

Two-Mode Fractal Radiator with Rotatable Fin Elements Based on a Modified Y-System

Lyubimov P.V., Novotelnova A.V.
ITMO University
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This study is devoted to a dual-mode fractal radiator with a modified topology. Its key feature is the ability to alter end-wall orientation via gear engagement between wall-mounted gears and discrete positioning wheels. The basic fractal structure derived from a Y system by replacing the initiator with a V initiator and imposing a conjugation condition on parallel daughter walls. This yields a natural topological feature: the parallel end walls of the final recursion level can rotate into regular polygonal face positions. The aim was to create a novel finning that combines fractal efficiency with configurational adaptability for optimizing heat transfer under varying conditions, and to evaluate its thermal performance via steady state modeling. Objectives included: developing a parametric fractal model incorporating conditions for the topological feature; designing a dual mode module with rotating elements; and engineering the rotation mechanism. Numerical simulations of steady conjugate heat transfer were performed for open and closed configurations using full element models. Key results include: validation of the rotation mechanism design; confirmation that closed configuration walls act as reflectors, enhancing radiative heat transfer; and demonstration of thermal accumulator operation in the closed mode. The significance of the obtained results lies in the fact that a two-mode fractal radiator module with discrete transmission, allowing the fin topology to be changed, has been developed and analyzed. The proposed solution expands the capabilities of designing heat exchange systems, offering a solution suitable for local modernization of sections with variable operating modes.

Keywords: Fractals, fractal radiator, dual-mode module, Y-system, rotating walls, numerical modeling, radiative heat exchange, convection, adaptive cooling.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2026.2-70.14>

UDC: 621.565.93:519.876.5

Radiator fractal bimodal cu elemente de aripioare rotative bazate pe un sistem Y modificat

Lyubimov P.V., Novotelnova A.V.

ITMO Universitatea, St. Petersburg, Federatia Rusă

Rezumat. Acest studiu este dedicat unui radiator fractal bimodal cu o topologie modificată. Caracteristica sa cheie este capacitatea de a modifica orientarea peretelui terminal prin angrenarea angrenajului dintre angrenajele montate pe perete și roțile de poziționare discrete. Structura fractală de bază a derivat dintr-un sistem Y prin înlocuirea inițiatorului cu un inițiator V și impunerea unei condiții de conjugare pe pereții paraleli. Acest lucru produce o caracteristică topologică naturală: pereții terminali paraleli ai nivelului final de recurență se pot roti în poziții regulate ale fețelor poligonale. Scopul a fost de a crea o nouă înotătoare care combină eficiența fractală cu adaptabilitatea configurațională pentru optimizarea transferului de căldură în condiții variabile și de a evalua performanța sa termică prin modelarea în stare staționară. Obiectivele au inclus: dezvoltarea unui model fractal parametric care să încorporeze condițiile pentru caracteristica topologică; proiectarea unui modul bimodal cu elemente rotative; și ingineria mecanismului de rotație. Simulările numerice ale transferului de căldură conjugat staționar au fost efectuate pentru configurații deschise și închise folosind modele cu elemente complete. Rezultatele cheie includ: validarea designului mecanismului de rotație; confirmarea faptului că pereții în configurație închisă acționează ca reflectoare, sporind transferul radiativ de căldură; și demonstrarea funcționării acumulatorului termic în modul închis. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că a fost dezvoltat și analizat un modul radiator fractal bimodal cu transmisie discretă, care permite modificarea topologiei aripioarelor. Soluția propusă extinde capacitățile de proiectare a sistemelor de schimb de căldură, oferind o soluție potrivită pentru modernizarea locală a secțiunilor cu moduri de funcționare variabile.

Cuvinte-cheie: fractali, radiator fractal, modul dual-mode, sistem Y, pereți rotativi, modelare numerică, schimb radiativ de căldură, convecție, răcire adaptivă.

Двухрежимный фрактальный радиатор с поворотными элементами оребрения на основе модифицированной Y-системы

Любимов П.В., Новотельнова А.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Настоящая работа посвящена разработке и исследованию двухрежимного фрактального радиатора с модифицированной топологией. Ключевая особенность предлагаемого конструктивного решения заключена в реализации возможности изменения пространственной ориентации концевых стенок за счет введения зубчатого зацепления шестерен стенок с колесами дискретного позиционирования зубчиков. Базовая фрактальная структура была получена на основе Y-системы путем замены ее инициатора V-инициатором и введением условия сопряжения параллельных стенок дочерних элементов, что привело к естественной топологической особенности, в которой концевые параллельные стенки последнего уровня рекурсии способны поворачиваться, занимая положение граней правильного многоугольника. Цель работы заключалась в разработке и исследовании двухрежимного фрактального радиатора, способного изменять конфигурацию концевых участков ребер посредством дискретной передачи в положения, обусловленные топологией модифицированной Y-системы. Для достижения поставленной цели были решены задачи, включавшие: проработку параметрической модели построения фрактальной структуры с условиями, приводящими к топологической особенности фрактала, разработку конструктивного решения двухрежимного модуля с вращающимися элементами, проектирование поворотного механизма. В заключительной части проведено численное моделирование стационарного сопряженного теплообмена для двух конфигураций, обусловленных топологией, на основе полно-элементных моделей открытой и закрытой конфигураций. Наиболее важными результатами являются: обоснование конструктивного решения с поворотным механизмом, установление того факта, что в закрытой конфигурации стенки выступают как рефлекторы, увеличивая лучистый теплообмен. Также, установлено, что в закрытой конфигурации модуль может работать в режиме теплового аккумулятора. Значимость полученных результатов состоит в том, что разработан и проанализирован двухрежимный фрактальный модуль радиатора с дискретной передачей, позволяющей менять топологию оребрения. Предложенное решение расширяет возможности проектирования теплообменных систем, предлагая решение пригодное для локальной модернизации участков с переменными режимами работы.

Ключевые слова: фракталы, фрактальный радиатор, двухрежимный модуль, Y-система, вращающиеся стенки, численное моделирование, радиационный теплообмен, конвекция, адаптивное охлаждение.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие требования к энергоэффективности и бережливому производству стимулируют поиск новых подходов к интенсификации теплообмена. Существенным недостатком традиционных пассивных систем охлаждения является статичность их геометрии, не позволяющая адаптироваться к изменяющимся внешним условиям и режимам работы. Перспективным направлением в области оребрения выступает разработка поверхностей с фрактальными свойствами, геометрия которых приближена к природным (бионическим) аналогам. Природные структуры, такие как гидрофильные мхи, архитектура листьев и жилкование, вдохновили разработки паровых камер и люминесцентных концентраторов [1-3]. В оребрении эти технологии также нашли свое применение, на основе фрактальных эскизов строят теплообменные поверхности в том числе радиаторы труб с фрактальными профилями, конструкции, которые монтируются на ее поверхность чтобы отводить или подводить тепло.

Определяющую роль в формировании свойств фрактальной поверхности играют выбор геометрического инициатора и алгоритма (функции) генератора фрактальной формы. Наиболее хорошо изученной и популярной формой образования поверхности теплоотвода является форма Y-системы, подобная древовидному ветвлению [4-7]. Для задания такой структуры, согласно классификации Бенуа Мандельброта, используется инициатор в форме отрезка и генератор рекурсивного деления, который образует древовидный паттерн [8]. Главное преимущество этой формы - высокая способность к равномерному распределению тепла и высокая адаптивность формы под конструкцию теплообменной системы. Применение такой формы как основы для создания теплообменных устройств зарекомендовало себя при работе с материалами с фазовым переходом, в микроэлектронике и во многих других областях [9-11]. Благодаря многочисленным исследованиям этой формы, стало известно о предельных уровнях рекурсии, числе при котором дальнейшая глубина построения не

оправдана малым приращением эффективности или его отсутствием при сопоставлении с наращенной массой [12]. Часть исследований была посвящена определению оптимальных углов бифуркации или углов раствора как одного из наиболее значимых параметров для конструирования системы теплообмена [13-14]. Потенциал применения фрактальных Y -образных структур в теплообменниках показан в [15, 16]. Ввиду такой степени разработанности Y -система стала удобным инструментом для проектирования новых технических решений. Несмотря на это, каждое из этих решений влечет за собой реконструкцию теплообменного устройства, по этой причине форма конструкции в виде насадочного элемента может быть предпочтительным вариантом, когда реконструкция всей системы избыточна или невозможна.

Еще одним решением, позволившим получать эффективные теплообменные поверхности в сравнении с традиционными наложениями, стала известная практика сочетания нескольких топологий профиля оребрения, называемая гибридизация. В отличие от фрактального оребрения, предполагающего использование сложной, как правило самоподобной формы, гибридизация форм задает фиксированную геометрию, основанную на нескольких традиционных формах оребрения. Например, дополнение продольного ребра штырьками или сочетание шестиугольных штырьков с прямыми каналами позволяют улучшить теплопередачу и снизить термическое сопротивление [17, 18]. Гибридные структуры демонстрируют лучшую температурную равномерность и производительность по сравнению с традиционными решениями [19, 20].

Следующим шагом в контексте развития оребрения можно назвать активное управление поверхностью теплообмена. Известны, в частности, радиаторы, в которых для формирования контролируемой конфигурации набора пластинчатых ребер применяется генетический алгоритм, оптимизирующий геометрию под заданные условия течения и температурный режим [21].

Однако возможность создания двухрежимного фрактального радиатора на основе модифицированной Y -системы, способной изменять конфигурацию стенок с применением дискретной зубчатой передачи, до настоящего времени не была предметом

специального исследования. В связи с этим, научная новизна заключена в том, что в настоящей работе впервые предложено и численно обосновано конструктивное решение двухрежимного теплообменного модуля на основе дендритной Y -системы с V -инициатором, позволяющее изменять ориентацию концевых параллельных стенок ветви в топологически обусловленные позиции, что приводит к двум качественно различным режимам теплоотвода.

В контексте настоящей работы термин “двухрежимный модуль” понимается как модуль оребрения, способный принимать два различных топологических состояния фрактальной структуры: открытую и закрытую формы, различающиеся ориентацией периферийных стенок. Каждая из форм достигается активным воздействием привода на соответствующее колесо. Модульное исполнение позволяет использовать элемент локально на трубных участках в качестве насадки с оребрением.

Целью данной работы является разработка и обоснование конструкции двухрежимного модуля оребрения для трубчатых теплообменников на основе модифицированной фрактальной Y -системы с условием сопряжения стенок V -образных дочерних элементов, а также численное исследование теплообмена в открытой и закрытой конфигурациях в условиях стационарного режима.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построение модифицированного фрактального эскиза на основе Y -системы. Генератор рекурсии принят как для дендритной Y -системы, что значит, каждый родитель на текущем уровне порождает только двух потомков. Ориентация ветвей – радиальная, количество ветвей – 6, полное число уровней рекурсии – 2, с учетом нулевого уровня инициатора. Описание Y -инициатора и применяемой модели с V -образным инициатором приведены на рис. 1. Фрактальная поверхность формировалась с использованием рекурсивных вызовов. (A – инициатор дендритной системы с первыми двумя уровнями рекурсии и B – V инициатор первого уровня рекурсии).

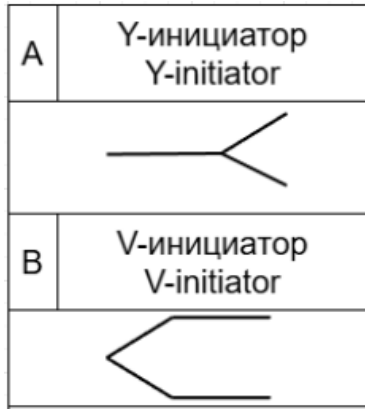


Рис. 1. Схематичное изображение инициаторов фрактальной поверхности: А) Y-инициатор; В) V-инициатор

Fig. 1. Schematic representation of fractal surface initiators: A) Y-initiator; B) V-initiator

Используя, V-инициатор и генератор древовидной Y-системы была получена ветвь рис. 2.

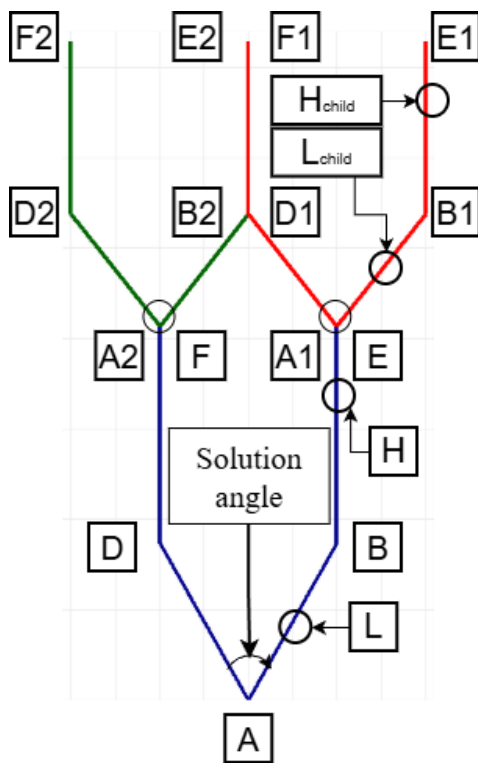


Рис. 2. Изображение одной ветви: AD-левая наклонная инициатора, AB-правая наклонная инициатора, DF-левая параллельная стенка, BE – правая параллельная стенка, A2-B2-D2-F2-E2 – левый дочерний элемент, A1-B1-D1-F1-E1 – правый.

Fig. 2. Image of a single branch: AD - left inclined initiator, AB - right inclined initiator, DF - left parallel wall, BE - right parallel wall, A2-B2-D2-F2-E2 - left child element, A1-B1-D1-F1-E1 - right.

Для параметрического задания были использованы следующие уравнения, определяющие начальную (рис. 2A), узловые (рис. 2D, рис. 2B) и конечные точки (рис. 2F, рис. 2E) V-инициатора (рис. 2):

$$A(0;0) \tag{1}$$

$$B(x) = A + L \cdot \cos\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right) \tag{2}$$

$$B(y) = A + L \cdot \sin\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right) \tag{3}$$

$$D(x) = A + L \cdot \cos\left(\theta + \frac{\alpha}{2}\right) \tag{4}$$

$$D(y) = A + L \cdot \sin\left(\theta + \frac{\alpha}{2}\right) \tag{5}$$

$$E(x) = B(x) + HuE(y) = B(y) \tag{6}$$

$$F(x) = D(x) + HuF(y) = D(y) \tag{7}$$

где L – длина наклонной части ($AD=AB$); H – длина параллельных участков ($DF=BE$); A – начальная точка; θ – угол ориентации направляющей оси для первой ветви; α – угол раствора инициатора.

Кроме того, на процесс итеративной генерации ветви было наложено дополнительное условие сопряжения конечных параллельных стенок

$$\alpha' = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{K}\right) \tag{8}$$

что обеспечило выполнение условия сопряжения стенок (рис. 2):

$$D1F1(y) = B2E2(y) \tag{9}$$

Это условие также привело к топологической особенности, при которой радиальная ориентация шести ветвей с двумя уровнями образует эскиз поверхности с открытой геометрией, а радиус-вектор до середины сопряженных сторон $B2E2$ и $D1F1$ служит радиусом окружности, описывающей стороны правильного многоугольника, который формирует контур для закрытой конфигурации. Для приближения длины стенок $D2F2$, $B2E2$, $B1E1$ к длине стороны многоугольника длина приближается методом

итераций к длине стороны многоугольника с поправкой на обеспечение вращательного движения 0.8 по уравнению:

$$K \cdot H = 2 \cdot R \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{18}\right) \cdot 0.8 \quad (11)$$

Где радиус вычисляется как:

$$R = \sqrt{\left(L \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + H + K L \cos\left(\frac{\alpha'}{2}\right) + \frac{KH}{2}\right)^2 + \left(-L \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + K L \sin\left(\frac{\alpha'}{2}\right)\right)^2} \quad (12)$$

После радиальной ориентации шести таких ветвей (рис. 2) и проведения дополнительных геометрических построений, были получены два эскиза определяющие положения концевых параллельных участков с точкой вращения на пересечении окружности с концевыми участками 1, 2, 3, рис. 3.

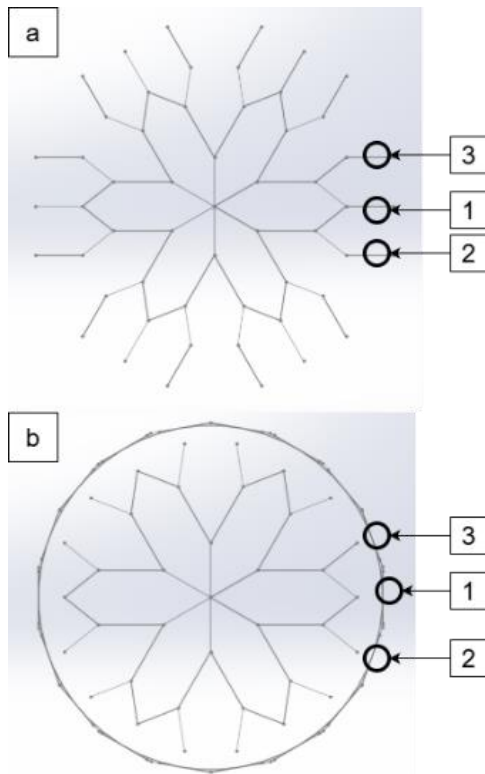


Рис. 3. Открытая и закрытая формы: а) Открытая форма, б) Закрытая форма. 1-средняя стенка, 2-нижняя параллельная стенка, 3-верхняя параллельная стенка.
Fig. 3. Open and closed forms: a) Open form, b) Closed form. 1-middle wall, 2-lower parallel wall, 3-upper parallel wall.

Основные параметры, использованные при построении эскизов (рис. 3) представлены в таблице 1.

Таблица 1
Параметры фрактала
Table 1
Parameters of fractal

Параметр (Parameter)	Значение (Meaning)	Ед. изм. (Unit)
Число уровней (Number of levels)	2	
Число ветвей (Number of branches)	6	
L	10	мм, (mm)
H	12	мм, (mm)
α	60	°
α'	77	°
L_{child}	8	мм, (mm)
H_{child}	8	°
θ	0	°

Дискретное колесо. Для реализации возможности смены режима и перехода стенок от открытой конфигурации (рис. 3а) к закрытой (рис. 3б) была спроектирована зубчатая передача с дискретным зацеплением рис.4.

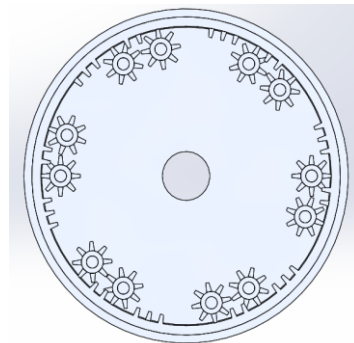


Рис. 4. Дискретное зацепление.
Fig. 4. Solid models.

Колесо содержит шесть секторов (по числу ветвей фрактала), в каждом из которых размещены две группы зубьев (2 и 3 зуба) с пропуском между ними. Угловое положение зубьев описывается сверткой маскирующей функции с гребенкой Дирака:

$$F(\theta) = \sum_{s=0}^5 \sum_{n \in \{-3; -2; 1; 2; 3\}} \delta(\theta - (\varphi_s + n\Delta\theta)) \quad (13)$$

где $\varphi_s = s \cdot 60$; s – номер сектора колеса по количеству ветвей; $n \in \{-3; -2; 1; 2; 3\}$ – относительное смещение внутри сектора; $\Delta\theta$ – шаг дискретизации, выраженный в угловом шаге $\approx 5.07^\circ$.

Для перевода ребер из открытой конфигурации (рис. 3а) в закрытую (рис. 3б) требуется поворот стенок 1, 2 и 3 на углы 90° , 110° и 70° соответственно. Вращение стенок 1 и 2 осуществляется одним общим колесом, профиль зубьев которого в пределах одного сектора состоит из двух групп: три первых зуба последовательно взаимодействуют со стенкой 2, затем со стенкой 1, обеспечивая начальную фазу поворота; последующие два зуба (после пропуска шириной $2\Delta\theta$) завершают доворот стенки 2 до заданного положения.

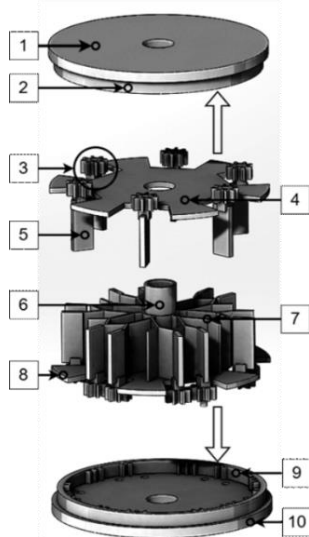


Рис. 5. Описание основных элементов моделей:
 1 – Верхняя «крышка» с желобом для колеса, 2 – Верхнее дискретное колесо, 3 – Шестерня, 4 – Верхняя шайба, 5 – Горизонтальная стенка, связанная с шестерней, 6 – Секция трубы, 7 – Цельная фрактальная часть ребристости, 8 – Нижняя шайба, 9 – Нижнее дискретное колесо, 10 – Дно.

Fig. 5. Description of the main elements of models:
 1 – Upper “lid” with a groove for the wheel, 2 – Upper discrete wheel, 3 – Gear, 4 – Upper washer, 5 – Horizontal wall engaged with the gear, 6 – Section of the pipe, 7 – Solid fractal part of the ribbing, 8 – Lower washer, 9 – Lower discrete wheel, 10 – Bottom.

Стенка 3 приводится в движение аналогичным колесом, расположенным на противоположной стороне фрактальной структуры. Детальное представление элементов сборки со вспомогательными деталями, обеспечивающими полную

функциональность, приведено на рис. 5. *Численное моделирование.* Для численного моделирования в среде *Ansys* в модуле *SteadyState Thermal*, были получены две твердотельные элементно-полные модели рис. 6, построенные в *SolidWorks* с фрактальной частью оребрения на основе полученных эскизов, с высотой фрактальной части (рис.5, элемент-7) 20 mm и толщиной 2 mm.

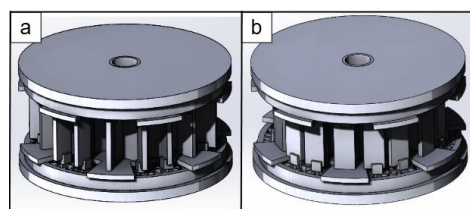


Рис. 6. Твердотельные модели: а) Модуль в режиме открытой конфигурации стенок; б) Модуль в режиме закрытой конфигурации стенок.

Fig. 6. Solid-state models: a) Module in the open wall configuration mode; b) Module in the closed wall configuration mode.

В результате были получены две модели каждая из которых содержит все элементы необходимые для изменения ориентации стенок, все функциональные и сопутствующие элементы (рис. 5), обеспечивающие сборку и возможность интеграции модуля с трубным участком (рис. 5, элемент-6) с внешним диаметром 12 mm и толщиной стенки 2 mm. Таким образом, модели для численного моделирования:

а) – элементно-полный двухрежимный модуль, выполненный в открытой конфигурации стенок;

б) – элементно-полный двухрежимный модуль, выполненный в закрытой конфигурации стенок.

Для анализа влияния топологической особенности и конструктивного решения, приводящих к различным конфигурациям системы, на теплоотвод, было проведено трехмерное численное моделирование с использованием решателя модуля *Steady State Thermal (ANSYS)*. Мощность теплового источника на внутренней поверхности трубного участка (рис.5, элемент - 6) 50 Вт, удельный тепловой поток для приведенного участка трубы 100 kW/m^2 , что соответствовало моделированию условий интенсивного теплоотвода от источника с паровым теплоносителем. Степень черноты стенок монолитной фрактальной части – 0.3,

что соответствует полированному алюминию, для концевых параллельных стенок (рис. 5, элемент - 5) степень черноты поверхности – 0.9. Для открытой конфигурации (рис. 6a) конвективный теплообмен на поверхности элементов моделировался с коэффициентом теплоотдачи $22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, что соответствует естественной конвекции в свободном объеме. Для закрытой конфигурации (рис. 6b) конвективный теплообмен на поверхности элементов моделировался с коэффициентом теплоотдачи $7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, что соответствует естественной конвекции в замкнутом объеме. Температура окружающей среды в нормальных условиях $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

На все модели был назначен материал сплав алюминия AA6061 с коэффициентом теплопроводности $165 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, плотностью $2700 \text{ kg}/\text{m}^3$ и удельной изобарной теплоемкостью $896 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Решаемые уравнения. Уравнение для стационарного температурного поля исследуемого объекта без внутреннего объемного теплового источника имело вид:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (13)$$

где T – температура.

Для теплонагруженной поверхности, внутренней грани трубного участка, граничное условие второго рода:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad (14)$$

где q – удельный тепловой поток на грани; λ – коэффициент теплопроводности.

Для остальных поверхностей были заданы граничные условия третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha [T_{surf} - T_{amb}] \quad (15)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; T_{surf} – температура на поверхности тела; T_{amb} – температура окружающей среды.

Лучистый теплообмен поверхностей граней с неограниченной диатермической средой описывался с использованием закона Стефана – Больцмана:

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma_0 (T_{surf}^4 - T_{amb}^4) \quad (16)$$

где ε – степень черноты поверхности; $\sigma_0 = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Взаимное излучение стенок моделировалось в приближении теплообмена между параллельными поверхностями с приведенной степенью черноты:

$$q_{12} = \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (17)$$

Для оценки вклада параллельных стенок $D2-F2$, $B2-E2$, $D1-F1$, $B1-E1$ (рис. 2) последнего уровня фрактальной части модели в теплообмен рассчитывалась доля тепла, воспринимаемая этими стенками:

$$\eta = \frac{Q_{walls}}{Q_{Total}} 100 \quad (18)$$

где Q_{walls} – тепловой поток на параллельных стенках $D2-F2$, $B2-E2$, $D1-F1$, $B1-E1$ (рис. 2) последнего уровня; Q_{Total} – тепловой поток, подводимый к внутренней поверхности трубного участка.

Для всех моделей рассчитывались термическое сопротивление и размах температуры. Термическое сопротивление рассчитывалось как:

$$R = \frac{T_{avg} - T_{amb}}{Q_{Total}} \quad (19)$$

где Q_{Total} – тепловая мощность горячего поверхностного источника.

Размах температуры, отнесенный к T_{avg} рассчитывался как:

$$K = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \quad (20)$$

Ухудшение термического сопротивления рассчитывалось как:

$$\Delta R = R_b - R_a \quad (21)$$

где R_a и R_b – термические сопротивления моделей a и b (рис. 6), соответственно.

Относительное ухудшение термического сопротивления определялось как:

$$\delta = \frac{R_b - R_a}{R_b} \quad (22)$$

Дополнительно, для учета влияния конфигурации на радиационный теплообмен в моделях исследовались значения падающего излучения, собственного излучения и отраженного излучения со стенок фрактальной части моделей. Результирующий тепловой поток для каждой группы поверхностей:

$$Q_{net} = Q_{emit} - \varepsilon Q_{inc} \quad (23)$$

где Q_{emit} – собственное излучение; Q_{inc} – падающее излучение.

Суммарная мощность теплового излучения, отводимая излучением от модуля:

$$Q_{rad, total} = \sum_i Q_{net, i} \quad (24)$$

Результаты численного моделирования рис. 7.

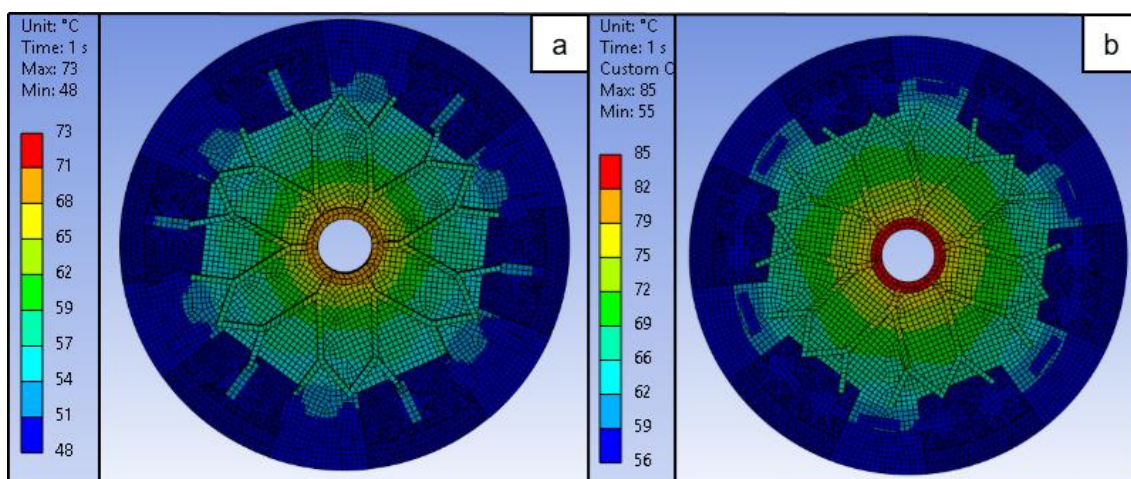


Рис. 7. Температурное поле в поперечном сечении фрактальной части теплообменной модулей: а) – элементарно-полный двухрежимный модуль, выполненный в открытой конфигурации стенок; б) – элементарно-полный двухрежимный модуль, выполненный в закрытой конфигурации стенок.

Fig. 7. Temperature field in the cross-section of the fractal part of the heat exchange modules: a) – elementally complete two-mode module, made in an open wall configuration; b) – elementally complete two-mode module, made in a closed wall configuration.

По результатам численного моделирования трехмерных элементарно-полных моделей в закрытой и открытой конфигурации стенок, обусловленной топологией модифицированной дендритной фрактальной поверхности следует, что закрытая конфигурация стенок позволяет работать модулю в режиме теплового аккумулятора (рис. 7b). Сравнение температурных полей показывает, что температура этой конфигурации в среднем выше на 10 °C, чем в открытой. Замкнутая конфигурация ограничивает возможности к конвективному отводу тепла. Как в открытой, так и в закрытой конфигурации стенок концевые участки с дискретным зацеплением продолжают участвовать в теплосъеме, однако, их температура в среднем на 5-6 °C (рис. 7a, b) ниже, чем у монолитной фрактальной части оребрения. Отнесенный к средней температуре поверхности размах температур от открытой конфигурации к закрытой

увеличивался, что также свидетельствует о процессе аккумуляции тепла. Максимальная температура наблюдалась в центре модели, на самом участке трубы с источником, в то время как минимальная температура в обоих случаях наблюдалась на периферии, в местах контакта дискретного колеса и шестерни (рис. 5, элементы – 3, 2). Относительное ухудшение термического сопротивления модели *a* по сравнению с моделью *b* составило 16 %

Как результат, основной теплосъем осуществляется монолитной фрактальной частью, о чем свидетельствуют температурные поля (рис. 7a, b). Концевые параллельные участки, за счет дискретной передачи, ориентируются колесами и позволяют достигать два различных качественных состояния: режим свободного конвективного отвода тепла и режим аккумуляции тепла. Результаты численного моделирования радиационного теплообмена с

разделением поверхностей на монолитную фрактальную часть с $\varepsilon=0.3$ и концевые

параллельные стенки вращения с $\varepsilon=0.9$ сведены и представлены в таблице 2.

Таблица 2
Численные результаты
Table 2
Numerical results

Параметр (Parameter)	Открытая (a), (Open (a))	Закрытая (b), (Closed (b))
T_{max} , °C	73	85
T_{min} , °C	48	55
T_{avg} , °C	54	60
R, К/Вт, (K/W)	1	1.2
K_{th}	0.47	0.48
η , %	7.4	5.38
Поверхности с $\varepsilon=0.3$ (Surfaces with $\varepsilon=0.3$)		
Q_{inc} , Вт, (W)	7.64	8.54
Q_{emit} , Вт, (W)	2.93	3.38
Q_{ref} , Вт, (W)	5.34	5.97
Q_{net} , Вт, (W)	0.62	0.81
Поверхности с $\varepsilon=0.9$ (Surfaces with $\varepsilon=0.9$)		
Q_{inc} , Вт, (W)	3.27	3.75
Q_{emit} , Вт, (W)	3.57	4.36
Q_{ref} , Вт, (W)	0.32	0.37
Q_{net} , Вт, (W)	0.66	0.98
$Q_{rad,total}$, Вт, (W)	1.28	1.79

Как следует из результатов численного моделирования представленных в таблице 2, переход к закрытой геометрии увеличил отвод тепла излучением на 28% (с 1.28 до 1.79 W). В результате, падающее излучение на стенки с $\varepsilon=0.9$ возрастает на 15% с 3.27 W до 3.75 W, а их собственное излучение увеличивается с 3.57 W до 4.36 W. Обнаруженная топологическая особенность фрактальной структуры, при которой поворот концевых стенок исходного фрактала (рис. 3a) приводит к формированию замкнутого многоугольного контура (рис. 3b) и, реализованная как двухрежимный теплообменный модуль с возможностью активного регулирования ориентации концевых параллельных участков благодаря конструктивному решению в форме дискретной передачи, качественно изменяет механизм теплообмена при реализации переключения между формами (рис. 6a, b). В закрытой конфигурации стенки начинают играть роль взаимных рефлекторов, повторно отражая падающее излучение внутри замкнутой полости модели с закрытой конфигурацией стенок, эти результаты

согласуются с фундаментальными исследованиями в которых было показано, что взаимное облучение соседних рёбер может влиять на суммарную теплопередачу и должно учитываться при проектировании [22-24]. Более того, в работах, посвященных фрактальному оребрению, установлено, что морфология структуры напрямую определяет её радиационные свойства [25], что отражается в результатах настоящего исследования, где переход к различной ориентации концевых участков переопределил долю лучистой составляющей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы выполнена разработка и численное исследование двухрежимного теплообменного модуля с оребрением, основанным на Y-системе с V-инициатором и условием сопряжения стенок дочерних элементов, и реализованным механизмом регулирования ориентации периферийных стенок. Показано, что введение V инициатор и условия сопряжения стенок образует топологическую особенность, при которой возможно формирование

концевыми параллельными стенками формы правильного многоугольника. Ввиду этой топологической особенности реализовано конструктивное решение, при котором, посредством вращения стенок приводом дискретного колеса реализуется переключение между режимами открытой и закрытой конфигурации стенок. Аналитическое описание позиционирования зубьев выполнено с использованием свертки маскирующей функции с гребенкой Дирака, что может позволить масштабировать решение на произвольное число секторов и уровней рекурсии. Проведенное численное моделирование на основании обнаруженной топологической особенности и принятых конструктивных решений для двух конфигураций с учетом конвективного и радиационного теплообмена позволило установить: закрытая конфигурация работает в режиме теплового аккумулятора с ограниченной конвекцией и усиленным внутренним радиационным переносом, напротив, открытая конфигурация в режиме свободной конвекции с более равномерным температурным полем.

Литература (References)

- [1] Zhang H. et al. Moss-inspired wick structures for vapor chambers // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 226. Art. 125483. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125483.
- [2] Tanaka K. et al. Leaf-inspired luminescent solar concentrators // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2025. Vol. 253. Art. 112267. DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112267.
- [3] Zhao R. et al. Fractal vein networks for enhanced capillary pressure // *Applied Thermal Engineering*. 2025. Vol. 236. Art. 121550. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121550.
- [4] Li J., Xi L., Li Y., Liu M., Sun X., Sun X., Zhang Q. Numerical study on the energy storage/release performance of vertically oriented latent heat storage unit enhanced by improved tree-shaped fins // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025. Vol. 165 (Part A). 109006. DOI: 10.1016/j.ichahamass transfer.2025.109006.
- [5] Huang Y., Liu X. Charging and discharging enhancement of a vertical latent heat storage unit by fractal tree-shaped fins // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 174. P. 199–217. DOI: 10.1016/j.renene.2021.04.066.
- [6] B.V.K. Reddy, P.V. Ramana, Arunn Narasimhan, Steady and transient thermo-hydraulic performance of disc with tree-shaped micro-channel networks with and without radial inclination, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 47, Issue 11, 2008, Pages 1482-1489, ISSN 1290-0729, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.11.003> (accessed 08.12.2025)
- [7] Natalia Rażny, Anna Dmitruk, Maria Serdechnova, Carsten Blawert, Joanna Ludwiczak, Krzysztof Naplocha, The performance of thermally conductive tree-like cast aluminum structures in PCM-based storage units, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 142, 2023, 106606, ISSN 0735-1933, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106606>. (accessed 08.12.2025)
- [8] Mandelbrot B. B. *The Fractal Geometry of Nature* / B. B. Mandelbrot. — San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1982. — 468 p. — ISBN 0-7167-1186-9.
- [9] Yongping Huang, Xiangdong Liu, Charging and discharging enhancement of a vertical latent heat storage unit by fractal tree-shaped fins, *Renewable Energy*, Volume 174, 2021, Pages 199-217, ISSN 0960-1481, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.066>. (accessed 08.12.2025)
- [10] Yiwei Fan, Zhaohui Wang, Ting Fu, Huawei Wu, Numerical investigation on lithium-ion battery thermal management utilizing a novel tree-like channel liquid cooling plate exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 183, Part B, 2022, 122143, ISSN 0017-9310, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122143>. (accessed 21.01.2026)
- [11] Yunfei Yan, Hongyu Yan, Siyou Yin, Li Zhang, Lixian Li, Single/multi-objective optimizations on hydraulic and thermal management in micro-channel heat sink with bionic Y-shaped fractal network by genetic algorithm coupled with numerical simulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 129, 2019, Pages 468-479, ISSN 0017-9310, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.120>. (accessed 24.01.2026)
- [12] Zhihao Lu, Kai Zhang, Jinxiang Liu, Fei Li, Effect of branching level on the performance of constructal theory-based Y-shaped liquid cooling heat sink, *Applied Thermal Engineering*, Volume 168, 2020, 114824, ISSN 1359-4311, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114824>. (accessed 10.02.2026)
- [13] Calamas, D., Baker, J., & Kemerly, D. A fractal blade for cooling liquids: Experiments and simulations // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2023. – Vol. 184. – P. 107951. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107951.
- [14] Lorenzini, G., & Rocha, L. A. O. Constructal design of Y-shaped assembly of fins // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. –

2006. – Vol. 49, No. 23-24. – P. 4552-4557. DOI: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2006.05.019.
- [15] K. Siju, M. Faheem T, A. Unnikrishnan, K. Shaji, P.K. Jithesh, Toward energy-efficient solar-thermal systems: Experimental investigations on a novel fractal tree-like heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, Volume 279, Part C, 2025, 127666, ISSN 1359-4311, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127666>. (accessed 16.02.2026).
- [16] Liang Yin, Jiaqiang E., Yi Tu, Weihua Luo Biomimetic microchannel structures and their topological optimization: A review, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 163, 2025, 108689, ISSN 0735-1933, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108689>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193325001149> (accessed 16.02.2026)
- [17] Hisham H. Jasim, Thermal performance improvement based on the hybrid design of a heat sink, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 23, Issue 5, 2020, Pages 1144-1152, ISSN 2215-0986, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.10.007>. (accessed 10.02.2026)
- [18] Abdulateef A.M., Hasan A.A. A novel center-hybrid pin-fin microchannel heat sink with embedded secondary microchannels for hotspot thermal management // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2024. – Vol. 206. – Art. 109329. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109329
- [19] Wasim Raza, Danish Ansari, Ji Hwan Jeong, Abdus Samad, Christophe Duwig, A novel microchannel-twisted pinfin hybrid heat sink for hotspot mitigation, *Applied Thermal Engineering*, Volume 241, 2024, 122454, ISSN 1359-4311, Available at:
- <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122454>. (accessed 15.02.2026)
- [20] Kevin P. Drummond, Doosan Back, Michael D. Sinanis, David B. Janes, Dimitrios Peroulis, Justin A. Weibel, Suresh V. Garimella, Characterization of hierarchical manifold microchannel sink arrays under simultaneous background and hotspot heating conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 126, Part A, 2018, Pages 1289-1301, ISSN 0017-9310, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.127> (accessed 15.02.2026).
- [21] Qian Hu, Wenjiong Chen, Zhichao Men, Shutian Liu, Performance evaluation and experimental verification of optimizing fin angles in adjustable-configuration heat sinks, *Applied Thermal Engineering*, Volume 258, Part B, 2025, 124635, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124635> (accessed 15.02.2026).
- [22] Sparrow E. M. Radiant Interaction Between Fin and Base Surfaces / E. M. Sparrow, E. R. G. Eckert // *Journal of Heat Transfer*. — 1962. — Vol. 84, № 1. — P. 12–18. — DOI: 10.1115/1.3685193.
- [23] Sparrow E. M. The Effectiveness of Radiating Fins With Mutual Irradiation / E. M. Sparrow, E. R. G. Eckert, T. F. Irvine // *Journal of the Aerospace Sciences*. — 1961. — Vol. 28, № 10. — P. 763–772. — DOI: 10.2514/8.9172.
- [24] Sparrow E. M., Miller G. B., Jonsson V. K. Radiating effectiveness of annular-finned space radiators, including mutual irradiation between radiator elements // *Journal of the Aerospace Sciences*. — 1962. — T. 29. — №. 11. — C. 1291-1299.
- [25] Nikbakht M. Radiative Heat Transfer in Fractal Structures / M. Nikbakht // *Physical Review B*. — 2017. — Vol. 96, № 12. — P. 125436. — DOI: 10.1103/PhysRevB.96.125436.

Сведения об авторах.



Любимов Павел Викторович
 Университет ИТМО, аспирант ОЦ Энергоэффективные инженерные системы, Область научных интересов: теплофизика
 E-mail: pavel.lyub@yandex.ru
 ORCID: 0009-0004-9642-4314



Новотельнова Анна Владимировна
 Университет ИТМО, к.т.н., Энергоэффективные инженерные системы, Область научных интересов: теплофизика, электрофизика, материаловедение.
 E-mail: novotelnova@itmo.ru
 ORCID: 0000-0003-0073-2415