

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 3. С. 113–124
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 113–124

Научная статья
УДК 629.77
DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-113-124

Применение методов топологической оптимизации для обеспечения теплового режима радиоэлектронного оборудования

А.А. Лопатин¹✉, Ю.Б. Александров¹, И.Г. Сомов², А.Р. Биктагирова¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

² АО «Моделирование и цифровые двойники», Москва, Россия

✉ aalopatin@kai.ru

Аннотация. Рассматривается вопрос определения оптимальной формы радиатора, выполненного на основе разрезного оребрения, как типового элемента системы охлаждения теплонагруженных элементов радиоэлектронного и электросилового оборудования. Предложены решение задачи топологической оптимизации по критерию максимальной теплопередачи через радиатор в Ansys Mechanical, новая конструкция и геометрическая форма оребрения с улучшенными термическими характеристиками, построенная на основе результатов топологической оптимизации в среде Ansys. Приведено сравнение характеристик исходной и оптимизированной конструкции.

Ключевые слова: тепловой поток, топологическая оптимизация, моделирование теплообменных процессов, древовидные конструкции

Для цитирования. Лопатин А.А., Александров Ю.Б., Сомов И.Г., Биктагирова А.Р. Применение методов топологической оптимизации для обеспечения теплового режима радиоэлектронного оборудования // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 3. С. 113–124. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-113-124

Original article

Applying topological optimization methods for radio-electronic equipment thermal state ensuring

A.A. Lopatin¹✉, Yu.B. Alexandrov¹, I.G. Somov², A.R. Biktagirova¹

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan', Russia

² JSC "Modeling and digital twins", Moscow, Russia

✉ aalopatin@kai.ru

Abstract. The article considers the issue of determining the heat sink optimal shape based on the split-type finning, as a typical element of the cooling system for heat-loaded elements of radio-electronic and electric power equipment. The authors proposed the solution of the topological optimization problem by the criterion of maximum heat transfer through the heat sink with Ansys Mechanical, as well as the new structure and geometrical shape of the finning with improved characteristics, built on the basis of the topological optimization results obtained with Ansys. Characteristics of the original and optimized designs are compared.

© Лопатин А.А., Александров Ю.Б., Сомов И.Г., Биктагирова А.Р., 2023

Keywords: heat flow, topological optimization, heat exchange processes modeling, tree-like structures

For citation. Lopatin A.A., Alexandrov Yu.B., Somov I.G., Biktagirova A.R. Applying topological optimization methods for radio-electronic equipment thermal state ensuring. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 113–124 (In Russ.). DOI: 10.34759/tp-2023-15-3-113-124

Введение

Для современного радиоэлектронного оборудования свойственно высокое тепловыделение. Работоспособность того или иного прибора или его компонента зависит от теплового состояния системы, в связи с этим актуальными являются вопросы охлаждения и термостабилизации теплонагруженных элементов радиоэлектронного оборудования.

Интенсивное развитие электроники за последние 20 лет привело к значительному росту тепловыделения. Соответственно развиваются и методы отвода тепла, существуют как простые, пассивные системы, оснащенные радиатором, так и сложнейшие и высокотехнологичные испарительные системы, реализующие цикл холодильной машины и отводящие тепловые потоки высокой плотности. При этом выбор способа охлаждения должен быть обязательно технически и экономически обоснован. В решении таких задач должен преобладать принцип необходимой достаточности. Так, в случае отвода тепловых потоков небольшой плотности возможно применение пассивного или активного воздушного охлаждения, выполненного на основе алюминиевого или медного оребрения различной конфигурации. Если же тепловая нагрузка достаточно велика, а охлаждаемые элементы миниатюрны, например как в авиационном электро- и радиооборудовании, современной вычислительной технике, элементах питания, необходимо использовать вынужденно конвективное жидкостное охлаждение или испарительные системы. Переход от пассивного отвода тепла к более сложным системам связан со значительным удорожанием готового изделия. Кроме того, наличие дополнительных подвижных элементов снижает надежность всей системы в целом. Фактически в ситуации, когда необходимо обеспечить отвод тепловых потоков умеренной плотности, возможно использование пассивных систем охлаждения с применением эффективных систем интенсификации теплоотдачи, обеспечивающих значительный рост теплоотвода при сохранении мас-

согабаритных характеристик системы. Проведя подробный анализ различных способов интенсификации теплоотдачи в свободноконвективных системах охлаждения, авторы пришли к выводу о том, что существующий предел эффективности пассивных систем охлаждения еще не исчерпан и может быть повышен за счет применения современных методов оптимизации конструкции оребрения. Достаточно подробно вопросы топологической оптимизации применительно к теплообменным процессам рассмотрены в работах T. Lei, J. Alexandersen, Ge Ruihuan, A. Vargas [3–6].

Создание узлов новых приборов и устройств на основе топологической оптимизации базируется прежде всего на аддитивных технологиях. Сегодня при наличии порошков необходимых металлов можно спроектировать практически любой механизм, в том числе и такие технически сложные устройства, как авиационные и ракетные двигатели. По данным аналитиков The Boston Consulting Group, к 2020 году объем рынка 3D-печати вырос втрое по сравнению с 2015 годом, а к 2035 году он превысит 350 млрд долл.

Одними из первых возможности топологической оптимизации стали использовать специалисты в области разработки и создания сложных металлоконструкций, то есть там, где необходимо получить максимальную экономию материала без потери технологических и прочностных свойств изделия.

Оптимизация массогабаритных характеристик различных устройств является важнейшей задачей, стоящей перед конструкторами, занимающимися проектированием изделий в области авиационной и ракетно-космической техники, вычислительными и инфокоммуникационными системами, специалистами в сфере тепло- и электроэнергетики и др. Кроме того, большой интерес для реального сектора экономики представляет создание элементов систем охлаждения с оптимизированной топологией.

Инженер Фраунгоферовского института интегральных схем (Гамбург) Фриц Ланг спроек-

тировал и создал радиатор для охлаждения мощных светодиодов и компьютерных чипов [7]. Для сравнения он применил два способа моделирования: параметрическую и топологическую оптимизацию.

На рис. 1 показано, что параметрическая оптимизация обеспечивает равномерное и симметричное расположение ребер, тогда как в результате топологической оптимизации получается сложная бионическая (кораллообразная или древовидная) форма ребер, толщина которых уменьшается по мере приближения к периферии.

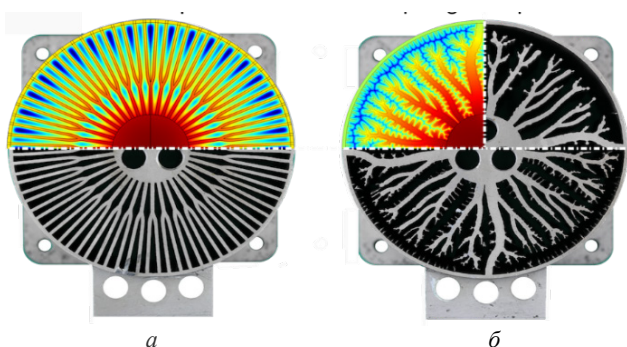


Рис. 1. Варианты конструкции радиатора, полученные с помощью параметрической оптимизации (а) и топологической оптимизации (б). Изображение взято из работы Фрица Ланга [7]

На основе сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных команда во главе с Фрицем Лангом пришла к выводу, что наиболее оптимальными теплогидравлическими характеристиками обладает радиатор, выполненный с помощью топологической оптимизации. При этом необходимо отметить, что с технологической точки зрения изготовить радиатор с оптимизированной топологией традиционными механическими методами не представляется возможным. Из этого следует, что единственным рациональным способом получения сверхэффективных, но сложных в изготовлении теплообменных поверхностей является 3D-печать. Внешний вид готовой системы охлаждения, выполненной с помощью аддитивных технологий, представлен на рис. 2.

Из примера, представленного на рис. 2, следует, что одним из наиболее перспективных способов повышения эффективности параметров системы охлаждения является топологическая оптимизация, позволяющая изначально проектировать рабочие элементы исходя из их тепловых и напряженных состояний, а также

условий эксплуатации. Современный математический и вычислительный аппарат позволяет достаточно широко применять эти методы для решения прикладных задач.

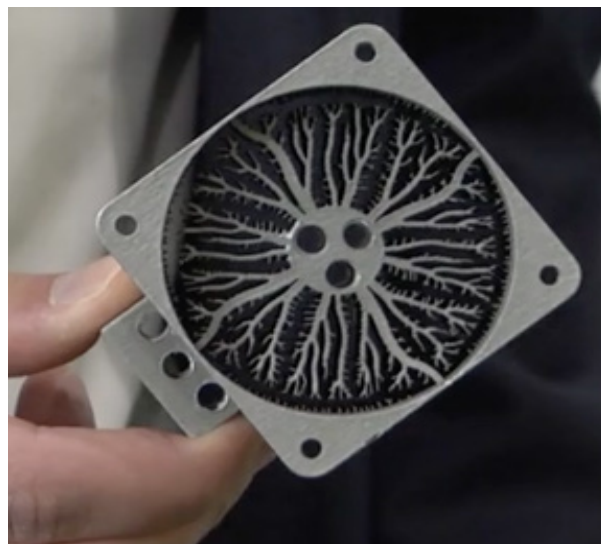


Рис. 2. Внешний вид радиатора, выполненного с помощью 3D-печати на основе топологической оптимизации

Многие высокотеплонагруженные элементы эксплуатируются в условиях, при которых необходимо обеспечить минимальные температуры рабочей поверхности при минимальных же массогабаритных характеристиках. К таким системам можно отнести мобильные диагностические комплексы неразрушающего контроля, бортовое авиационное и аэрокосмическое телекоммуникационное и вычислительное оборудование и др. Применение механизмов топологической оптимизация рабочих теплообменных поверхностей позволит получить дополнительный ресурс, способный, с одной стороны, увеличить рабочие мощности устройства при тех же массогабаритных параметрах, а с другой – снизить размеры прибора при постоянной тепловой эффективности.

В данной работе рассматриваются возможности применения методов топологической оптимизации в свободноконвективных системах охлаждения применительно к мобильным рентгеновским дефектоскопам непрерывного действия. В качестве исходной физической модели использовалась система с разрезным оребрением. Более подробно конструкция, рабочие параметры, а также тепловые характеристики таких систем представлены в работах А.А. Лопатина, Д.В. Николаевой [1, 2].

Постановка задачи. Тепловой расчет базовой модели

Моделирование теплообменных процессов проводилось в стационарной постановке в программном комплексе ANSYS Steady-State Thermal.

Для задачи стационарной теплопроводности уравнение равновесия конечных элементов (КЭ) имело вид:

$$P = K\varphi.$$

Здесь P – вектор тепловой нагрузки; K – матрица проводимости; φ – вектор узловых температур.

Как правило, при стационарной теплопроводности задача топологической оптимизации состоит в определении оптимальной конфигурации конструкции, обеспечивающей отвод максимальных тепловых потоков для заданного объема. В качестве целевой функции принята теплоемкость, значение которой в ходе расчета минимизировалось, при этом переменная функция плотности материала отражала присутствие или отсутствие материала радиатора в расчетной области. Аналогичные подходы использовались в работах [8, 9].

Исходная геометрия модели (рис. 3) представляет собой радиатор массой 1.7 кг, состоящий из 20 ребер, расположенных по осевой схеме с шагом 18° . Более подробно конструкция системы представлена в работах А.А. Лопатина, Д.В. Николаевой [1, 2].

Применение методов математического моделирования позволяет получить распределение температур на оребрении радиатора для дальнейшего использования при решении задачи топологической оптимизации системы охлаждения, на основании которой в свою очередь будет проводиться распределение материала внутри кэ-модели.

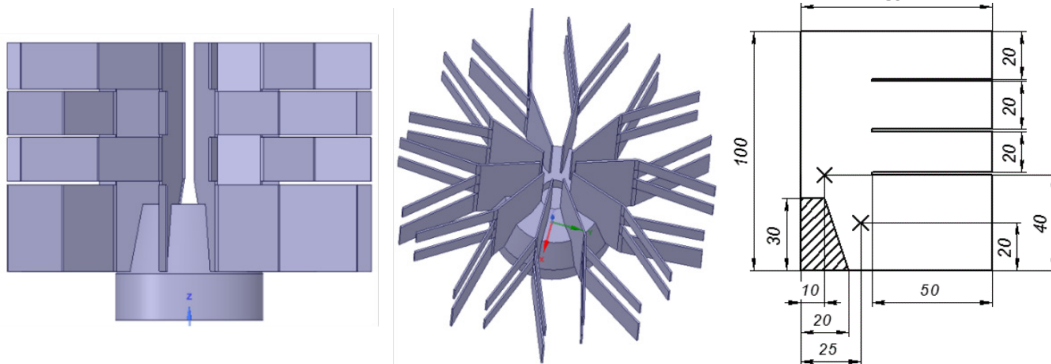


Рис. 3. Исходная геометрия

На основе анализа существующих расчетных моделей был определен оптимальный размер одного расчетного элемента, равный 1.5 мм [1]. Уменьшение размера ячейки нецелесообразно, так как это значительно увеличит время построения сетки и при этом не даст существенного прироста точности моделирования. На рис. 4 представлена сетка с элементами первого порядка. В качестве граничных условий принята температура поверхности охлаждаемого элемента, равная 80°C . Такое значение температуры обусловлено условиями эксплуатации некоторых элементов радиоэлектронного и телекоммуникационного оборудования. Например, стеклянные рентгеновские трубки – основной элемент рентгеновской дефектоскопии начинает разрушаться при температурах более 80°C , и поэтому очень важно обеспечивать эффективный отвод тепла и стабильный температурный рабочий режим всей системы.

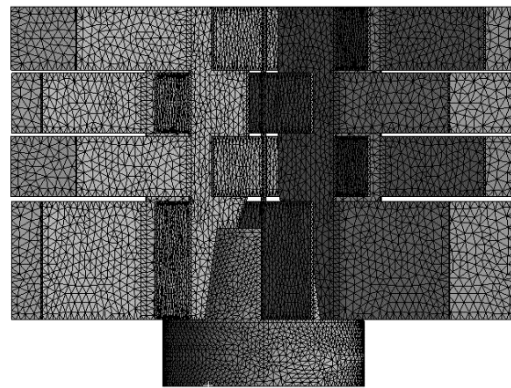


Рис. 4. Сетка, используемая для теплового расчета

Результаты теплового расчета базовой модели с разрезным оребрением представлены на рис. 5. Периферийная часть оребрения характеризуется достаточно малым градиентом температуры с окружающей средой. Это свиде-

тельствует о существующих возможностях повышения эффективности разрезного оребрения. Традиционные способы интенсификации теплоотдачи, основанные на развитии теплообменных поверхностей, как правило, приводят к росту массогабаритных характеристик системы охлаждения. Кроме того, основываясь на выводах, представленных в научных работах [1, 2], можно утверждать, что разрезное оребрение и так является одним из наиболее эффективных методов повышения эффективности теплоотдачи. Соответственно, количественное повышение тепловых параметров лежит в области топологической оптимизации, позволяющей максимально эффективно распределить материал радиатора, а также сконфигурировать всю теплоотдающую поверхность.

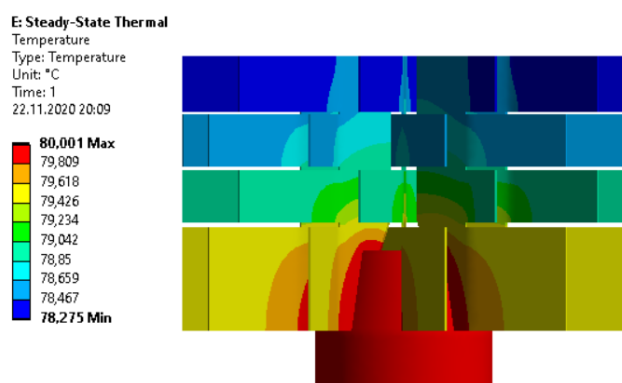


Рис. 5. Результаты теплового расчета

Топологическая оптимизация

Рассматривая вопросы топологической оптимизации, необходимо более подробно остановиться на особенностях процесса получения модернизированной модели радиатора. Именно такая модель, обеспечивающая в зависимости от условий максимальный теплоотвод при минимальных массогабаритных характеристиках, будет являться целью трансформации.

В начале процесса трансформации на основе исходной конструкции формируется проектная область, в которой будет проводиться оптимизация. Далее в полученной области создается расчетная сетка. Предварительно область построения сетки упрощается путем деления ее секущей горизонтальной плоскостью на ряд объемов с простой геометрической формой (рис. 6). Такой подход позволяет сократить продолжительность расчета и оптимизировать необходимые для этого вычислительные ресурсы.

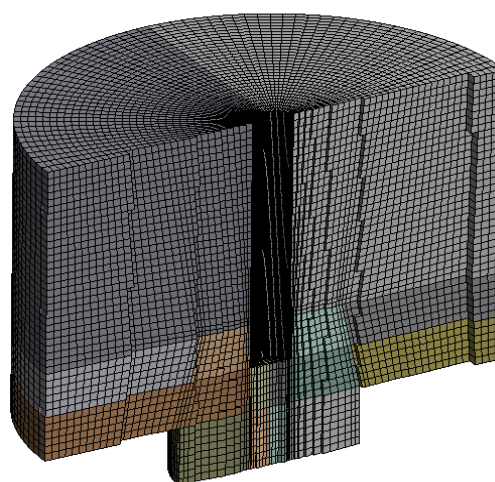


Рис. 6. Сетка, используемая для топологической оптимизации

Результатом данного этапа оптимизации является получение предварительной картины распределения плотности материала, показанного в плоскости сечения радиатора на рис. 7. Модель, представленная на рис. 7, имеет древовидную форму распределения материала со значительными ответвлениями. Древовидная форма является наиболее распространенной при оптимизации и представлена в работе [4].

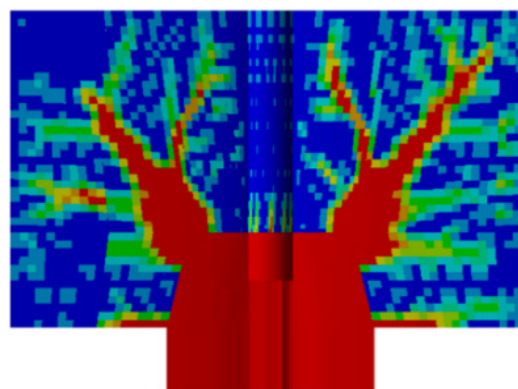


Рис. 7. Распределение плотности материала в плоскости сечения по модели

На следующем этапе преобразования получена 3D-модель распределения плотности материала, представленная на рис. 8.

Дальнейшая работа по формированию оптимизированного радиатора связана в значительной степени с интерпретацией полученных результатов. Фактически для создания модели в твердотельном формате необходимо выполнить так называемый реверс-инжиниринг в программном комплексе SpaceClaim. Внешний вид модели представлен на рис. 9.

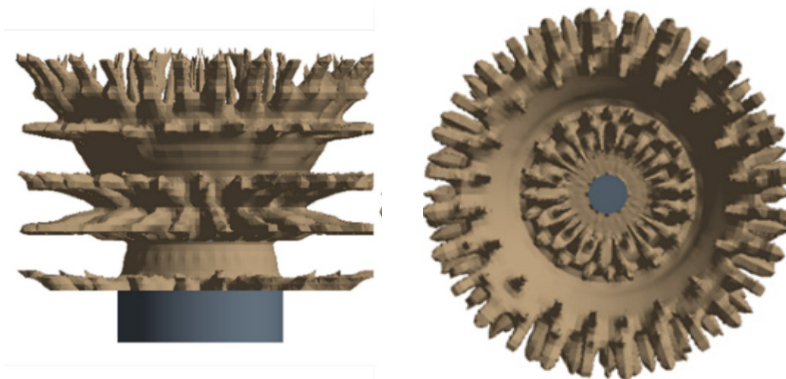


Рис. 8. Распределение плотности материала в трехмерном пространстве

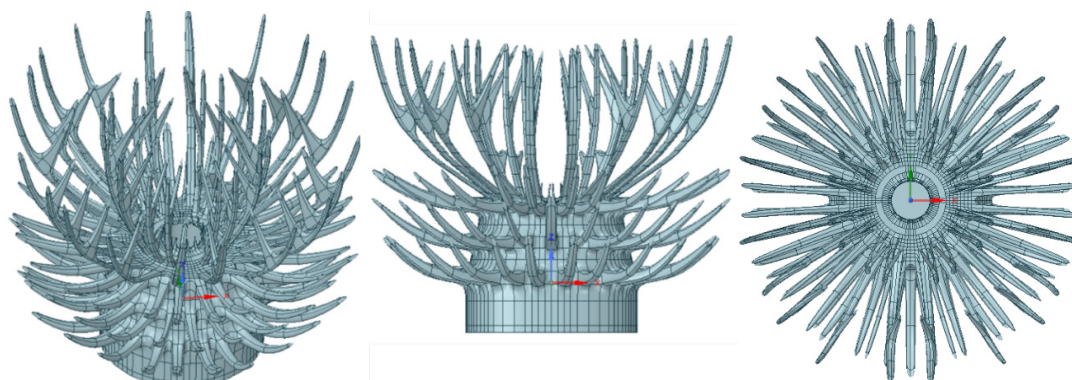


Рис. 9. Топологически оптимизированная твердотельная геометрия

Необходимо отметить внешнее сходство формы полученного радиатора с растениями, произрастающими в пустынной местности. На территориях с жарким климатом и высокой среднесуточной температурой для нормального произрастания различным видам растений приходится формировать свою листовую структуру исходя из условий оптимальности теплообменных процессов. Таким образом, можно провести аналогию между полученной моделью и некоторыми видами кактусов.

Вопросам бионического дизайна различных инженерных объектов в современной тематической научной литературе уделяется достаточно большое внимание. Прежде всего это связано с возможностями использования преимуществ биологических объектов в современных технических системах и устройствах. В современных инженерных системах и их отдельных элементах практическое применение нашли оптимизированные конструкции, выполненные на принципах бионического дизайна.

Для определения тепловой эффективности полученной оптимизированной физической модели проведен расчет в программе ANSYS Fluent с учетом конвективного и лучистого теплообмена.

Тепловой расчет базовой и оптимизированной конструкции

В условиях свободной конвекции восходящее движение теплоносителя обусловлено наличием разности плотностей рабочей среды. Эффективность работы радиатора в значительной степени зависит от разности температур окружающей среды и охлаждаемой поверхности. Одним из способов интенсификации теплоотдачи в таких условиях является использование различных вариантов поверхностных турбулизаторов, способствующих постоянному обновлению пограничного слоя. Так, в исходной модели в качестве таких интенсификаторов использовалось разрезное оребрение. Более подробно вопросы интенсификации теплоотдачи при нанесении разрезного оребрения в условиях свободной конвекции рассмотрены в работе А.А. Лопатина, Д.В. Николаевой [1]. Применение механизмов топологической оптимизации позволило получить новую, достаточно сложную для изготовления традиционными механическими методами обработки конструкцию радиатора. В связи с этим физическое моделирование тепловых процессов на оптимизированном рабочем участке было заменено мате-

матическим в программном комплексе ANSYS Fluent. В расчетах учитывался конвективный и лучистый теплообмен.

Вопросы интенсификации теплоотдачи в свободноконвективном радиаторе, выполненном на основе разрезного оребрения, были рассмотрены в научной работе [2]. Отметим, что проблемам эффективности разрезного осевого оребрения в цилиндрических каналах в современной литературе уделено не так много внимания. Цель исследования – поиск и определение оптимальной расчетной модели, удовлетворяющей граничным условиям. В работе «Численное моделирование процессов теплоотдачи в системах с разрезным оребрением» [1] предложена расчетная методика, позволяющая определить теплоотдачу в условиях свободной конвекции в системе с разрезным осевым оребрением.

Верификация численной модели с результатами экспериментальных исследований включала в себя не только рассмотрение конечного результата, а именно достижения максимально допустимой температуры рабочего участка, но и изучение всего процесса теплообмена. Поэтому в ходе работы нами было проведено моделирование процесса теплоотдачи на различных стадиях нагрева до 190 Вт включительно. На основе проведенного сопоставления данных физического и математического моделирования установлено, что максимальное отклонение теплоотдачи при учете лучистого теплообмена составляет 4 % [1].

Основываясь на полученных результатах, для проведения расчета был смоделирован контрольный объем в виде цилиндра диаметром 3.2 калибра и 5 калибров по высоте (рис. 10). Радиатор установлен внутри этого цилиндра с небольшим смещением от нижней грани. В связи с осевой симметрией модели была принята расчетная область, равная 1/4 части исходного цилиндра.

С целью упрощения задачи и оптимизации вычислительных мощностей при моделировании были наложены следующие граничные условия: на периферии цилиндра установлено условие постоянства статического давления с заданной температурой 296 К; на округлой поверхности расчетного сектора, в основании радиатора, была задана температура, равная 353 К. На отсеченных гранях упрощенной секторной модели (рис. 10, б) задавалось условие симметрии.

Было проведено моделирование теплового состояния базового и оптимизированного рабочих участков в стационарной постановке. Сеточная модель создавалась в программе Fluent Meshing с элементами типа «полиэдра» и нанесением пристеночных сгущений вблизи обтекаемых поверхностей. Качество сетки по параметру скошенности элементов не превышало 0.8, а количество сеточных элементов равнялось примерно 5 млн (рис. 11).

Сходимость задачи контролировалась по мониторам конвергенции и дополнительно по температуре и тепловому потоку на выходе из расчетной области и на поверхности нагрева.

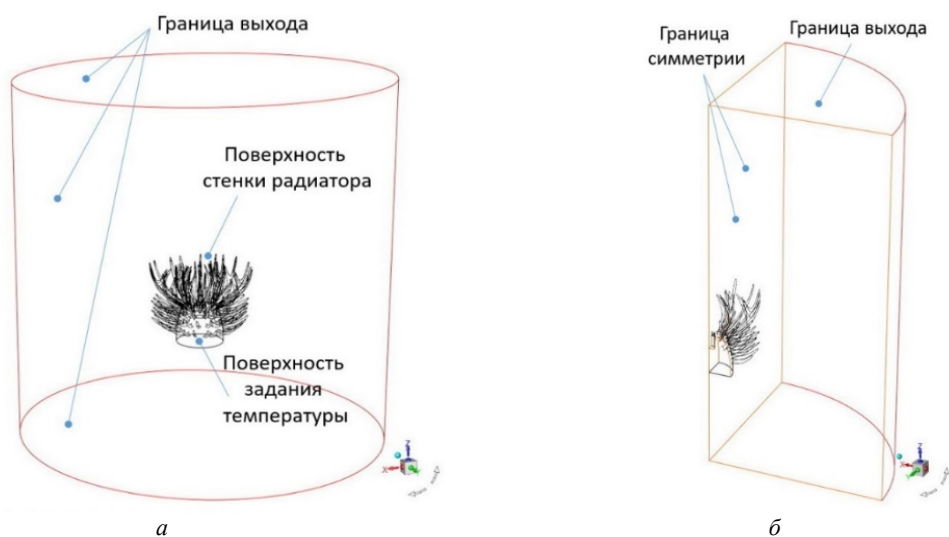


Рис. 10. Расчетная область с нанесенными граничными условиями для оптимизированной модели: а – полная, б – упрощенная для 1/4 расчетной области

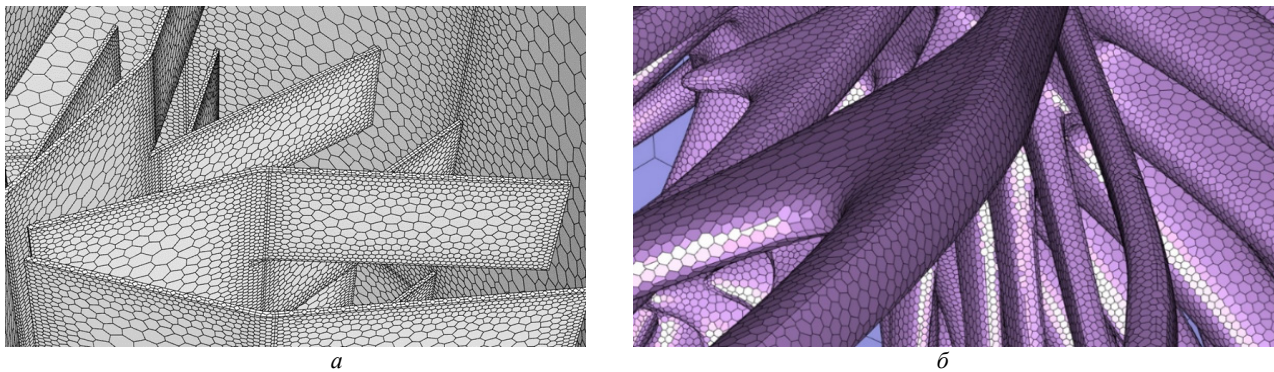


Рис. 11. Нанесенные сетки на расчетную модель: *а* – базовая, *б* – топологически оптимизированная

Оценка оптимальности конструкции проводилась по тепловому потоку, проходящему через основание радиатора. Максимальные значения теплового потока соответствовали более эффективной конструкции радиатора, при которой она могла рассеять в окружающее пространство большее количество тепла.

Результаты численного моделирования рассмотрены в части распределения температуры и скорости за срезом рабочего участка в продольных и поперечных плоскостях. Качественная и количественная картина моделирования представлена на рис. 12 и 13, а также в табл. 1.

Из рис. 12 следует, что оптимизированный радиатор обладает большим диаметром теплового рассеивания (область высокой температуры во внешней зоне) и достаточно высокой температурой в осевом направлении. Более яркие, красные цвета соответствуют максимальной температуре в 353 К, а синие минимальной

в окружающем пространстве температуре – 296 К. Качественно такое распределение температур как в зоне оптимизированного ребрения, так и за пределами радиатора свидетельствует о более эффективной передаче тепла от центральной части ребрения к периферийной зоне. Кроме того, моделирование температурных полей на торцевой поверхности ребер позволило определить, что топологически оптимизированная модель обеспечивает более значительный температурный напор, чем базовая, позволяя тем самым отводить большие тепловые потоки при одинаковых внешних условиях.

На рис. 13 представлено сравнение расчетных температур воздушного потока за срезом базового и оптимизированного рабочего участка в точках 20, 15 и 10. В связи с осесимметричной формой радиатора все расчетные значения параметров теплоносителя (температура и скорость) представлены в радиальном сечении (рис. 12 и 14). Точки, в которых определялись

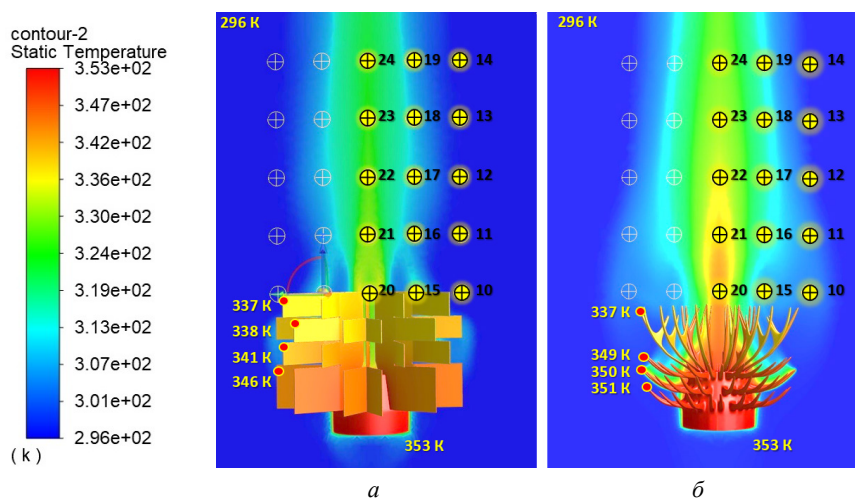


Рис. 12. Распределение температуры в плоскости, проходящей через центральную ось радиатора: *а* – базовая модель; *б* – топологически оптимизированная модель

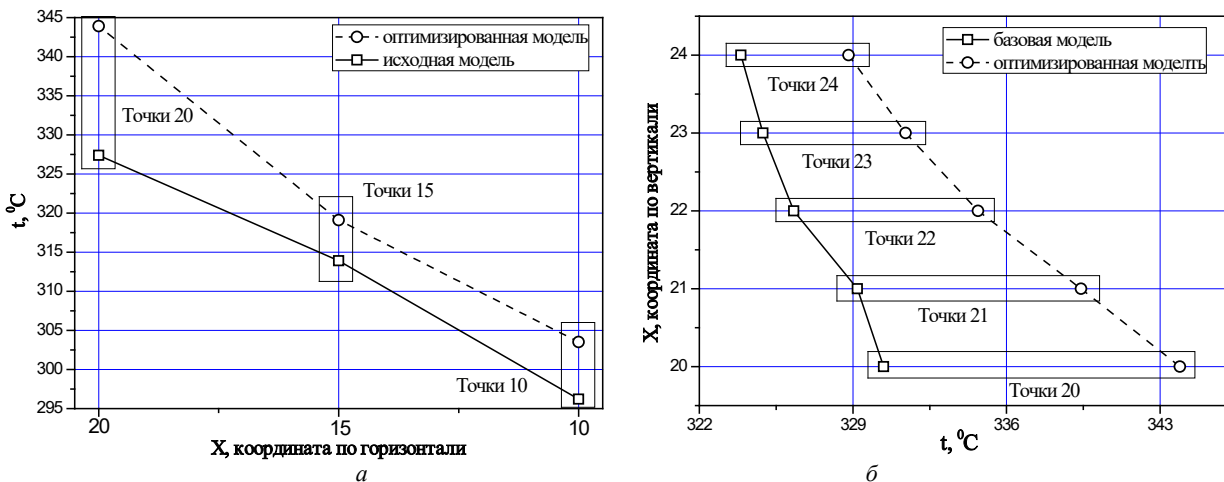


Рис. 13. Сравнение температур теплоносителя за пределами рабочего участка: *a* – горизонтальное направление; *б* – вертикальное направление

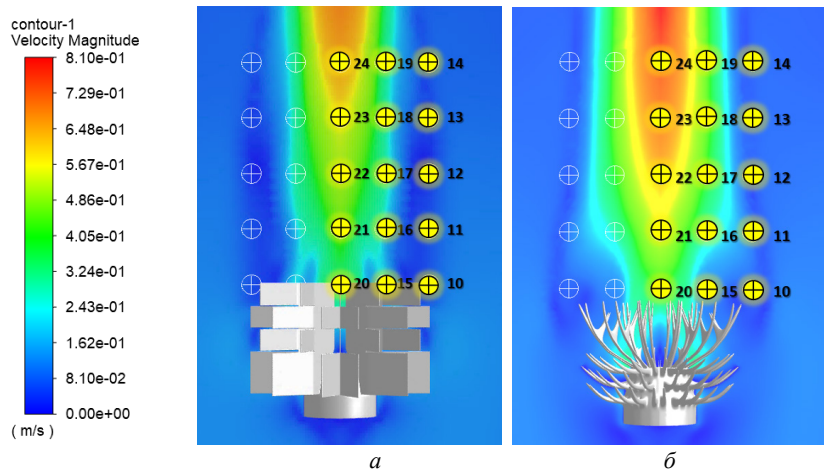


Рис. 14. Распределение скорости в плоскости, проходящей через центральную ось радиатора: *a* – базовая модель, *б* – топологически оптимизированная модель

параметры рабочей среды, расположены эквидистантно как по ширине, так и по высоте движения теплоносителя. Из графика, представленного на рис. 13, следует, что температура за пределами оптимизированного радиатора во всех геометрических диапазонах (по горизонтали и вертикали над рабочими участками) выше, чем аналогичный параметр базового рабочего участка. Применение механизмов топологической оптимизации позволяет сформировать такую геометрическую форму ребрения, которая будет максимально обеспечивать взаимодействие теплоотдающих поверхностей с восходящими потоками теплоносителя. В нашем случае изначальная древовидная форма в процессе оптимизации трансформировалась в структуру типа «кактус». Подобная интерпретация результатов моделирования позволила получить максимальное температурное поле за пределом торцевого сечения радиатора.

Необходимо отметить, что процесс топологической оптимизации завершается этапом постмодельной интерпретации результатов, базирующимся на выборе наиболее эффективной формы радиатора.

Таким образом, максимальную теплоотдачу обеспечивают природоподобные структуры, представляющие собой сложно изготовляемые с технологической точки зрения элементы, например рассматриваемую форму радиатора типа «кактус» можно изготовить только методами аддитивных технологий.

Как следует из графиков, представленных на рис. 15, скорость восходящих потоков теплоносителя (нагретого воздуха) как в поперечном, так и в продольном сечениях за торцевой поверхностью оптимизированного радиатора выше, чем у базовой модели. При этом по всей высоте продольного сечения за срезом физической

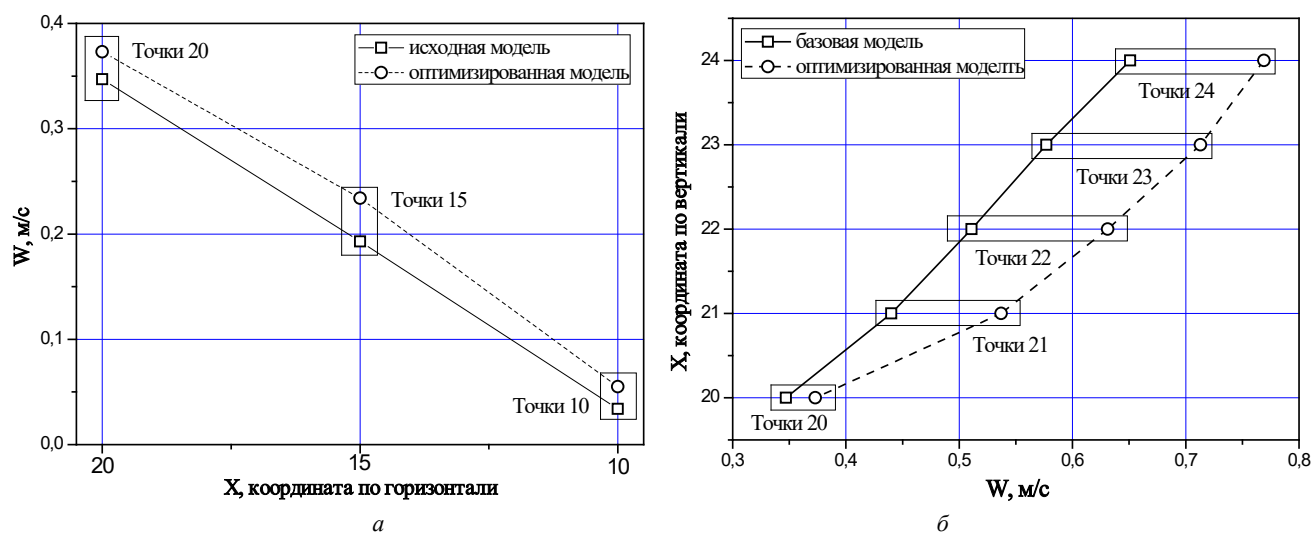


Рис. 15. Сравнение скорости естественно-конвективного потока теплоносителя за пределами рабочего участка (базовой и оптимизированной модели): а – горизонтальное направление; б – вертикальное направление

модели наблюдается более значительный опережающий рост скорости потока. В расчетных точках 24 максимальная скорость восходящих потоков теплоносителя у базовой модели составляет 0.64 м/с, а у оптимизированной соответственно – 0.78 м/с. Разница между скоростями в 18 % обусловлена большим перепадом температур в оптимизированной модели. Ускоренное обновление слоев теплоносителя вблизи оребрения оптимизированного радиатора приводит к интенсификации теплоотдачи и, как следствие, к более существенному отводу тепла. Таким образом, с точки зрения охлаждения радиаторная структура в форме «кактуса» обеспечивает максимально возможное в текущих условиях взаимодействие теплоносителя с оптимизированным оребрением.

В результате проведенного расчета при фиксированной величине теплового потока были получены данные, свидетельствующие о значительной оптимизации массогабаритных характеристик при использовании механизмов топологической оптимизации. Внешний вид базовой и оптимизированной моделей при тепловой нагрузке 42 Вт представлен на рис. 16. Сравнительные данные по массогабаритным характеристикам рабочих участков представлены в табл. 1.

Таблица 1. Масса-габаритные характеристики базового и оптимизированного радиатора

Модель	Тепловой поток, Вт	Масса, кг	Площадь поверхности теплообмена, м ²
Базовая	42	1.7	0.146
Оптимизированная	42	1.4	0.087

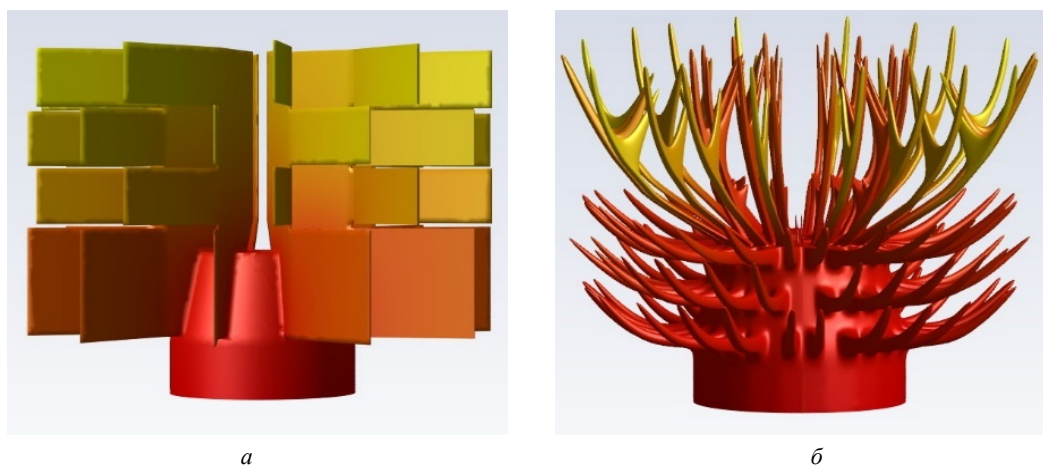


Рис. 16. Численные модели радиаторов: а – базовая; б – топологически оптимизированная

Так, применение топологической оптимизации позволило сократить общую массу радиатора на 18 %. При этом рабочая площадь теплообмена уменьшилась на 40 %. На рис. 16 можно оценить качественную картину процесса теплоотдачи при тепловой нагрузке 42 Вт. Как следует из картины процесса, оребрение по типу «кактус» обеспечивает больший температурный напор на оконечности оребрения как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Такие геометрические параметры модернизированного оребрения позволяют обеспечить максимальное взаимодействие теплоносителя с поверхностями теплообмена.

Заключение

В работе представлены результаты применения методов топологической оптимизации на примере радиатора, выполненного на основе разрезного осевого оребрения. Выявлено, что критически важным для получения наиболее эффективной формы радиатора является интерпретации первичных результатов моделирования. Установлено, что в условиях свободной конвекции оптимизированный радиатор позволяет получить на торцевых поверхностях оребрения больший температурный напор, чем в базовой модели. Аналогичная картина наблюдается с температурными и скоростными полями за пределами оптимизированного радиатора. Это свидетельствует о более эффективном отводе тепловых потоков топологически оптимизированной модели радиатора. Полученный оптимизированный радиатор при одинаковой отводимой тепловой нагрузке обладает меньшей массой (на 18 %) и площадью (на 40 %), чем базовый, выполненный на основе разрезного оребрения. Таким образом, применение методов топологической оптимизации позволяет повысить эффективность использования материала и снизить массогабаритные характеристики изделия. Вместе с тем, учитывая сложную геометрию получаемых теплоотдающих конструкций, широкое применение методов топологической оптимизации, на сегодняшний день объективно сдерживается уровнем развития и доступности аддитивных технологий.

Список источников

1. Лопатин А.А., Николаева Д.В. Численное моделирование процессов теплоотдачи в системах с разрезным ореб-

рением // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» (Казань, 8–10 августа, 2018): сб. ст. Казань, 2018. С. 393–396.

2. Lopatin A.A., Nikolaeva D.V. Influence of some geometrical parameters of split ribs on the heat transfer under free convection. *Russian Aeronautics*, 2019, vol. 62, no. 2, pp. 254–258.
3. Lei T., Alexandersen J., Lazarov B.S., Wang F., Haertel J.H.K., Sigmund O., Engelbrecht K. Investment casting and experimental test of heat sinks designed by topology optimization. *Under review in International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 127, part B. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.060>
4. Haertel J.H.K., Nellis G.F. A Fully Developed Flow Thermofluid Model for Topology Optimization of 3D-Printed Air Cooled Heat Exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 119, pp. 10–24.
5. Ge R., Humbert G., Martinez R., Attallah M., Sciacovelli A. Additive manufacturing of a topology-optimised multi-tube energy storage device: Experimental tests and numerical analysis. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 115878. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2020.115878
6. Iradukunda A.-C., Vargas A., Huitink D., Lohan D. Transient thermal performance using phase change material integrated topology optimized heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 179, 115723.
7. Lange F., Heintz C., Lil G., Emmelmann C. Numerical optimization of active heat sinks considering restrictions of selective laser melting. Conference: COMSOL Conference in Lausanne, 2018.
8. Wu S., Zhang Y., Liu S. Topology optimization for minimizing the maximum temperature of transient heat conduction structure, 2019. DOI: 10.1007/s00158-019-02196-9
9. Bendsoe M.P., Sigmund O. *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. Springer Berlin, Heidelberg, 2004, 271 p. DOI: 10.1007/978-3-662-05086-6

References

1. Nikolayeva D.V., Lopatin A.A. Chislennoye modelirovaniye protsessov teplootdachi v sistemakh s razreznym orebreniyem. *Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem "Novye tekhnologii, materialy i oborudovaniye rossiyskoy aviakosmicheskoy otrasli"*, sbornik statey. [Numerical modeling of heat transfer processes in systems with split fins in the collection of articles: new technologies, materials and equipment of the russian aerospace industry (Kazan', 8–10 avgusta, 2018)]. Kazan', 2018, pp. 393–396. (In Russ.)
2. Lopatin A.A., Nikolaeva D.V. Influence of some geometrical parameters of split ribs on the heat transfer under free convection. *Russian Aeronautics*, 2019, vol. 62, no. 2, pp. 254–258.
3. Lei T., Alexandersen J., Lazarov B.S., Wang F., Haertel J. H. K., Sigmund O., Engelbrecht K. Investment casting and experimental test of heat sinks designed by topology optimization. *Under review in International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 127, part B. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.060>
4. Haertel J.H.K., Nellis G.F. A Fully Developed Flow Thermofluid Model for Topology Optimization of 3D-Printed Air Cooled Heat Exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 119, pp. 10–24.

5. **Ge R., Humbert G., Martinez R., Attallah M., Sciacovelli A.** Additive manufacturing of a topology-optimised multi-tube energy storage device: Experimental tests and numerical analysis. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 115878. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2020.115878
6. **Iradukunda A.-C., Vargas A., Huitink D., Lohan D.** Transient thermal performance using phase change material integrated topology optimized heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 179, 115723.
7. **Langel F., Heinl C., Lil G., Emmelmann C.** Numerical optimization of active heat sinks considering restrictions of selective laser melting. Conference: COMSOL Conference in Lausanne, 2018.
8. **Wu S., Zhang Y., Liu S.** Topology optimization for minimizing the maximum temperature of transient heat conduction structure, 2019. DOI: 10.1007/s00158-019-02196-9
9. **Bendsoe M.P., Sigmund O.** *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. Springer Berlin, Heidelberg, 2004, 271 p. DOI: 10.1007/978-3-662-05086-6

Статья поступила в редакцию 14.11.2022; одобрена после рецензирования 27.02.2023; принята к публикации 09.03.2023.

The article was submitted on 14.11.2022; approved after reviewing on 27.02.2023; accepted for publication on 09.03.2023.