

УДК 004.45

DOI:10.36845/2073-8250-2020-256-1-49-56

ПРОГРАММА РАСЧЁТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТРЁХМЕРНЫХ МОДЕЛЯХ УСТРОЙСТВ

А.А. Василевский¹, К.А. Иванов¹, Е.С. Консенциуш², Ан.В. Редька¹

¹АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27;

²Череповецкое высшее военное инженерное ордена Жукова училище радиоэлектроники
162622, Волгоградская обл., г. Череповец, Советский проспект, д. 126

В статье представлены результаты использования созданного программного обеспечения, предназначенного для проведения теплового моделирования режимов работы СВЧ модулей на основе твердотельной элементной базы. Проведено сравнение разработанного программного продукта с аналогичной программой – ANSYS Icepak.

Ключевые слова: полевой транзистор с барьером Шоттки (ПТБШ), выходной усилитель мощности (БУМ), тепловое моделирование, радиатор, тепловой расчёт, СВЧ модуль

Сведения об авторах: Василевский Андрей Александрович, vasilevskiy_aa@pulsarnpp.ru; Иванов Кирилл Андреевич, ivanov_ka@pulsarnpp.ru; Редька Андрей Владимирович, redka_avv@pulsarnpp.ru; Консенциуш Екатерина Сергеевна, bez35@bk.ru

SOFTWARE FOR THE THERMAL FIELD CALCULATION IN 3D MODELS OF SEMICONDUCTOR DEVICES

A.A. Vasilevskiy¹, K.A. Ivanov¹, E.S. Konsentsiush², An.V. Redka¹

¹JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

²Cherepovetskoye vyssheye voyennoye inzhenernoye ordena Zhukova uchilishche
radioelektroniki, 162622, Volgograd region, Cherepovets, Sovetskiy avenue, 126

In this paper we demonstrate the performance of the software designed for thermal model testing of solid-state microwave modules and compare it with the similar software ANSYS Icepak.

Keywords: Schottky barrier field-effect transistor (Schottky FET), output power amplifier, thermal model testing, radiator, thermal calculation, microwave module

Data on authors: Vasilevskiy Andrey Aleksandrovich, vasilevskiy_aa@pulsarnpp.ru, Ivanov Kirill Andreevich, ivanov_ka@pulsarnpp.ru, Redka Andrey Vladimirovich, redka_avv@pulsarnpp.ru, Konsentsiush Ekaterina Sergeevna, bez35@bk.ru

Введение

Основным элементом, определяющим технические характеристики передающего тракта радиолокационных систем, является выходной усилитель мощности (ВУМ), в состав которого при твердотельном варианте конструкции входят мощные полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТБШ), функционирующие в импульсных и непрерывных режимах эксплуатации [1-5]. Поддержание теплового режима и контроль температуры в теплонагруженных точках важны для поддержания высокого уровня выходной СВЧ мощности усилителя и обеспечения его бесбойной работы в течение всего срока эксплуатации. В статье демонстрируются возможности разработанного программного обеспечения AliceFlow_v0.48 [6], предназначенного для проведения тепловых расчётов сложных модулей.

Постановка задачи

Программа AliceFlow_v0.48 разработана в АО «НПП «Пульсар» и предназначена для проведения оперативных расчётов температурных полей в трёхмерных виртуальных компьютерных моделях радиоэлектронных изделий.

Для оценки достоверности проводимых расчётов использованы несколько модульных задач:

1. Расчёт теплового сопротивления диода 2Д714 [7].
2. Задача конвекции-диффузии (расчёт воздушного охлаждения модуля приёмно-передающего) [5].
3. Расчёт модуля выходного усилителя мощности (ВУМ) с радиатором системы жидкостного охлаждения [3].

За основные критерии для проведения оценки точности и скорости расчётов раз-

работанного программного обеспечения приняты время расчёта и температура наиболее теплонагруженного элемента.

В качестве исходных данных в каждой задаче используются заранее известные свойства материалов (корпуса, радиатора и пр.), конструкции изделия, а также мощности рассеяния активных элементов.

Для оценки работы программного обеспечения проведённый расчёт сравнивается с полученным в ANSYS Icerak решением этой же задачи.

Описание программного продукта.

Получение результатов

Программа AliceFlow_v0.48 создана для расчёта температурных полей в трёхмерных виртуальных компьютерных моделях диодов, ПТБШ, модулей выходных и предварительных усилителей мощности (ВУМ и ПУМ).

В состав программы входят следующие компоненты:

1. Встроенный генератор неструктурированных локально адаптивных сеток (АЛИС).
2. Компонент решения стационарного или нестационарного уравнений теплопередачи в частных производных, аппроксимирующих на заданной расчётной сетке для получения конечного числа дискретных алгебраических уравнений большой размерности.
3. Компонент для нахождения векторного поля скорости теплоносителя для задач теплопередачи с учётом влияния вынужденной конвекции в случае, если скорость теплоносителя нельзя задать аналитически.
4. Модели турбулентности – Спаларт Аллмарес [8], SST k- ω Ментера [9].

5. Схемы высокой разрешающей способности на структурированной сетке (SMARTER, WACEB, SUPER C).

6. Различные программные реализации алгебраических многосеточных методов (собственный алгоритм РУМБА v0.14, amglr5 алгоритм, библиотеки NVIDIA CUSP 0.5.1, библиотека AMGCL Дениса Демидова [10], библиотека SPARSKIT2 Ю. Саада [11], стабильные решатели на основе многосеточных технологий), обладающих различными свойствами: чистотой лицензирования, наличием полного исходного кода, требованиями к ресурсам компьютера (время, память), скоростью сходимости, возможностью решать задачи большой размерности.

Для графической визуализации результатов расчёта данные экспортируются в программы tecplot [12] и paraview [13].

Решение задачи теплопередачи сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений – базовой операции. На решение системы линейных алгебраических уравнений тратится более 90 % времени решения задачи теплопередачи. Существенно увеличить быстродействие решения

системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), понизить требования к потребляемому объёму оперативной памяти, сохранить максимальную универсальность позволяют алгебраические многосеточные методы. Алгебраический многосеточный метод – это не один конкретный алгоритм, это методология решения СЛАУ.

Задача № 1. Расчёт теплового сопротивления диода 2Д714 на медном основании. Условия задачи:

- тепловая мощность $P_{diss} = 7.926$ Вт;
- температура основания 30°C .

Результаты решения поставленной задачи (рис. 1) показывают достаточно точное совпадение полученного теплового сопротивления кристалла диода 2Д714 – $34,58^\circ\text{C}$ для программного продукта ANSYS Icerpak и $34,5^\circ\text{C}$ для разработанного программного продукта AliceFlow. Несовпадение результатов составляет менее 0,25 %. При этом время расчёта поставленной задачи в программе AliceFlow составило $t = 5$ с. Эта же задача была решена в ANSYS Icerpak за время $t = 30.3$ с. Выигрыш во времени расчётов составил более 6 раз.

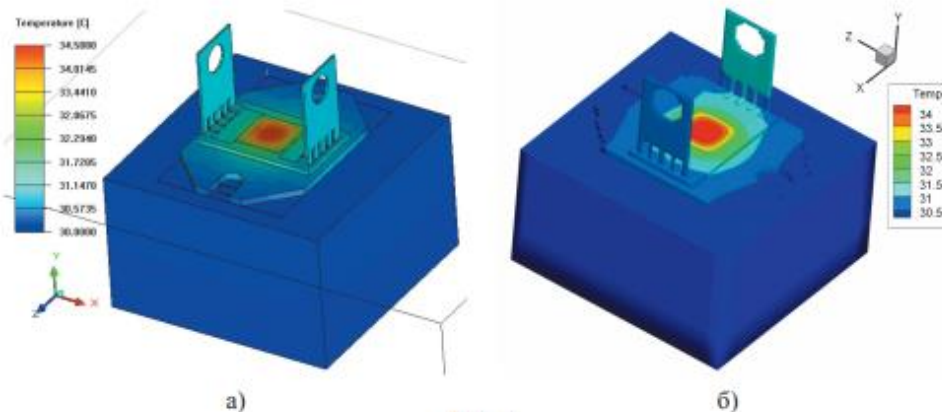


Рис. 1
Результат решения задачи: а) Icerpak; б) AliceFlow

Задача № 2. Задача конвекции-диффузии. Обдув модуля приёмно-передающего. Условия задачи:

- модуль состоит из восьми приёмно-передающих каналов выходной мощностью передатчика $P_{out} = 13.75$ Вт;
- радиатор воздушного охлаждения имеет 18 рёбер;
- скорость теплоносителя между рёбрами 2 м/с;
- суммарная средняя тепловая мощность модуля 19.4 Вт;
- масса модуля вместе с радиатором 886 граммов;
- температура воздуха на входе плюс 65°C.

Результат расчёта (рис. 2) показывает, что разница в максимальных температурах теплонагруженных элементов модуля составляет 2 % ($T = 97.7^\circ\text{C}$ для программного продукта ANSYS Icepak и 95.6°C для разработанного программного продукта AliceFlow).

За счёт возможности аналитически задать скорость теплоносителя в разработанной программе AliceFlow удалось сократить время решения задачи до $t = 24$ с, не потеряв при этом точности получения результата.

Решение задачи в ANSYS Icepak заняло 9 минут. Выигрыш во времени расчётов составил более 22 раз.

Задача № 3. Модуль выходного усилителя мощности (ВУМ) с водяным охлаждением.

Условия задачи:

- модуль ВУМ с уровнем выходной мощности $P_{out} = 800$ Вт, работающий в импульсном режиме;
- охлаждение жидкостное (радиатором с водяным охлаждением);
- расход воды через радиатор 3 л/мин;

– температура воды на входе в радиатор 30 °C;

– масса модуля 13.3 кг.

При решении поставленной задачи с применением программного продукта ANSYS Icepak только построение расчётной сетки для дискретного представления задачи теплопередачи заняло 1 час 22 мин.

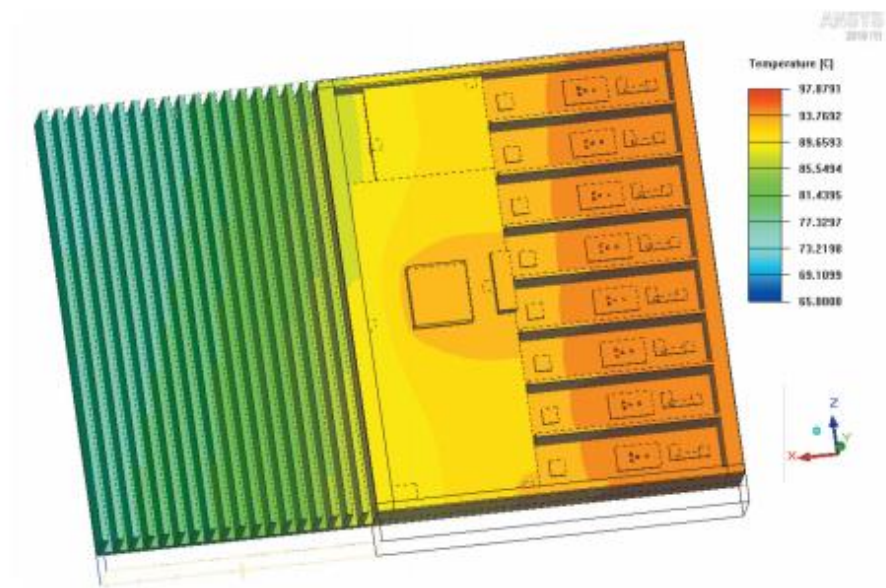
Решение задачи в разработанной программе AliceFlow заняло 24 минуты 38 секунд. Выигрыш во времени расчётов составил более 3 раз. При этом расхождение в полученных температурах наиболее теплонагруженных элементов составило меньше 5 °C.

Результаты проведённых расчётов показали, что отличие по температуре между двумя программными продуктами укладывается в 5°C и обусловлено отличиями в сетках – временной и пространственной, а также различными способами аппроксимации – поузловой или поячеечной.

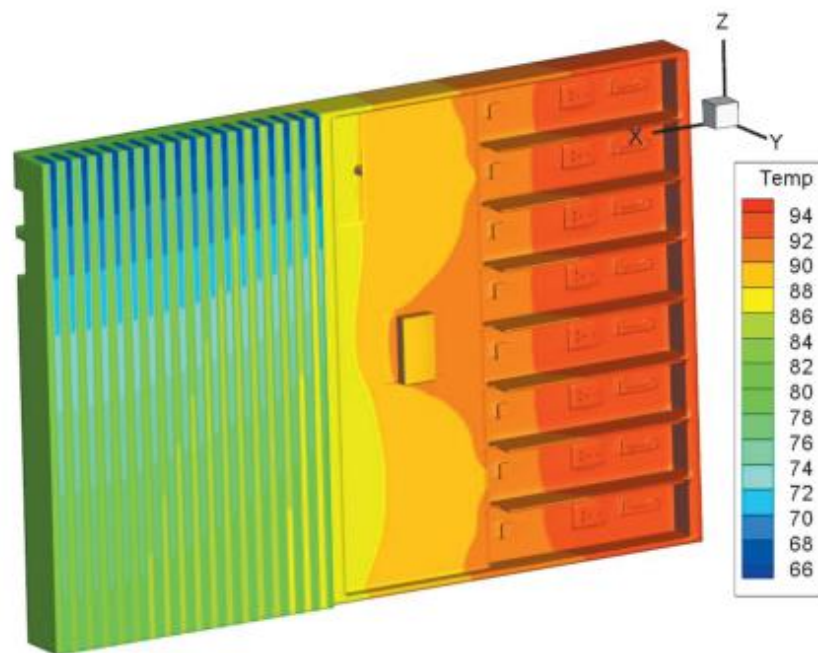
Кроме того, отличаются аппроксимации в программах на фиксированном временном шаге – программа AliceFlow использует нелинейный многопроходный итерационный решатель для установления по температуре на заданном временном шаге, т. е. на шаге по времени в AliceFlow несколько раз повторно собирается матрица системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для устранения нелинейности.

Проведённые расчёты показали существенное (до 22 раз) снижение времени решения тепловой задачи в программе AliceFlow относительно программного продукта ANSYS Icepak.

Благодаря наличию встроенного генератора экономичных неструктурированных сеток и робастному алгебраическому многосеточному методу программа AliceFlow



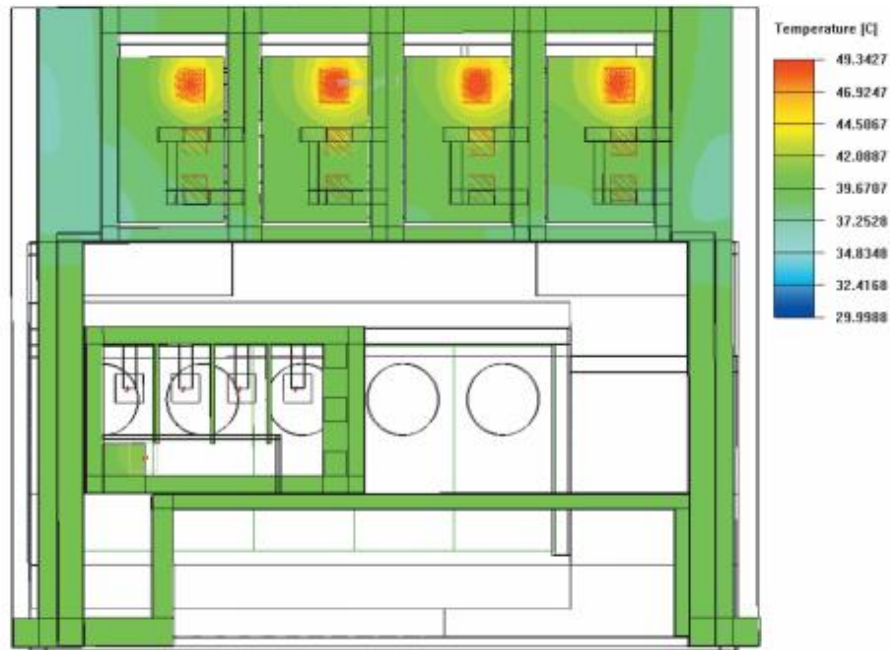
а) Icepak



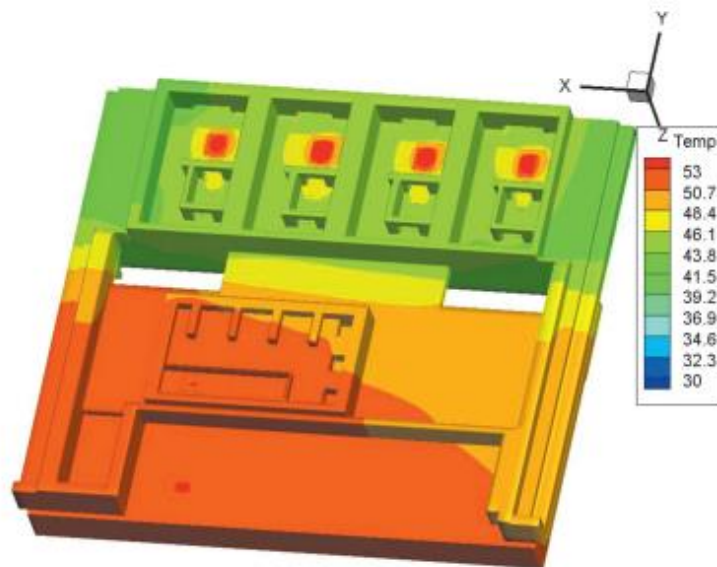
б) AliceFlow

Рис. 2

Расчёт охлаждения модуля приёмо-передающего



a) Icepak



б) AliceFlow

Рис. 3

Расчёт модуля усилителя мощности с радиатором жидкостного охлаждения

может использоваться в дополнении к программному комплексу ANSYS Iserak для проведения оперативных тепловых расчётов при конструировании сложных высокотеплонагруженных изделий.

Литература

1. Груздов, В.В. Электронные блоки на основе AlGaIn/GaN/SiC СВЧ гетеротранзисторов для космических систем / Груздов В.В., Колковский Ю.В., Миннебаев В.М. // Известия Тульского университета. Технические науки. – 2016. – № 12-2. – С. 201-208.
2. Аболдуев, И.М. Импульсный режим работы мощных СВЧ гетеро-полевых AlGaIn/GaN транзисторов / И.М. Аболдуев, Г.З. Гарбер, А.М. Зубков, К.А. Иванов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев, А.В. Редька, А.В. Ушаков // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – № 1 (228). – С. 48-53.
3. Герасимов, А.О. Импульсный усилитель мощности X-диапазона на GaN транзисторах: опыт изготовления / А.О. Герасимов, В.Ф. Синкевич, В.М. Миннебаев, Ал.В. Редька // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – № 1 (228). – С. 30-37.
4. Васильев, А.Г. Твердотельный нитридгаллиевый 500-ваттный импульсный усилитель мощности X-диапазона / А.Г. Васильев, А.А. Глыбин, К.А. Иванов, Ю.В. Колковский, К.С. Мещерякова, В.М. Миннебаев // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – № 1 (226). – С. 83-88.
5. Акинин, В.Е. 8-канальный приёмо-передающий модуль X-диапазона с первичной цифровой обработкой сигнала / В.Е. Акинин, О.В. Борисов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев, Ал.В. Редька, Ал.В. Редька, А.В. Ушаков, А.В. Царев // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – № 1 (248). – С. 57-67.
6. Иванов, К.А. Программа трёхмерного моделирования тепло- и массообмена в радиаторах, состоящих из набора прямоугольных параллелепипедов / Иванов К.А., Зубков А.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013660267 от 30 октября 2013г. <https://github.com/kirill7785/AliceFlow/commits?after=8916554797c8cb6629bc17af220b89a2ead856b2+104&author=kirill7785>
7. Евдокимова, Н.Л. Сравнение переходных тепловых сопротивлений полупроводниковых приборов, полученных методами нагрева и остывания / Н.Л. Евдокимова, В.В. Долгов, К.А. Иванов, А.Ю. Моторин, В.С. Ежов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – № 4 (251). – С. 37-45.
8. Spalart-Allmaras model. URL: https://www.cfd-online.com/Wiki/Spalart-Allmaras_model. Текст электронный.
9. SST k-omega model. URL: https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model. Текст электронный.
10. Demidov D. AMGL: An efficient, flexible, and extensible algebraic multigrid implementation. URL: <https://github.com/ddemidov/amgl>. Текст электронный.
11. Саад, Юсеф. Итерационные методы для разреженных линейных систем: в 2 т. / Юсеф Саад; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: МГУ, 2013.
12. CFD Visualization & Analysis Tools: Tecplot 360. URL: <https://www.tecplot.com/products/tecplot-360>. Текст электронный.
13. ParaView: multi-platform data analysis and visualization application. URL: <https://www.paraview.org/>. Текст электронный.

References

1. Gruzдов V.V., Kolkovskiy Yu.V., Minnebaev V.M. Elektronnyye bloki na osnove AlGaIn/GaN/SiC SVCH geterotranzistorov dlya kosmicheskikh system [Electronic systems based on AlGaIn/GaN/SiC microwave heterogenous transistors for space applications]. Izvestiya tuskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki, 2016, no. 12-2, pp. 201-208.

2. Abolduyev I.M., Garber G.Z., Zubkov A.M., Ivanov K.A., Kolkovskiy Yu.V., Minnebaev V.M., Red'ka A.V., Ushakov A.V. Impul'snyy rezhim raboty moshchnykh SVCh getero-polevykh AlGaIn/GaN tranzistorov [Pulse operating mode of high-power microwave heterogeneous AlGaIn/GaN FETs]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2012, no. 1 (228), pp. 48-53.
3. Gerasimov A.O., Sinkevich V.F., Minnebaev V.M., Redka A.V. Impul'snyy usilitel' moshchnosti X-diapazona na GaN tranzistorakh: opyt izgotovleniya [X-band pulsed power amplifier based on GaN transistors: manufacturing practice]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2012, iss. 1 (228), pp. 30-37.
4. Vasilyev A.G., Glybin A.A., Ivanov K.A., Kolkovskiy Yu.V., Meshcheryakova K.S., Minnebaev V.M. Tverdotel'nyy nitridgalliyevyy 500-vattnyy impul'snyy usilitel' moshchnosti X-diapazona [X-band 500 W GaN solid-state pulsed power amplifier]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2011, no. 1 (226), pp. 83-88.
5. Akinin V.E., Borisov O.V., Kolkovskiy Yu.V., Minnebaev V.M., Redka A.V., Redka A.V., Ushakov A.V., Tsarev A.V. 8-kanal'nyy priyomopere dayushchiy modul' KH-diapazona s pervichnoy tsifrovoy obrabotkoy signala [X-band 8-channel transceiver module with digital signal pre-processing]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2018, no. 1 (248), pp. 57-67.
6. Ivanov K.A., Zubkov A.M. Programma trekhmernogo modelirovaniya teplo- i massoobmena v radiatorakh, sostoyashchikh iz nabora pryamougol'nykh parallelepipedov [The software for 3D modeling of heat and mass transfer in radiators, which consist of a set of rectangular parallelepiped]. Certificate of state registration for software no. 20133626267 of October 30, 2013. Available at: <https://github.com/kirill7785/AliceFlow/commits?after=8916554797c8cb6629bc17af220b89a2ead856b2+104&author=kirill7785>
7. Evdokimova N.L., Dolgov V.V., Ivanov K.A., Motorin A.Yu., Ezhov V.S. Sravneniye perekhodnykh teplovykh soprotivleniy poluprovodnikovyykh priborov, poluchennykh metodami nagreva i ostyvaniya [Transient thermal resistance of semiconductor devices, obtained by heating and cooling methods]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2018, no. 4 (251), pp. 37-45.
8. Spalart-Allmaras model, available at: https://www.cfd-online.com/Wiki/Spalart-Allmaras_model.
9. SST k-omega model, available at: https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model.
10. Demidov D. AMGL: An efficient, flexible, and extensible algebraic multigrid implementation. Available at: <https://github.com/ddemidov/amgl>.
11. Yu. Saad. Iteratsionnyye metody dlya razrezhennykh lineynykh sistem [Iterative methods for sparse linear systems]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvenniy universitet, 2013.
12. CFD Visualization & Analysis Tools: Tecplot 360. Available at: <https://www.tecplot.com/products/tecplot-360>.
13. ParaView: multi-platform data analysis and visualization application. Available at: <https://www.paraview.org/>.