy Release in the Converter Reactor on the Characteristics of an Electrogenenerating Channel. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;4:138–147. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.10> (in Russian).

References

1. Gryaznov G.M., Pupko V.Y. 'Topaz-1'. Soviet space nuclear power plant. *Priroda*. 1991, Vol. 10, p. 29 (accessed Oct. 10, 2025) (in Russian).

2. Nikitin V.P., Ogloblin B.G., Sokolov E.N., Klimov A.V., Barabanshchikov A.A., Ponomarev-Stepnoi N.N., Kukharkin N.E., Usov V.A., Nikolaev Yu.V. 'Yennisei' space nuclear power system. *Atomic energy*. 2000;88(2):98–110. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02673290>.
3. Kukharkin N.E. Space nuclear power engineering (nuclear reactors with thermoelectric and thermionic conversion – 'Romashka' and 'Yenisei'), Izdat Publ., 2008 (in Russian).
4. Polous M.A., Alekseev P.A., Ekhlakov I.A. Modern calculation technologies for justifying the characteristics of nuclear electric propulsions in the design of new generation thermionic space nuclear power plants. *Proceedings of the Moscow Aviation Institute*. 2013;68:15 (in Russian).
5. Ovcharenko M.K., Almambetov A.K., Vinogradov E.G., Zabudko A.N., Ionkin V.I., Lazarenko G.E., Mikheev A.S., Pyshko A.P., Iarygin V.I. The concept of a space nuclear power plant based on an EGC with an external fuel arrangement. Collection of reports of the International Conference 'Yadernaya energetika v kosmose–2005', Moscow-Podolsk, 2005, vol. 2, pp. 240 – 246 (in Russian).
6. Yarygin V.I., Ruzhnikov V.A., Sinyavsky V.V. Space and ground-based direct energy conversion nuclear power plants. Moscow, MPhI Publ., 2016, 364 p. ISBN 978-5-7262-2101-4 (in Russian).
7. Ruzhnikov V.A. Methods for calculating thermal and electrical characteristics of direct energy conversion systems. Part 1. Thermal emission electric generating channel EGC. Obninsk, IPPE Publ., 2001, p. 25 (in Russian).
8. Ruzhnikov V.A., Alekseev P.A. Certificate of registration of the TFEDM22 computer program № 2022666305 dated 30.08.2022, BUL. № 9. URL: <https://onlinepatent.ru/software/2022666305/> (accessed Oct. 10, 2025) (in Russian).
9. Berkov N.A., Berkova N.N. Algorithmic language Fortran 90: a textbook. Moscow, MGIIU Publ., 1998 (in Russian).
10. Eigenson S.N., Korikhin N.V., Shevelev L.P. A short course in resistance of materials, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University Publ., 2004, 112 p. (in Russian).
11. Alexandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. Resistance of materials. Moscow, Urait Publ., 2016, 293 p. ISBN 978-5-9916-7765-3 (in Russian).

Authors

Georgiy E. Lazarenko, senior researcher, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: gelazarenko2016@yandex.ru

Sergey S. Shcherbachev, research engineer,

E-mail: sshherbachyov@bk.ru