

Д. Д. Попов, А. А. Свечников

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТИПОВ ОРЕБРЕНИЯ ДЛЯ РАДИАТОРОВ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ МАНЕВРОВЫХ ТЕПЛОВОЗОВ

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ современных типов оребрения (жалюзийное, волнистое, перфорированное, ячеистые структуры) для применения в радиаторах систем охлаждения маневровых тепловозов. На основе систематизации данных научных публикаций оценены преимущества и недостатки каждого типа по ключевым критериям: коэффициент теплоотдачи, аэродинамическое сопротивление, стойкость к засорению, технологичность изготовления. Разработаны рекомендации по выбору типа оребрения для различных условий эксплуатации.

Ключевые слова: оребрение радиаторов, теплоотдача, аэродинамическое сопротивление, система охлаждения, маневровый тепловоз, аддитивные технологии.

Для цитирования: Попов, Д. Д. Сравнительный анализ эффективности перспективных типов оребрения для радиаторов систем охлаждения маневровых тепловозов/ Д. Д. Попов, А. А. Свечников // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 137–143. – DOI 10.46973/1818-5509_2026_1_137.

Обеспечение стабильных тепловых режимов в системах охлаждения маневровых тепловозов является критически важной задачей в условиях растущих требований к надежности, экономичности и экологичности железнодорожного транспорта. Радиатор, как ключевой элемент этой системы, во многом определяет ее общую эффективность, которая напрямую связана с конструкцией теплообменной поверхности.

Потенциал традиционных решений на основе гладких труб и простых типов оребрения во многом исчерпан. В современных условиях для достижения прорыва в эффективности необходим осознанный выбор среди перспективных высокоэффективных типов оребрения, которые зачастую сложнее и дороже в производстве, но предлагают значительное улучшение тепловых характеристик. К таким инновационным конструкциям относятся, в частности, трубы со спиральным (хеликоидальным) оребрением, изготавливаемые методами накатки, навивки или высокочастотной сварки, а также продольное оребрение, создаваемое путем экструзии или сварки. Эти технологии позволяют многократно – в 10-12 раз и более увеличить площадь теплообмена по сравнению с гладкой трубой того же диаметра, что ведет к созданию более компактных и легких теплообменных аппаратов без потери мощности [1].

Целью данной статьи является проведение сравнительного анализа перспективных типов оребрения и разработка на его основе инженерных рекомендаций для их применения в радиаторах систем охлаждения маневровых тепловозов. Анализ будет охватывать не только теплотехническую эффективность (коэффициент теплоотдачи) и гидравлическое сопротивление, но и такие важные для эксплуатации критерии, как стойкость к засорению и технологичность изготовления, включая потенциал использования аддитивных технологий.

Для обеспечения репрезентативности выборки были изучены работы, посвященные как численному моделированию (CFD-анализу), так и экспериментальным исследованиям теплообмена и гидродинамики в каналах сложной формы.

Для объективного сравнения перспективных типов оребрения были выбраны следующие критерии, общепринятые в научной практике для оценки теплообменных поверхностей:

1. Теплотехническая эффективность – данный критерий оценивает способность поверхности эффективно передавать тепловую энергию потоку охладителя. В качестве ключевых количественных показателей используются:

- коэффициент теплоотдачи (α , Вт/м²·К): прямой показатель интенсивности теплообмена. Более высокие значения свидетельствуют о лучшей теплопередаче;
- критерий Колберна (j-factor): безразмерный параметр, характеризующий эффективность конвективного теплообмена и определяемый как $j = St \cdot Pr^{2/3}$, где St – число Стэнтона, Pr – число Прандтля. Этот критерий позволяет сравнивать различные поверхности независимо от конкретных условий течения, что делает его универсальным инструментом для анализа.

2. Гидравлическое сопротивление – параметр определяет энергетические затраты на прокачку теплоносителя через систему охлаждения. Оценка проводится по:

- коэффициент лобового сопротивления (f): безразмерный параметр, характеризующий гидравлические потери на трение и местные сопротивления;
- перепад давления (ΔP , Па): прямая количественная мера потерь давления на участке теплообменной поверхности.

3. Комплексный критерий эффективности.

Для выбора оптимальной конструкции недостаточно рассматривать теплоотдачу и сопротивление по отдельности. Наиболее объективную оценку дает критерий (j/f), представляющий собой отношение теплотехнической эффективности (j-factor) к гидравлическим потерям (f-factor). Поверхность с высоким значением j/f обеспечивает лучшую теплоотдачу при меньших затратах энергии на преодоление сопротивления, что является ключевым для энергоэффективных систем.

4. Стойкость к засорению.

Для маневровых тепловозов, работающих в условиях повышенной запыленности, этот критерий имеет критическое значение, так как загрязнение поверхности радиатора резко снижает его эффективность. Ввиду сложности количественной оценки применяется качественная оценка, основанная на анализе конструктивных особенностей. Оцениваются:

- способность накапливать загрязнения, т.е. наличие зон застоя, щелей и карманов, где может скапливаться пыль и грязь;
- способность к самоочищению: насколько аэродинамика поверхности способствует сдуванию и выносу частиц загрязнений потоком воздуха.

5. Технологичность.

Оценивается возможность и эффективность изготовления с использованием массовых промышленных технологий, такими как литье под давлением, пайка/сварка, накатка/навивка, штамповка, а также пригодность для аддитивного производства. Оценивается потенциал использования технологий 3D-печати: свобода геометрии, интеграция функций (возможность печати монолитных конструкций), экономическая целесообразность.

Проведем детальный анализ перспективных типов оребрения, рассматривая их физические принципы действия и систематизируя количественные данные.

Жалюзийное оребрение (рис. 1). Конструкция представляет собой плоскую пластину с рядом узких щелей (жалюзи), отгибаемых под определенным углом (обычно 20-30°) к набегающему потоку. Физический принцип действия заключается не только в турбулизации, но и в периодическом разрушении пограничного слоя. Каждая жалюзи действует как новый стартовый участок для роста теплового пограничного слоя, что поддерживает высокий градиент температуры у поверхности. Кроме того, поток в значительной степени «переориентируется» вдоль жалюзи, что увеличивает фактическую длину пути и эффективную поверхность теплообмена

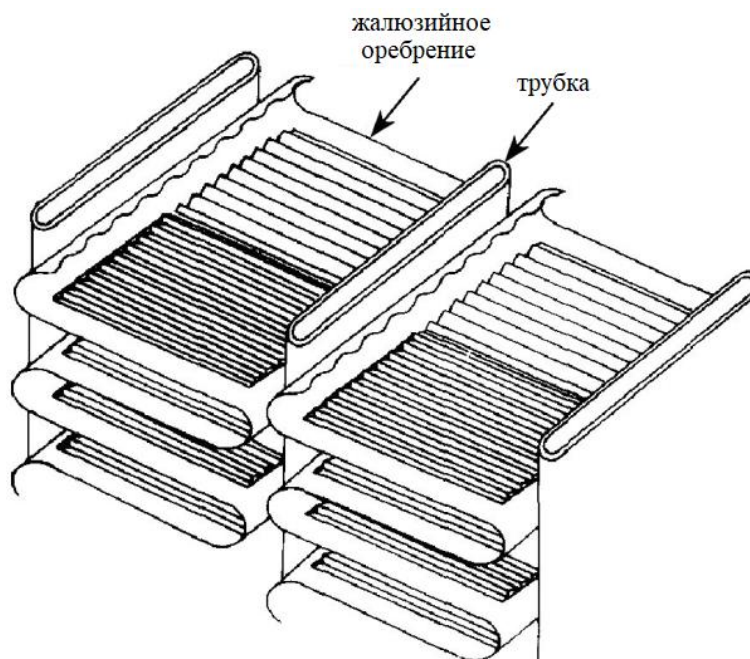


Рис. 1. Жалюзийное оребрение

Жалюзийное оребрение демонстрирует увеличение коэффициента теплоотдачи (j -factor) на 35-60 % по сравнению с гладким оребрением при той же площади [2].

Однако за счет интенсивного вихреобразования и многократных отрывов потока рост коэффициента гидравлического сопротивления (f -factor) составляет 80-120 %.

Эффективность по комплексному критерию (j/f) может превышать показатели гладких пластин на 10-15 %, но сильно зависит от геометрии жалюзи и скорости потока.

Преимущество жалюзийного оребрения является максимальная интенсивность теплообмена среди традиционных типов оребрения.

Недостатки: высокое аэродинамическое сопротивление; выраженная склонность к забиванию пылью и насекомыми из-за малых размеров щелей, что требует частой очистки в эксплуатации.

Волнистое и серповидное оребрение (рис. 2). Пластина оребрения имеет плавные периодические изгибы в одном (волнистое) или двух встречных направлениях (серповидное). Основной механизм интенсификации охлаждения – вынужденная поперечная пульсация потока. При обтекании изогнутой поверхности в пристенных областях возникают поперечные течения и вихри Дина-Гортлера, которые эффективно «взбалтывают» пограничный слой, подводя к поверхности более холодные массы воздуха. Серповидная конфигурация создает более сложную трехмерную турбулентность, обеспечивая лучший теплообмен.

Волнистое оребрение повышает теплоотдачу на 25-45 % относительно гладкого.

Увеличение гидравлического сопротивления находится в диапазоне 40-70 % [3].

Комплексный критерий (j/f) часто на 5-20 % выше, чем у жалюзийного в реальном диапазоне скоростей, что свидетельствует о более выгодном компромиссе.

Плюсы: оптимальное соотношение эффективность/сопротивление; менее склонно к засорению благодаря более плавной геометрии и отсутствию узких щелей.

Минусы: теплотехническая эффективность в абсолютном выражении уступает правильно спроектированному жалюзийному оребрению.

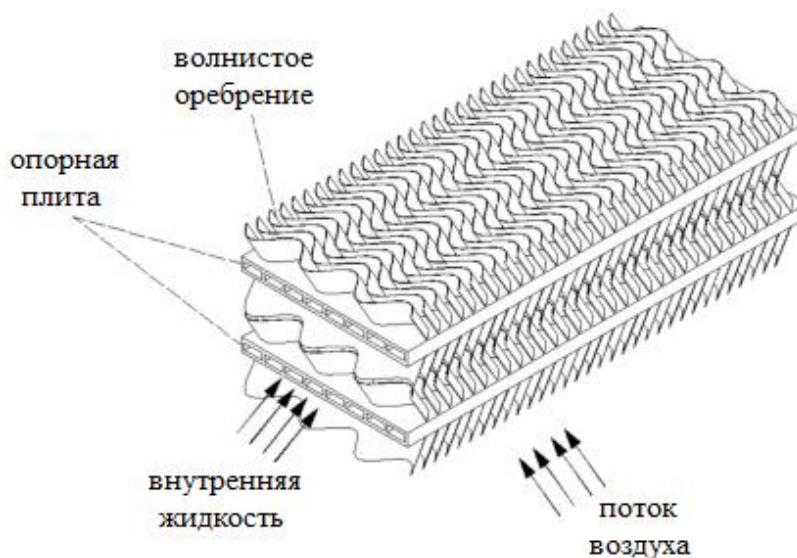


Рис. 2. Волнистое и серповидное ребрение

Перфорированное ребрение (рис. 3). Данный тип представляет собой пластину с регулярно расположенными сквозными отверстиями. Физический принцип действия основан на перемешивании потока за счет струйной эжекции и отрывных течений. На кромках каждого отверстия пограничный слой срывается, а струи из вышерасположенных отверстий «пронзают» и разрушают слой на нижележащих участках. Это приводит к постоянному обновлению пристенной области.

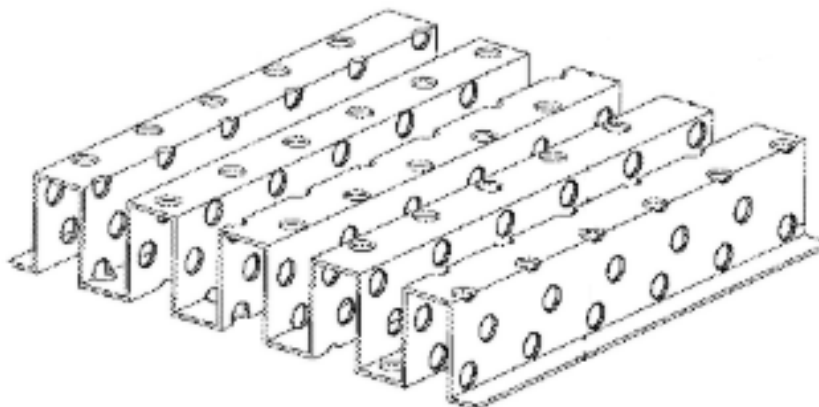


Рис. 3. Перфорированное ребрение

Перфорация диаметром 2-3 мм с относительной площадью перфорации 15-25 % обеспечивает прирост теплоотдачи на 15-30 % [4].

Рост сопротивления при этом составляет 25-50 %, что связано с дополнительными потерями на вход и выход из отверстий.

Эффективность перфорированных поверхностей сильно зависит от шага и диаметра отверстий.

Преимущества: умеренная склонность к засорению (часть мелких частиц проходит насквозь, не задерживаясь на поверхности); относительно простая технология изготовления (штамповка).

Недостатки: снижение механической прочности и жесткости пластины; риск возникновения местных концентраторов напряжений; эффективность ниже, чем у волнистых и жалюзийных типов.

Ячеистые и пористые структуры (рис. 4). Это объемные, трехмерно-периодические решетчатые (гироиды, кельвиновы ячейки) или случайные структуры. Они представляют

собой не поверхность, а объемный теплообменник. Принцип действия кардинально отличается: поток вынужден многократно и хаотично менять направление, омывая развитую поверхность со всех сторон. Теплоотдача происходит в условиях интенсивной трехмерной турбулентности и развитого ламинарно-турбулентного перехода, что обеспечивает экстремально высокие коэффициенты конвекции.

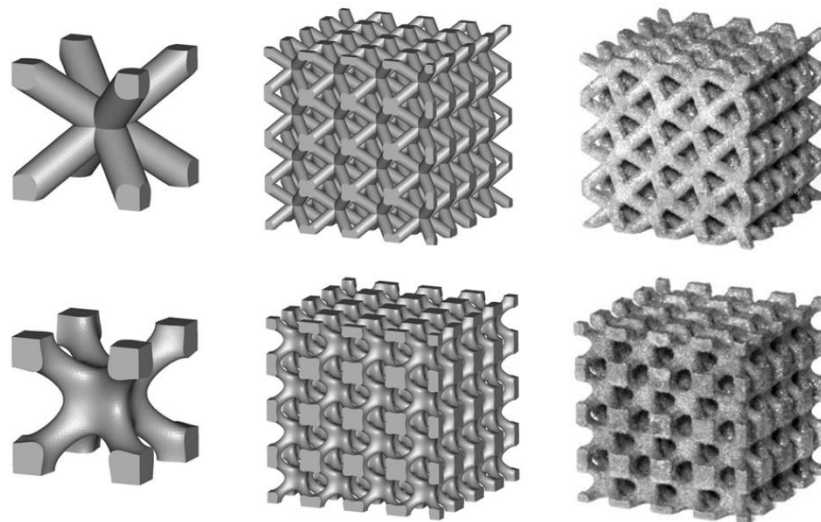


Рис. 4. Ячеистые и пористые ребрения

Радиаторы с данным типом ребрения могут быть изготовлены методом селективного лазерного сплавления (SLM-печать). Данная конструкция радиатора может повышать теплосъем в 2-4 раза на единицу объема по сравнению с радиаторами традиционной конструкции. [5].

Минусом такой конструкции является повышенное гидравлическое сопротивление, которое может на 1-2 порядка превышать сопротивление гладкотрубной конструкции.

Комплексная эффективность (j/f) может быть колебаться в зависимости от пористости и размера ячейки, но основное преимущество – в сверхвысокой удельной поверхностной плотности.

Плюсы: предельно высокая эффективность теплосъема на единицу объема; малый вес; потенциал для интегрального охлаждения.

Минусы: высокая стоимость производства исключительно аддитивными методами; высокий риск необратимого засорения в условиях запыленности; сложность очистки.

Проведенный сравнительный анализ позволяет оценить применимость перспективных типов ребрения для модернизации или разработки новых радиаторов маневрового тепловоза ТЭМ18ДМ. Выбор оптимального типа должен определяться не столько максимальной теплоотдачей, сколько поиском наилучшего компромисса между эффективностью, эксплуатационной надежностью и экономической целесообразностью в конкретных условиях работы.

На основании анализа технической документации и конструкции, радиатор тепловоза ТЭМ18ДМ относится к пластинчато-трубному типу с плоскоовальными трубками и с простым слабопрофилированным пластинчатым ребрением.

Для массового производства новых партий радиаторов для тепловозов ТЭМ18ДМ наиболее обоснованным и надежным выбором является волнистое (серповидное) ребрение. Оно обеспечивает значительный прирост теплотехнических характеристик по сравнению с традиционными гладкими пластинами, сохраняя при этом высокую эксплуатационную надежность и ремонтпригодность в сложных условиях маневровой работы.

Ячеистые и пористые структуры в настоящее время не могут быть рекомендованы для серийного применения на тепловозе ТЭМ18ДМ в связи с высокой стоимостью, нерешенной

проблемой необратимого засорения и необходимостью применения аддитивных технологий. Это решение для спецзадач, где компактность и малый вес радиатора являются приоритетами, а стоимость и эксплуатационные расходы – факторами второго порядка.

Таким образом, для условий работы маневровых тепловозов, рекомендуется применение волнистого (серповидного) оребрения, как решения, обеспечивающего наилучший баланс между теплотехнической эффективностью, умеренным гидравлическим сопротивлением и эксплуатационной стойкостью к засорению.

Для депо с налаженной системой технического обслуживания, включающей регулярную очистку радиаторных секций, и при наличии требований к максимальной тепловой производительности, допустимо рассмотреть применение жалюзийного оребрения при условии осознанного принятия повышенных энергозатрат на прокачку воздуха и риска более частого загрязнения.

Список литературы

1. **Афанасьева, И. В.** Существующие технологии оребрения труб / И. В. Афанасьева // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1(52). – С. 194. – EDN WRTCOI.
2. **Шаповалов, А. В.** Способы интенсификации теплообмена в теплопередающих устройствах / А. В. Шаповалов, Н. М. Кидун, Т. Н. Никулина // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2021. – № 4. – С. 67–76.
3. **Осминкина, А. С.** Сравнительный анализ теплогидравлических характеристик оребренных поверхностей разных форм / А. С. Осминкина, Е. Ю. Павлюк, А. В. Савкин // Энергоресурсоэффективные и инновационные технологии в промышленности. – 2019. – С. 297–299.
4. **Рекин, А. Д.** Экспериментальное и расчетное исследование теплового и напряженного состояния перфорированной стенки жаровой трубы с различным наклоном отверстий и шагом между ними / А. Д. Рекин, В. В. Жестовский, В. П. Лукаш, С. А. Стряпунин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2002. – № 2 (2). – С. 81–87.
5. Zhao, M., Liu, F., Fu, G., Zhang, D.Z., Zhang, T., & Zhou, H. Improved Mechanical Properties and Energy Absorption of BCC Lattice Structures with Triply Periodic Minimal Surfaces Fabricated by SLM // Materials. – 2018. – Vol. 11, No. 12. – Art. 2411. – DOI: 10.3390/ma11122411.

References

1. **Afanasyeva, I. V.** Existing technologies for pipe finning / I. V. Afanasyeva // Inzhenernyy vestnik Dona. – 2019. – No. 1(52). – P. 194. – EDN WRTCOI.
2. **Shapovalov, A. V.** Methods for intensifying heat transfer in heat-transfer devices / A. V. Shapovalov, N. M. Kidun, T. N. Nikulina // Bulletin of the P. O. Sukhoi Gomel State Technical University. – 2021. – No. 4. – P. 67–76.
3. **Osminkina, A. S.** Comparative analysis of the thermal-hydraulic characteristics of finned surfaces of various shapes / A. S. Osminkina, E. Yu. Pavlyuk, A. V. Savkin // Energy- and Resource-Efficient and Innovative Technologies in Industry. – 2019. – P. 297–299.
4. **Rekin, A. D.** Experimental and computational study of the thermal and stress state of a perforated flame tube wall with varying hole inclination and spacing / A. D. Rekin, V. V. Zhestovsky, V. P. Lukash, S. A. Stryapunin // Vestnik of Samara State Aerospace University. – 2002. – No. 2 (2). – P. 81–87.
5. Zhao, M., Liu, F., Fu, G., Zhang, D.Z., Zhang, T., & Zhou, H. Improved Mechanical Properties and Energy Absorption of BCC Lattice Structures with Triply Periodic Minimal Surfaces Fabricated by SLM // Materials. – 2018. – Vol. 11, No. 12. – Art. 2411. – DOI: 10.3390/ma11122411.

D. D. Popov, A. A. Svechnikov

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF PROMISING FIN TYPES FOR RADIATORS OF SHUNTING DIESEL LOCOMOTIVE COOLING SYSTEMS

Abstract. The article presents a comparative analysis of modern fin types (louvered, wavy, perforated, cellular structures) for application in radiators of shunting diesel locomotive cooling systems. Based on the systematization of data from scientific publications, the advantages and disadvantages of each type are evaluated against key criteria: heat transfer coefficient, aerodynamic resistance, fouling resistance, and manufacturability. Recommendations for selecting the fin type for various operating conditions are developed.

Keywords: radiator fins, heat transfer, aerodynamic resistance, cooling system, shunting diesel locomotive, additive technologies.

For citation: Popov, D. D. Comparative Analysis of the Efficiency of Promising Fin Types for Radiators of Shunting Diesel Locomotive Cooling Systems / D. D. Popov, A. A. Svechnikov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2026. – № 1. – P. 137–143. – DOI 10.46973/1818-5509_2026_1_137.

Сведения об авторах

Попов Данила Дмитриевич

Приволжский государственный университет
путей сообщения,
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
аспирант,
e-mail: p.daniel.d@yandex.ru

Свечников Александр Александрович

Приволжский государственный университет
путей сообщения,
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
к.т.н., доцент, доцент,
e-mail: aa.svechnikov@samgups.ru

Information about the authors

Popov Danila Dmitrievich

Volga State Transport University,
Chair «Traction Rolling Stock»,
Postgraduate Student,
e-mail: p.daniel.d@yandex.ru

Svechnikov Aleksandr Aleksandrovich

Volga State Transport University,
Chair «Traction Rolling Stock»,
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Associate Professor,
e-mail: aa.svechnikov@samgups.ru