

ОЦЕНКА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ РИБЛЕТ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ

С. А. Зайдес, Чан Туан Зунг✉

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

✉ trantuandung98@gmail.com

Целью данной работы является исследование возможности интенсификации теплообмена и снижения гидравлических потерь в трубопроводных системах за счет использования структурированных поверхностей.

В статье выполнена оценка теплогидравлической эффективности прямоугольных риблет высотой $h = 1$ мм и отношениям высоты к ширине $h/t = 1,1$ по сравнению с гладкой поверхностью и поверхностями с эквивалентными песочными шероховатостями (высотой 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 мм), в условиях полностью развитого турбулентного течения при числе Рейнольдса $Re = 20\ 000$. Исследование проведено на основе результатов CFD-моделирования в Ansys Fluent 19.1 R1 с использованием периодических граничных условий.

Результаты показывают, что, в отличие от других видов поверхностей, исследуемая поверхность с прямоугольными риблетами демонстрирует высокую теплогидравлическую эффективность среди всех рассмотренных форм поверхности труб (на 86 % выше по сравнению с гладкой поверхностью). Полученные данные указывают на высокий потенциал широкого применения риблет в теплогидравлических системах.

Ключевые слова: риблеты, шероховатая поверхность, число Рейнольдса, теплогидравлическая эффективность, гидравлическое сопротивление, периодические граничные условия

Для цитирования: Зайдес С. А., Чан Туан Зунг. Оценка теплогидравлической эффективности прямоугольных риблет на внутренней поверхности трубы. *Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение»*. 2026. Т. 10, № 1. С. 13–21. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-1-13-21>. EDN: OZHBQW.



© Зайдес С. А., Чан Туан Зунг, 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

NUMERICAL EVALUATION OF THE THERMAL-HYDRAULIC PERFORMANCE OF RECTANGULAR RIBLETS IN A TUBE

S. A. Zaides, Tran Tuan Dung✉

Irkutsk National Research Technical University, Lermontov St., 83, Irkutsk, 664074, Russia

✉ trantuandung98@gmail.com

The aim of the research is to explore the potential for enhancing heat transfer and reducing hydraulic losses in piping systems by employing structured surfaces.

An evaluation of the thermal-hydraulic performance of rectangular riblets with a height of $h = 1$ mm and a height-to-width ratio of $h/t = 1.1$ is performed in comparison with a smooth surface and surfaces with equivalent sand-grain roughness (heights of 0.2; 0.3; 0.4; and 0.5 mm) under fully developed turbulent flow conditions at a Reynolds number of $Re = 20\ 000$. The authors conduct the research basing on CFD simulation results by the Ansys Fluent 19.1 R1 with periodic boundary conditions.

The results show that, unlike other surface types, the investigated surface with rectangular riblets demonstrates high thermal-hydraulic efficiency among all considered pipe surface forms (86 % higher compared to the smooth surface). Therefore, the research clearly demonstrates the high potential for the widespread application of riblets in thermal-hydraulic systems.

Keywords: riblets, rough surface, Reynolds number, thermal-hydraulic performance, hydraulic resistance, periodic boundary conditions

For citation: Zaides S. A., Tran Tuan Dung. Numerical evaluation of the thermal-hydraulic performance of rectangular riblets in a tube. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2026;10(1):13–21. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-1-13-21>. EDN: OZHBQW. (In Russ.).



© Zaides S. A., Tran Tuan Dung, 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В современных системах теплообмена и транспортировки текучих сред задача повышения энергоэффективности неизбежно сталкивается с фундаментальным противоречием между тепловыми и гидравлическими характеристиками [1]. Как правило, интенсификация теплообмена требует разрушения теплового пограничного слоя с помощью турбулизаторов потока или создания искусственной шероховатости на поверхности [2]. Однако этот подход неизбежно ведет к значительному увеличению коэффициента трения и потерь давления на прокачку, превращая тепловой выигрыш в энергетическое бремя [3, 4].

В то время такие решения, как использование материалов с высокой теплопроводностью или создание искусственной шероховатости, могут быть эффективны для увеличения числа Нуссельта (Nu), они часто вызывают чрезмерные гидравлические потери [5]. Напротив, технология риблет (имитирующая кожу акулы) известна своей способностью снижать сопротивление трения за счет управления пристенными вихревыми структурами [3]. Тем не менее их потенциал в решении задачи баланса между тепловыми и гидравлическими характеристиками до сих пор остается недостаточно изученным [6].

Комплексная эффективность поверхностей интенсификации теплообмена обычно оценивается с помощью критерия оценки эффективности (Performance Evaluation Criteria (PEC) — η), который рассматривает соотношение между тепловым выигрышем (рост Nu) и энергетическими затратами (рост коэффициента трения f) [7]. Классические работы Бехерта (Bechert) [8], Уолша (Walsh) [9] и Уэбба (Webb) [7] подтвердили способность риблет снижать гидравлическое сопротивление на 5–10 % по сравнению с гладкой поверхностью.

Однако большинство существующих исследований сосредоточено либо на высокоскоростных воздушных потоках (25–40 м/с) [10], либо рассматривает вопросы теплообмена изолированно. Количество публикаций, посвященных прямому сравнению эффективности PEC упорядоченных структур риблет с эквивалентными песочными шероховатостями, возникающими при эксплуатации трубопроводов, а также с абсолютно гладкими поверхностями при течении в трубах, все еще крайне ограничено [11].

Цель исследования — оценка теплогидравлической эффективности крупномасштабных прямоугольных риблет с оптимальными геометрическими параметрами (при диаметре трубопровода $D = 50$ мм).

Для достижения данной цели были поставлены задачи по определению оптимальных геометрических параметров прямоугольных риблет

с последующим сравнением их теплогидравлических характеристик с гладкими поверхностями и с поверхностями, имеющими эквивалентные песочные шероховатости (высотой 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 мм).

Данные для численного моделирования

Для оценки теплогидравлической эффективности прямоугольных риблет в сравнении с гладкими поверхностями и поверхностями с эквивалентными песочными шероховатостями использовался метод численного моделирования в программном модуле ANSYS Fluent (платформа ANSYS Workbench 19 R1) [12].

Геометрическая модель трубопровода была построена с учетом трансляционной периодичности (Translational Periodicity), имея стандартный номинальный диаметр $D = 50$ мм и длину $L = 3D$. Трансляционно-периодические граничные условия были применены в осевом направлении трубы с целью моделирования режима полностью развитого турбулентного течения. Это позволяет сокращенной расчетной области точно представлять поведение потока в бесконечно длинной трубе. Данный метод позволяет полностью исключить эффекты входного участка и оптимизировать вычислительные затраты, гарантируя, что полученные гидравлические характеристики точно отражают установившийся режим работы структур риблет [13, 14]. На рис. 1 представлена модель трубопровода, построенная с использованием условий трансляционной периодичности, и геометрические параметры прямоугольных риблет.

Характеристики жидкости. В качестве рабочей жидкости принята вода со следующими физическими параметрами: температура 25°C ; постоянный тепловой поток $q = 1000$ Вт/м²; динамическая вязкость $\mu = 0,891 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·с); теплопроводность $k = 0,607$ Вт/(м·К); плотность $\rho = 997$ кг/м³; удельная теплоемкость $c_p = 4180$ Дж/(кг·К); число Рейнольдса $Re = 20\,000$; кинематическая вязкость $\nu = 8,9368 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Для точного моделирования сложных характеристик турбулентного потока вблизи поверхности риблет и для оценки эффективности снижения гидравлических потерь в данном исследовании была выбрана модель турбулентности Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ [15].

Аналогичным образом периодические граничные условия применялись для гладкой поверхности и поверхностей с эквивалентными песочными шероховатостями с высотой неровностей 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 мм. Обоснование использования эквивалентных песочных шероховатостей в качестве эталонной модели для сравнения базируется на классических экспериментах [16]. Выбор данного типа шероховатости в диапазоне 0,2–0,5 мм позволяет сопоставить эффективность структурированных

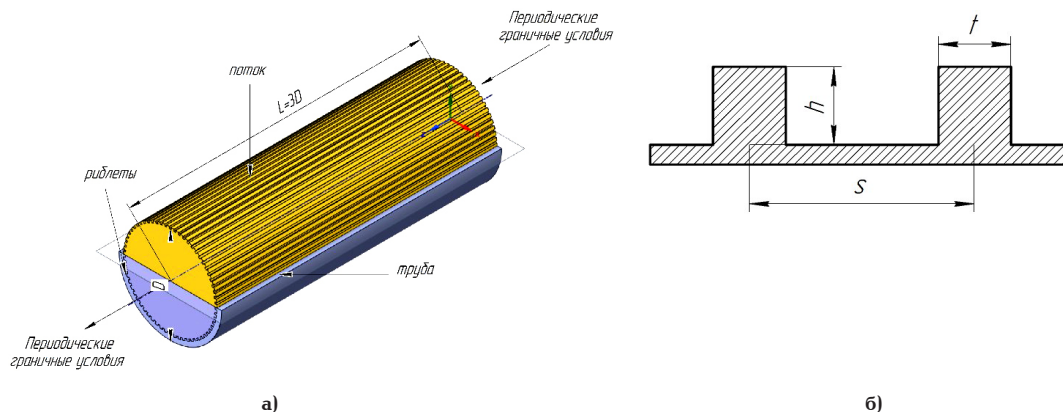


Рис. 1. 3D-модель трубы с прямоугольными риблетами:
 а) модель трубопровода; б) геометрические параметры прямоугольных риблет
 Fig. 1. 3D model of a pipe with rectangular ribs:
 а) pipe model; б) geometric parameters of the rectangular ribs

поверхностей риблет с фундаментальными законами сопротивления для неупорядоченной шероховатости.

Особенность принятой шероховатости заключается в том, что ее точная геометрия не моделировалась (не прорисовывалась). Вместо этого значения высоты шероховатости вводились в настройке граничных условий (раздел Roughness Height) [17–19].

Режим течения характеризуется числом Рейнольдса, определяемым через диаметр трубы и среднюю скорость потока [20]:

$$Re = \frac{\rho u_{\text{поток}} \cdot D}{\mu}, \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; $u_{\text{поток}}$ — средняя скорость потока в поперечном сечении, $\text{м}/\text{с}$; D — внутренний диаметр трубы, м ; μ — динамическая вязкость, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$.

Коэффициент трения f рассчитывается по среднему касательному напряжению на стенке τ_w [5]:

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho u_{\text{поток}}^2}, \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; $u_{\text{поток}}$ — средняя скорость потока в поперечном сечении, $\text{м}/\text{с}$.

Для оценки точности результатов моделирования по влиянию риблет на снижение гидравлических потерь использована формула Блазиуса (справедливая для турбулентного течения в гладких трубах в диапазоне $4000 < Re < 10^5$) [21]:

$$f_0 = 0,3614 \cdot Re^{-0,25}, \quad (3)$$

где f_0 — коэффициент трения гладкой поверхности.

Метод моделирования считается точным, если погрешность коэффициента трения абсолютной гладкой поверхности $f_{\text{глад}}$ не превышает 2 % относительно теоретического значения по Блазиусу f_0 [14].

Для определения интенсивности конвективного теплообмена использована формула Ньютона–Рихмана [21]:

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T, \quad (4)$$

где Q — тепловой поток; h — коэффициент конвективной теплоотдачи; A — площадь поверхности теплообмена; ΔT — разность температур.

Для оценки теплогидравлической эффективности риблет использовано соотношение [22]:

$$\eta = \frac{Q_{\text{рибл.}} / Q_{\text{глад.}}}{(\tau_{w, \text{рибл.}} / \tau_{w, \text{глад.}})^{1/3}}, \quad (5)$$

где Q — тепловой поток; τ_w — касательное напряжение на стенке, Q/Q_0 .

При $\eta > 1$ — поверхность с риблетами демонстрирует положительную эффективность (выигрыш от интенсификации теплообмена превосходит дополнительные энергетические потери на трение); $\eta < 1$ — поверхность с риблетами неэффективна (затраты энергии на преодоление возросшего сопротивления трения превышают выгоду от улучшения теплообмена).

Результаты численного моделирования

На первом этапе исследования необходимо было выбрать и обосновать эффективные размеры прямоугольных риблет для труб диаметром 50 мм. На рис. 2 представлены результаты для сравнительного анализа геометрических параметров прямоугольных риблет высотой $h = 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6$ мм и отношений высоты к ширине h/t , равных 1,0; 1,1; 1,2; 1,4 и 1,6 соответственно.

Что касается высоты риблет (рис. 2а), то значение коэффициента трения достигает минимума при $h = 1,0$ мм ($f = 0,098$). При $h = 0,8$ мм риблеты полностью погружены в вязкий подслои, что приводит к увеличению смоченной поверхности без возможности эффективного воздействия на поток, вызывая тем самым рост коэффициента сопротивления. Увеличение же высоты до 1,2 или 1,6 мм ведет к резкому скачку сопротивления. Это указывает на то, что при таких размерах риблеты начинают глубоко проникать в логарифмическую область пограничного слоя, создавая значительное сопротивление формы (form drag).

Аналогичным образом анализ отношения h/t (рис. 2б) выявляет узкую и четко выраженную оптимальную зону при $h/t = 1,1$, где коэффициент трения снижается до минимального уровня ($f = 0,0259$). Любое отклонение от этого соотношения (будь то снижение до 1,0 или повышение до 1,6) нарушает механизм стабилизации вихрей внутри канавок, что приводит к быстрому возобновлению роста гидравлических потерь. Опираясь на экспериментальные результаты Мирвахиды Мохаммадпу-

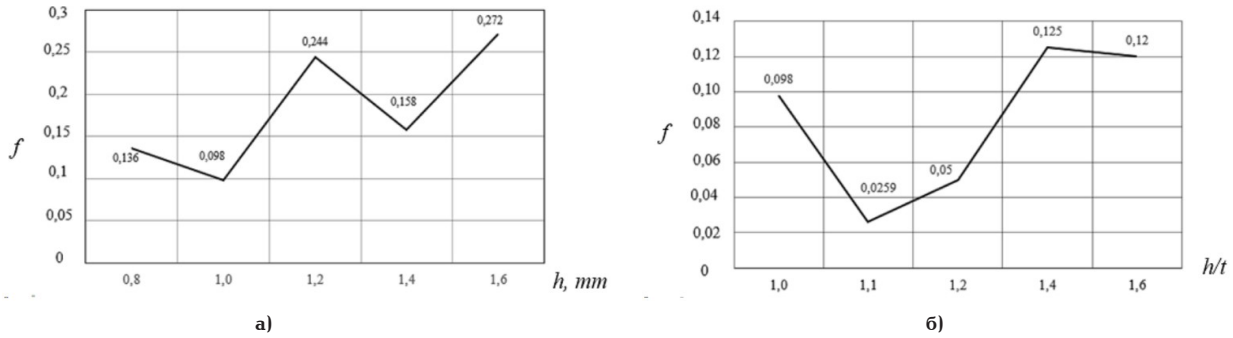


Рис. 2. Зависимость коэффициента гидравлического трения от геометрических параметров прямоугольных риблет: а) коэффициент трения при разных высотах h ; б) коэффициент трения при разных отношениях h/t
 Fig. 2. Dependence of the hydraulic friction coefficient on the geometric parameters of rectangular riblets: а) friction coefficient at different heights h ; б) friction coefficient at different h/t ratios

ра Черхгани и его коллег [23], посвященных оценке оптимальных значений отношения h/s для труб различного диаметра, было установлено, что для труб большого диаметра оптимальным является отношение $h/s = 0,4$. Таким образом, в исследовании было принято это значение и выбрано отношение $h/s = 0,4$. Дальнейшие исследования были выполнены с риблетами следующей геометрии: $h = 1$ мм; $h/t = 1,1$ и $h/s = 0,4$.

На рис. 3 показано отношение коэффициента трения каждой из исследованных поверхностей трубы к коэффициенту трения абсолютно гладкой поверхности f_0 .

Согласно (3), $f_0 = 0,0266$. Анализ рис. 3 показывает, что для гладкой поверхности отношение $f_{\text{глад}}/f_0$ приблизительно равно 1 (отклонение от теоретического решения Блазиуса составляет всего 1,1 %). Это свидетельствует о высокой точности расчетной модели и её достоверности для сравнительного анализа остальных случаев.

В диапазоне высот 0,2–0,5 мм эквивалентная песочная шероховатость вызывает резкий рост гидравлических потерь, так как хаотичные выступы

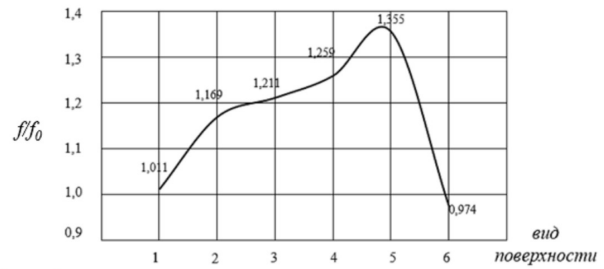


Рис. 3. Зависимость относительной величины коэффициента трения (f/f_0) от типов поверхности труб:
 1 — гладкая поверхность;

2–5 — шероховатость поверхности высотой 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 мм соответственно;

6 — поверхность с риблетами высотой $h = 1$ мм

Fig. 3. Dependence of the relative friction coefficient (f/f_0) on pipe surface types:
 1 — smooth surface; 2–5 — surface roughness with heights of 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5 mm, respectively;
 6 — surface with riblets of height of $h = 1$ mm

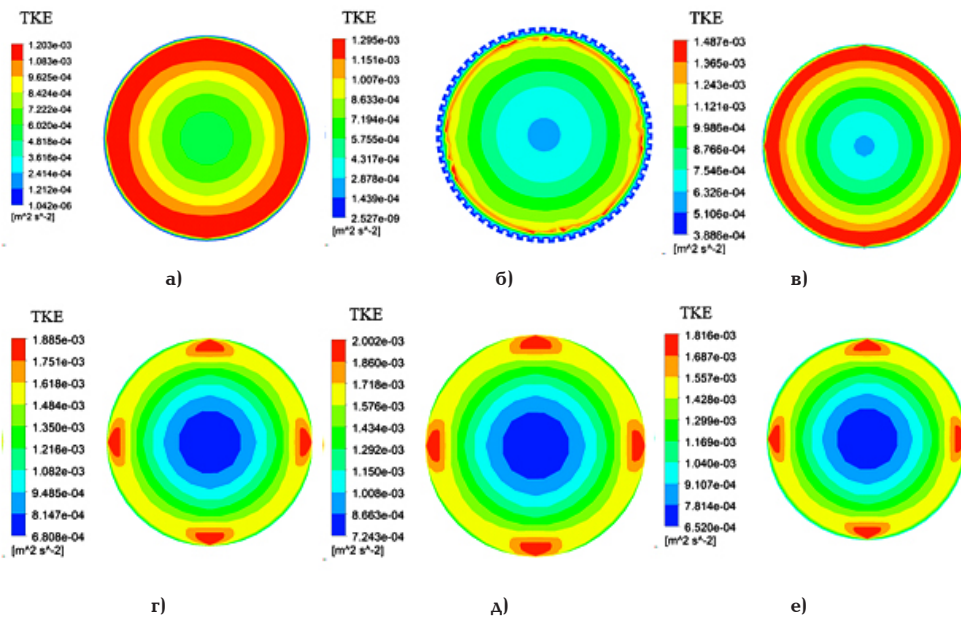


Рис. 4. Турбулентная кинетическая энергия потока в трубах с разными типами поверхностей:
 а) гладкая; б) с риблетами $h = 1$ мм; в) шероховатая с $h = 0,2$ мм;

г) $h = 0,3$ мм; а) $h = 0,4$ мм; е) $h = 0,5$ мм

Fig. 4. Turbulent kinetic energy (TKE) in pipes with different surface types:

а) smooth; б) with riblets of $h = 1$ mm; в) rough of $h = 0.2$ mm;

г) $h = 0.3$ mm; а) $h = 0.4$ mm; е) $h = 0.5$ mm

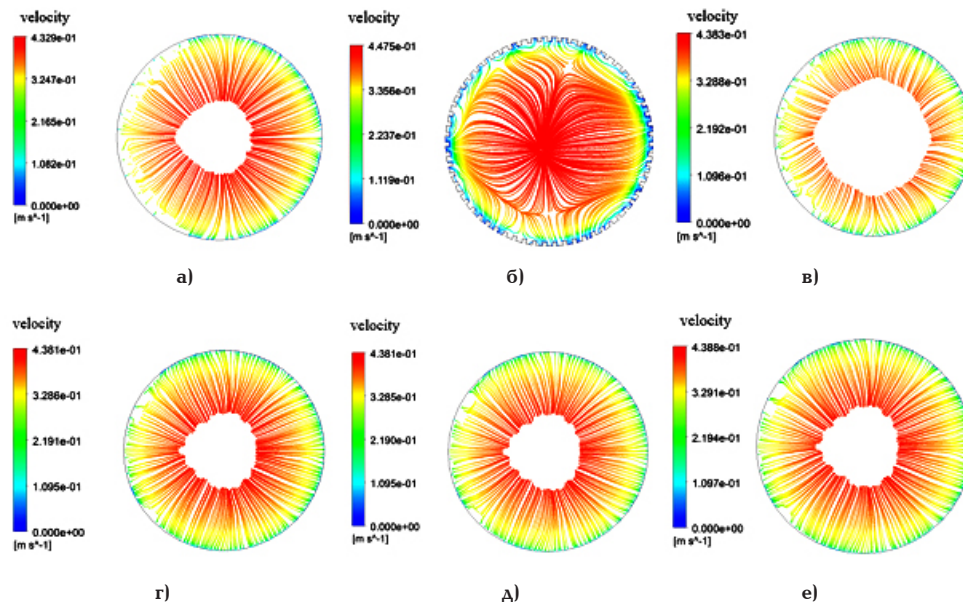


Рис. 5. Распределение скоростей потока в поперечном сечении трубы:
 а) гладкая; б) с риблетами $h = 1$ мм; в) шероховатая с высотой $h = 0,2$ мм;
 г) $h = 0,3$ мм; д) $h = 0,4$ мм; е) $h = 0,5$ мм
 Fig. 5. Flow velocity distribution in the pipe cross-section:
 a) smooth; б) with riblets of $h = 1$ mm; в) rough of $h = 0.2$ mm;
 г) $h = 0.3$ mm; д) $h = 0.4$ mm; е) $h = 0.5$ mm

разрушают вязкий пограничный слой и увеличивают сопротивление трению. В противовес прямоугольные риблеты высотой $h = 1$ мм, несмотря на большие геометрические размеры, демонстрируют обратный эффект. Благодаря способности утолщать вязкий подслой и упорядочивать турбулентные вихри, они снижают отношение коэффициента трения до 0,974. Это обеспечивает итоговое снижение гидравлического сопротивления на 2,6 % в сравнении с абсолютно гладкой поверхностью.

На рис. 4 представлена турбулентная кинетическая энергия потока для разных типов поверхностей трубы.

Анализ распределения турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) в поперечных сечениях потока показывает заметные изменения в режиме течения. Для гладкой поверхности (а) максимальное значение ТКЭ является самым низким и составляет около $1,203 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^2$, что отражает стабильность основного потока с минимальными возмущениями.

При переходе к структуре риблет (б) ТКЭ незначительно возрастает до $1,29 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^2$. Однако этот рост локализован преимущественно на вершинах риблет вследствие их взаимодействия с турбулентными вихрями. При этом вязкий подслой на поверхности риблет является наиболее толстым (соответствует обширным зонам с минимальными значениями ТКЭ), что обеспечивает наименьший коэффициент трения среди всех исследованных вариантов.

В случае шероховатости высотой 0,2 мм (в), как видно из наблюдений, качественное отличие от гладкой поверхности невелико, а максимальное значение высоты составляет $1,48 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^2$. Это объясняется тем, что при высоте 0,2 мм размеры элементов шероховатости сопоставимы или меньше толщины вязкого подслоя. Они начинают вызывать возмущения потока, однако эти возмущения еще недостаточно сильны для разрушения структуры пограничного слоя, как это происходит в случаях с большей шероховатостью.

Напротив, при увеличении высоты шероховатости до 0,3 мм (г), 0,4 мм (д) и 0,5 мм (е) ее вершины выходят за пределы вязкого подслоя. Они становятся основными препятствиями для потока, вызывая резкий скачок ТКЭ до уровня $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^2$, что приводит к более значительным потерям энергии.

На рис. 5 показано распределение скорости и структур потока в поперечном сечении, где отчетливо прослеживается влияние риблет на структуру пограничного слоя и характер потока.

Анализ структур потока на рис. 5 выявляет кардинальное различие в гидродинамике: риблеты (б) функционируют совершенно иначе в сравнении как с гладкой, так и с обычными шероховатыми поверхностями. В частности, в гладкой трубе (а) и во всех случаях естественной шероховатости (в–е) линии тока распределены крайне разреженно, оставляя обширную пустую область в центре трубы (где поперечная составляющая скорости равна 0). Это свидетельствует о пассивном характере течения в указанных случаях: центральное ядро потока скользит прямолинейно, без взаимодействия или поперечного перемешивания со стенкой.

Напротив, исключительно в случае риблет (б) линии тока интенсивно закручиваются и заполняют все поперечное сечение. Это доказывает, что риблеты генерируют устойчивые вторичные вихри, вызывая принудительное перемешивание потока от стенки к центру. Именно этот механизм смешивания способствует оттеснению вредных турбулентных структур от вязкого подслоя, обеспечивая тем самым наименьшее гидравлическое сопротивление среди всех исследованных вариантов.

На рис. 6 представлены характеристики теплообмена для труб с различными типами поверхностей.

Для гладких поверхностей и поверхностей с эквивалентными песочными шероховатостями (от 0,2 до 0,5 мм) график показывает, что интенсификация теплообмена крайне незначительна. Отношение Q/Q_0 остается практически неизменным, лишь не-

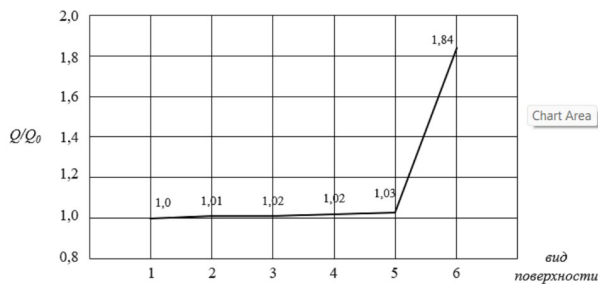


Рис. 6. Сравнение эффективности теплоотдачи труб с разными типами поверхностей:

- 1 — гладкая поверхность; 2–5 — поверхность с шероховатостью высотой 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 мм соответственно; 6 — поверхность с риблетами $h = 1$ мм
 Fig. 6. Comparison of heat transfer efficiency of pipes with different surface types:
 1 — smooth surface; 2–5 — surface roughness with heights of 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5 mm respectively;
 6 — surface with riblets with height of $h = 1$ mm

значительно увеличиваясь с 1,01 до 1,03. Это свидетельствует о том, что данная шероховатость вызывает лишь хаотичные возмущения, увеличивающие сопротивление трения, однако их энергии недостаточно для разрушения теплового пограничного слоя. Следовательно, теплообмен между стенкой трубы и потоком остается ограниченным.

Напротив, использование прямоугольных риблет высотой $h = 1$ мм приводит к резкому скачку тепловой эффективности, увеличивая отношение Q/Q_0 до 1,84. Этот прирост на 84 % обусловлен дву-

мя факторами. Во-первых, прямоугольные выступы действуют как ребра охлаждения, значительно увеличивая площадь поверхности теплообмена без изменения диаметра трубы. Во-вторых, благодаря вторичным вихрям, проанализированным в разделе о структуре потока, происходит активный перенос холодной жидкости из ядра потока к стенке и отвод нагретой жидкости от стенки в центр. Это создает механизм интенсивного конвективного теплообмена, эффективность которого значительно превосходит показатели гладких или шероховатых поверхностей.

На рис. 7 представлено распределение температуры на поверхности стенки трубы, что позволяет детально оценить теплообменную способность для каждой из исследованных поверхностей. При анализе гладкой трубы (а) и труб с эквивалентными песочными шероховатостями (в–е) наблюдается относительно однородное распределение температурного поля. Плавный характер изменения температуры вдоль поверхности указывают на то, что изменение температуры и процесс теплообмена на этих поверхностях протекают вяло и не имеют выраженного локального характера. Это свидетельствует о наличии толстого и устойчивого теплового пограничного слоя. Следовательно, между гладкими и естественно шероховатыми поверхностями не наблюдается существенной разницы в интенсивности конвективного теплообмена — оба варианта демонстрируют низкую эффективность теплопередачи.

Анализ рис. 7б демонстрирует, что распределение температуры на поверхности риблет кардинально отличается от остальных случаев. Непрерывное

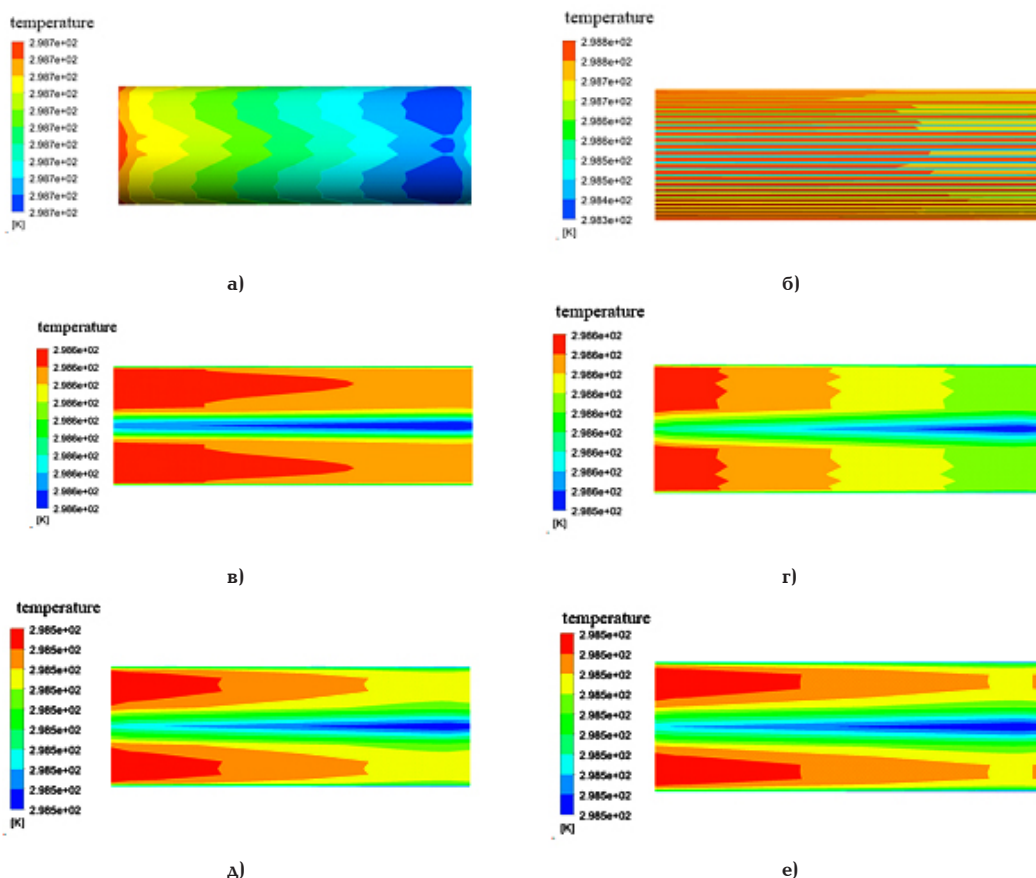


Рис. 7. Распределение температуры на контактной поверхности трубы с разными типами поверхностей:

- а) гладкая поверхность; б) поверхность с риблетами $h = 1$ мм;
 в) шероховатая поверхность с $h = 0,2$ мм; г) $h = 0,3$ мм; д) $h = 0,4$ мм; е) $h = 0,5$ мм
 Fig. 7. Temperature distribution on the pipe contact surface for different surface types:
 a) smooth; б) with riblets of $h = 1$ mm; в) rough of $h = 0.2$ mm; г) $h = 0.3$ mm; д) $h = 0.4$ mm; е) $h = 0.5$ mm

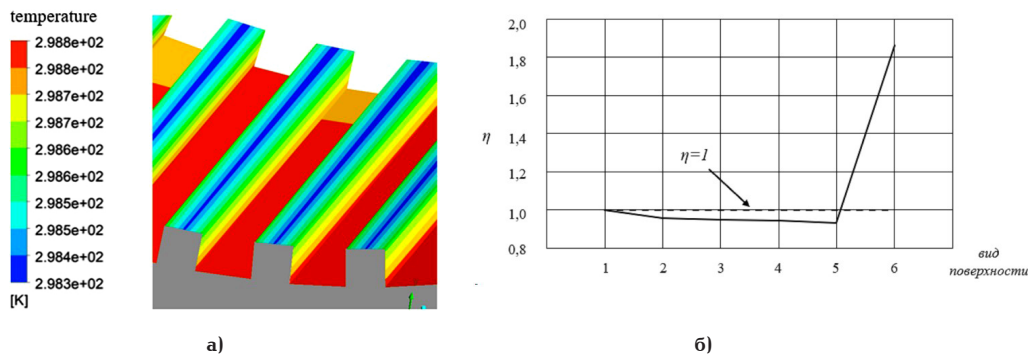


Рис. 8. Распределение температуры по поверхности трубы с риблетами (а) и график сравнения теплогидравлической эффективности труб с разными типами поверхностей (б): 1 — гладкая поверхность; 2–5 — поверхность с шероховатостью высотой 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 мм; 6 — поверхность с риблетами $h = 1$ мм

Fig. 8. Temperature distribution on the surface of a pipe with riblets (a) and comparison of thermo-hydraulic efficiency of pipes with different surface types (b): 1 — smooth surface; 2–5 — surface roughness with heights of 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5 mm, respectively; 6 — surface with riblets with height of $h = 1$ mm

чередование зон с минимальной и максимальной температурами отражает явный температурный перепад между вершинами риблет и впадинами. Высокая плотность изотерм (резкий градиент распределения температуры) на столь малом геометрическом расстоянии свидетельствует о чрезвычайно высоком градиенте температуры (ΔT) в этой зоне. Согласно закону Фурье [2], чем выше температурный градиент, тем интенсивнее плотность теплового потока (q).

В частности, формирование областей пониженной температуры на вершинах риблет доказывает, что риблеты разрушают и истончают тепловой пограничный слой в этих точках, позволяя потоку максимально эффективно контактировать с поверхностью. Это подтверждает, что риблеты интенсифицируют теплообмен не только за счет увеличения площади контакта, но и благодаря тому, что вершины гребней играют ключевую роль в процессе активного отвода тепла в поток.

На рис. 8 более детально представлено распределение температуры на поверхности трубы с риблетами (а), наглядно продемонстрирован механизм их конвективного теплообмена риблет, а также представлена теплогидравлическая эффективность шероховатых поверхностей и риблет по сравнению с гладкой поверхностью (б), что позволяет дать обобщенную оценку их эффективности в рамках исследуемой теплогидравлической задачи.

Рис. 8а дает наиболее наглядное представление о механизме теплопередачи риблет. Анализ распределения температуры показывает формирование отчетливого температурного градиента по высоте структуры: в зоне впадин концентрируется самая высокая температура (298,8 К), в то время как температура постепенно снижается вдоль боковых стенок и достигает минимума на вершинах риблет (298,3 К).

Такой перепад температур доказывает, что тепловая энергия активно передается от основания к вершинам (области минимальных значений). В частности, низкая температура на острых вершинах свидетельствует о том, что тепловой пограничный слой здесь очень тонок, что позволяет потоку эффективно омывать эти участки и осуществлять теплосъем. Таким образом, риблеты не просто увеличивают площадь контакта, но и действуют как активные элементы теплоотвода, оптимизируя про-

цесс конвективного теплообмена между стенкой трубы и потоком.

На рис. 8б представлены результаты оценки комплексной теплогидравлической эффективности (Thermal-Hydraulic Performance), определяемой как отношение выигрыша в интенсификации теплообмена к затратам на увеличение потерь давления. Пунктирная контрольная линия $\eta = 1$ соответствует эффективности гладкой трубы.

В области эквивалентных песочных шероховатостей с $h = 0,2 - 0,5$ мм наблюдается явная тенденция к снижению эффективности: значения η стабильно находятся ниже порогового уровня 1 (колеблясь около 0,95). Этот результат отражает асимметрию в энергетическом балансе: потери давления на трение резко возрастают (с 16 до 35 %), в то время как теплоотдача улучшается незначительно (лишь на 1–3 %). Это подтверждает, что увеличение случайной шероховатости в данном диапазоне размеров не является технико-экономически эффективным, приводя к перерасходу энергии без существенного улучшения тепловой мощности.

В полном контрасте с вышеописанной тенденцией, структура риблет ($h = 1$ мм) демонстрирует абсолютное превосходство: показатель η скачкообразно возрастает, достигая значения приблизительно 1,86. Столь значительный рост эффективности, почти на 86 % по сравнению с гладкой трубой, является результатом оптимального двойного механизма воздействия. Во-первых, с гидравлической точки зрения, риблеты снижают коэффициент трения за счет контроля пристенной турбулентной структуры и генерации вторичных течений. Во-вторых, с тепловой точки зрения, данная структура использует эффект оребрения для увеличения площади теплообмена и интенсификации перемешивания потока.

Таким образом, при $\eta = 1,84$ риблеты подтверждают свой статус оптимального метода пассивной интенсификации теплообмена, превосходно удовлетворяя критериям оценки эффективности (PEC) при проектировании теплообменного оборудования.

Заключение

В рамках исследования было проведено численное CFD-моделирование с целью оценки и сравнения теплогидравлических характеристик гладкой трубы, трубы с эквивалентными песочными шеро-

ховатостями ($h = 0,2-0,5$ мм) и трубы с продольными риблетами ($h = 1,0$ мм, $h/t = 1,1$ и $h/s = 0,4$). Основными выводами после проведения исследования заключаются в том, что:

1. Результаты моделирования демонстрируют явное различие во влиянии морфологии поверхности на гидравлическое сопротивление. В то время как эквивалентные песочные шероховатости нарушают структуру вязкого подслоя и значительно увеличивает коэффициент трения (рост от 16 до 35 % при увеличении высоты с 0,2 до 0,5 мм), структура риблет демонстрирует эффект снижения сопротивления: коэффициент трения оказывается ниже теоретического значения для гладкой трубы (снижение составляет около 2,6 %).

2. Структура риблет демонстрирует превосходную эффективность теплообмена: отношение тепловых потоков (Q/Q_0) достигает 1,84, что значительно превышает незначительный прирост (1–3 %), характерный для обычных шероховатых поверхностей.

3. На основании критерия теплогидравлической эффективности η исследование подтверждает, что структура риблет является оптимальным пассивным техническим решением ($\eta = 1,86$). Напротив, ограничение лишь механической обработкой без оптимизации поверхности демонстрирует нецелесообразность ($\eta < 1$), поскольку потери давления преобладают над тепловым выигрышем.

Список источников / References

1. Митрофанова О. В. Гидродинамика и теплообмен в закрученных потоках в каналах ядерных энергетических установок: монография. Москва: Физматлит, 2010. 286 с. ISBN 978-5-9221-1223-9.

Mitrofanova O. V. Gidrodinamika i teploobmen v zakruchennykh potokakh v kanalakh yadernykh energeticheskikh ustanovok [Hydrodynamics and heat transfer in swirling flows in channels of nuclear power plants]. Moscow, 2010. 286 p. ISBN 978-5-9221-1223-9. (In Russ.).

2. Leontiev A. I., Lushchik V. G., Makarova M. S. Temperature recovery factor in the boundary layer on a permeable plate. *High Temperature*. 2017;55(2):246–252. <https://doi.org/10.1134/S0018151X17020080>.

3. Dean B., Bhushan B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2010;368(1929):4775–4806. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0201>. EDN: OCZZWV.

4. Garcia-Mayoral J., Jimenez J. Drag reduction by riblets. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2011;369(1940):1412–1427. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0347>.

5. Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: монография. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та. 2012. 88 с. ISBN 978-5-7422-3349-7. EDN: QJZWON.

Garbaruk A. V., Strelets M. Kh., Shur M. L. Modelirovaniye turbulentsnosti v raschetakh slozhnykh techeniy [Turbulence modeling in complex flow calculations]. Saint Petersburg, 2012. 88 p. ISBN 978-5-7422-3349-7. EDN: QJZWON. (In Russ.).

6. Soleimani S., Eckels S. A review of drag reduction and heat transfer enhancement by riblet surfaces in closed and open channel flow. *International Journal of Thermofluids*. 2021;9:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100053>. EDN: DFVAJB.

7. Webb R. L., Kim N.-H. Principles of enhanced heat transfer. New York: Taylor & Francis, 2005. 846 p. <https://doi.org/10.4324/9780203017869>.

8. Bechert D. W., Bruse M., Hage W. [et al.]. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable

geometry. *Journal of Fluid Mechanics*. 1997;338:59–87. <https://doi.org/10.1017/S0022112096004673>. EDN: ECLQYP.

9. Walsh M. J. Riblets as a viscous drag reduction technique. *AIAA Journal*. 1983;21(4):485–486. <https://doi.org/10.2514/3.60126>.

10. Walsh M. J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets. *AIAA Paper*. 2012;82-0169:1–11. <https://doi.org/10.2514/6.1982-169>.

11. Lushchik V. G., Makarov A. E., Yakubenko A. E. Heat transfer and friction on surfaces with longitudinal ribs. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2005;43:881–889. <https://doi.org/10.1007/s10740-005-0135-z>. EDN: LJBOYP.

12. ANSYS Inc. ANSYS Design Modeler User's Guide. Version 2019 R1. Canonsburg, PA, USA: ANSYS Inc., 2019. 450 p.

13. Eggels J., Unger F., Weiss M. [et al.]. Fully developed turbulent pipe flow: a comparison between direct numerical simulation and experiment. *Journal of Fluid Mechanics*. 1994;268:175–209. <https://doi.org/10.1017/S002211209400131X>.

14. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа: монография. Москва: Физматлит. 2012. 468 с. ISBN 978-5-9221-1438-7. EDN: UGLCIR.

Volkov K. N., Emel'yanov V. N. Vychislitel'nyye tekhnologii v zadachakh mekhaniki zhidkosti i gaza [Computational technologies in problems of fluid and gas mechanics]. Moscow, 2012. 468 p. ISBN 978-5-9221-1438-7. EDN: UGLCIR. (In Russ.).

15. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994;32(8):1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>.

16. Chung D., Hutchins N., Schultz M. P., Flack K. A. Predicting the Drag of Rough Surfaces. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2021; Vol. 53. P. 439–471. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-062520-115127>.

17. Schlichting H., Gersten K. Boundary-layer theory. 9th revised ed. Berlin: Springer, 2017. 805 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>.

18. Andersson B., Andersson R., Håkansson L. [et al.]. Computational fluid dynamics for engineers. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 216 p. ISBN 978-1-107-01895-2.

19. Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment*. 2007;41(2):238–252. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.019>.

20. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1992. 672 с.

Idel'chik I. E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistance]. Ed. by M. O. Shteynberga. 3rd ed., revised and add. Moscow, 1992. 672 p. (In Russ.).

21. Патанкар С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах / пер. с англ. Е. В. Калабина / под ред. Г. Г. Янькова. Москва: МЭИ, 2003. ISBN 5-7046-0898-1. EDN: QMIDVJ.

Patankar S. V. Chislennoye resheniye zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh [Numerical solution of the thermal conductivity and convective heat transfer while channels flow]. Transl. from Engl. by E. V. Kalabina. Ed. by G. G. Yan'kova. Moscow, 2003. ISBN 5-7046-0898-1. EDN: QMIDVJ. (In Russ.).

22. Попов И. А., Махьянов Х. М., Гуреев В. М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: монография / под общ. ред. Ю. Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 560 с. ISBN 978-5-93962-383-4. EDN: QMKUGF.

Popov I. A., Makhyanov Kh. M., Gureyev V. M. Fizicheskiye osnovy i promyshlennoye primeneniye intensifikatsii teploobmena [Physical foundations and industrial application of heat exchange intensification]. Ed. by Yu. F. Gortyshova. Kazan, 2009. 560 p. ISBN 978-5-93962-383-4. EDN: QMKUGF. (In Russ.).

23. Cherghani M. M., Malekan M. R. Shark skin-inspired surface designs for drag reduction in drinking water distribution pipes. *Water Research*. 2022;284(15):1–9. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123965>. EDN: LRBHMI.

Вклад авторов:

С. А. Зайдес. Постановка целей и задач исследования, определение методологии, научное руководство, критический анализ полученных результатов, редактирование и правка текста статьи.

Чан Туан Зунг. Проведение численного моделирования, сбор и обработка расчетных данных, построение графиков и визуализация полей течения, анализ теплогидравлической эффективности, написание основного текста статьи.

Authors' contribution:

Semen V. Zaides. Formulation of research aims and objectives, determination of methodology, scientific guidance, critical analysis of the obtained results, editing and revision of the manuscript.

Tran Tuan Dung. Performing numerical simulations, collection and processing of computational data, plotting graphs and visualization of flow fields, analysis of thermo-hydraulic efficiency, writing the main text of the article.

Информация об авторах:

ЗАЙДЕС Семен Азикович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Материаловедение, сварочные и аддитивные технологии» Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ), г. Иркутск.

SPIN-код: 2348-6220

AuthorID (РИНЦ): 324067

ORCID: 0000-0001-9416-7749

e-mail: zsa@ex.istu.edu

ЧАН Туан Зунг, аспирант кафедры «Материаловедение, сварочные и аддитивные технологии» ИРНИТУ, г. Иркутск.

ORCID: 0009-0001-5189-2884

e-mail: trantuandung98@gmail.com

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 22.01.2026; одобрена после рецензирования 06.02.2026; принята к публикации 11.02.2026.

Information about the authors:

ZAIDES Semen Azikovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Materials Science, Welding and Additive Technologies Department, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk.

SPIN-code: 2348-6220

AuthorID (RSCI): 324067

ORCID: 0000-0001-9416-7749

e-mail: zsa@ex.istu.edu

TRAN Tuan Dung, Postgraduate of the Materials Science, Welding and Additive Technologies Department, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk.

ORCID: 0009-0001-5189-2884

e-mail: trantuandung98@gmail.com

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 22.01.2026; approved after reviewing 06.02.2026; accepted for publication 11.02.2026.