

УДК 532.669

Выбор и обоснование формы риблет для снижения гидравлических потерь и повышения теплопередачи в изделиях трубчатой формы

С.А. Зайдес, Т.З. Чан, Л.Г. Климова

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Selection and justification of riblet geometry for hydraulic loss reduction and heat transfer enhancement in tubular components

S.A. Zaides, T.D. Tran, L.G. Klimova

Irkutsk National Research Technical University

Рассмотрена актуальная проблема снижения гидравлических потерь и интенсификации теплообмена в трубчатых деталях путем оптимизации формы риблет. С помощью численного моделирования турбулентного течения (модель $k-\omega$ SST) в программной среде ANSYS Workbench проведен сравнительный анализ эффективности риблет треугольной, трапецеидальной и прямоугольной формы. Установлено, что при одинаковых базовых размерах наилучшие гидродинамические и тепловые характеристики имеют прямоугольные риблеты. Они обеспечивают минимальное падение давления (1227,38 Па против 1533,25 Па у треугольных) и максимальную теплоотдачу (число Нуссельта $Nu = 116,7$). Риблеты прямоугольной формы эффективнее отдают крупные вихри от пограничного слоя, что не только снижает сопротивление, но и минимизирует вероятность отложения осадка на стенках трубы.

EDN: HLTZRQ, <https://elibrary/hltzrq>

Ключевые слова: гидравлические потери, интенсификация теплообмена, риблеты, численное моделирование, турбулентное течение

This article addresses the critical problem of reducing hydraulic losses and enhancing heat transfer in tubular components. To achieve this, a comparative analysis of triangular, trapezoidal, and rectangular riblet profiles was conducted using numerical simulation of turbulent flow ($k-\omega$ SST model) in ANSYS Workbench. It was found that, given identical base dimensions, rectangular riblets exhibit the best performance. They provide the minimum pressure drop (1227.38 Pa compared to 1533.25 Pa for triangular profiles) and maximum heat transfer (Nusselt number $Nu = 116.7$). It is demonstrated that the rectangular geometry more effectively displaces large vortices away from the boundary layer, which not only reduces frictional resistance but also minimizes the likelihood of sediment deposition on the pipe walls.

EDN: HLTZRQ, <https://elibrary/hltzrq>

Keywords: hydraulic loss, surface micro-relief, enhancing heat transfer, riblets, numerical modeling, turbulent flow

Гидравлические потери в трубопроводе определяются качеством его элементов, трением, видом материала, типом рабочей жидкости (РЖ) и многими другими факторами. Однако основной причиной гидравлических потерь является трение РЖ о стенки трубы, а также местные потери (в местах изгибов, соединений, задвижек и других элементов арматуры) [1–4].

Теплопередача в трубах — способность обмена теплотой между потоком РЖ, несущим тепловую энергию, и внешней средой через пограничный слой. Оптимизация способности к теплопередаче может быть востребована в различных агрегатах: холодильных установках, системах отопления, кондиционерах и др. [5, 6].

В природе существует много примеров микроструктур в виде шероховатостей на поверхностях, которые были исследованы, оценены и объяснены как результат приспособления к воздействию внешних факторов. Самый известный случай — исследование кожи акулы, покрытой продольными риблетами, снижающими гидродинамическое сопротивление при ее движении в океане [7–10].

Пионером в исследовании влияния шероховатых поверхностей на свойства потока РЖ был профессор И. Никурадзе [4]. Его исследования показали, что шероховатые поверхности растягивают и разделяют пристенные вихревые области вдоль впадин между этими выступами, что значительно снижает напряжение сдвига на стенке, причем больше, чем на гладкой поверхности, что уменьшает гидравлические потери. После этого открытия началось углубленное изучение искусственных риблет как эффективного инструмента для повышения устойчивости всего потока.

Однако существует субъективное мнение, что влияние риблет аналогично течению потока в плоских каналах, поэтому количества исследований, посвященных изучению влияния риблет разного типа на турбулентный поток внутри трубы, все еще недостаточно для полного понимания картины [11–13].

Кроме того, исследования риблет сверхмалого размера показали, что инженерам-машиностроителям и производителям крайне сложно, а зачастую и невозможно полностью применить предыдущие исследовательские результаты на практике [14, 15]. Это требует очень высоких затрат, экономическая эффективность которых не может быть оправдана. Следовательно, необходимы новые подходы и

более глубокие исследования типов риблет, которые позволили бы инженерам-машиностроителям и технологам применять достоинства шероховатых поверхностей в практической жизни. В связи с этим необходимо исследовать эффективность риблет.

Цель работы — определение оптимальной формы риблет, обеспечивающей максимальную гидродинамическую и тепловую эффективность потока.

Построение расчетной модели потока. Рассмотрены риблеты треугольной, трапециевидной и прямоугольной формы, имеющие одинаковые высоту, ширину основания и шаг s , расположенные внутри одной и той же круглой трубы.

Для оценки гидравлических потерь выбран участок трубы длиной $L = 120$ мм с внутренним диаметром $D = 10$ мм и риблетами высотой $h = 0,2$ мм, что соответствует отношению $h/D = 0,02$, т. е. весьма незначительному значению по сравнению с диаметром трубы.

В качестве РЖ выступала вода, имеющая следующие физические параметры: температура — 25°C ; динамическая вязкость $\mu = 0,891 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·с); коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,607$ 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. Плотность теплового потока q принята равной 1000 Вт/м².

Моделирование выполнено на основе метода конечных элементов в программной среде ANSYS Workbench. Модель исследуемого трубопровода с некоторыми условиями моделирования приведена на рис. 1.

В экспериментальном исследовании [16] установлено, что для труб малого диаметра самым эффективным является отношение $h/s = 0,4 \dots 0,5$, а для труб с внутренним диаметром $D \approx 10 \dots 12$ мм — $h/s = 0,4$.

Модели треугольных, трапециевидных и прямоугольных риблет показаны на рис. 2, а–в. Согласно экспериментальным данным, для $h = 0,2$ мм и отношения $h/s = 0,4$ шаг риблет s равен $0,5$ мм [16].

В классических работах Б. Дина и Б. Бхушана по исследованию кожи быстроплавающих акул [3] установлено, что треугольные риблеты с углом при вершине 54° имеют наилучшую эффективность снижения гидравлических потерь

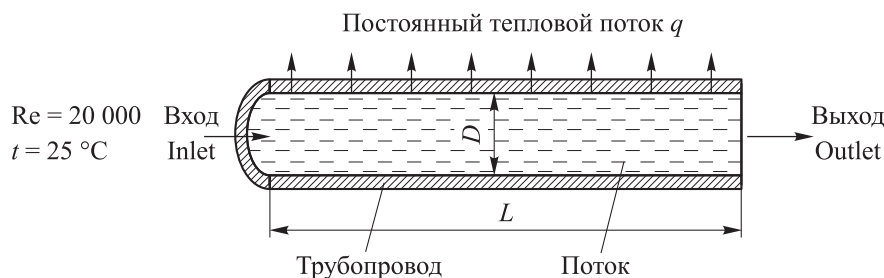


Рис. 1. Модель исследуемого трубопровода с некоторыми условиями моделирования

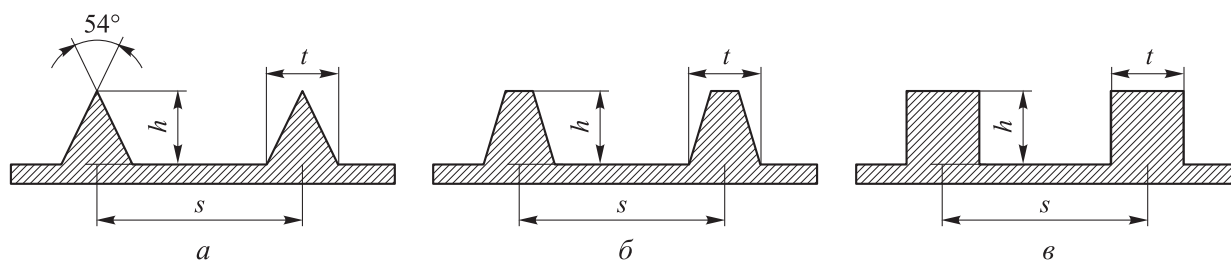


Рис. 2. Модели треугольных (а), трапециевидных (б) и прямоугольных (в) риблет

в канальных потоках. В связи с этим острый треугольник с углом при вершине 54° также был включен в рассмотрение с целью сравнения с другими типами риблет.

При численном исследовании течения потока РЖ вопрос о том, следует ли детализировано моделировать реальный геометрический профиль риблет, напрямую определяет точность и достоверность получаемых результатов, делая этот подход более реалистичным. В отличие от многих предыдущих исследований, где применялись эквивалентные модели или корректирующие коэффициенты, в нашей работе конфигурации треугольных, трапециевидных и прямоугольных риблет полностью воссозданы на внутренней поверхности трубы в среде ANSYS Design Modeler 2019 R1 [17].

Известно, что при построении сетки в среде ANSYS Meshing, чем меньше значение y^+ в задаче о риблетах, тем больше снижаются гидравлические потери, вследствие чего принято $y^+ < 1$. В этом случае толщина первого пристеночного слоя составила 6,28 мкм, что обеспечивает формирование гладкого пограничного слоя и гарантирует точность результатов расчета.

Модели внутренней поверхности трубы с треугольными, трапециевидными и прямоугольными риблетами и расчетные сетки, построенные в среде ANSYS, приведены на рис. 3, а–е.

Для определения входной скорости течения потока U при числе Рейнольдса $Re = 20\,000$ использована формула [18]

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \Rightarrow U = \frac{Re \mu}{\rho D}. \quad (1)$$

Скорость течения потока U , определенная по формуле (1) через граничное условие Velocity Inlet на входе, составила 1,78 м/с. На стенках трубы следует применять граничное

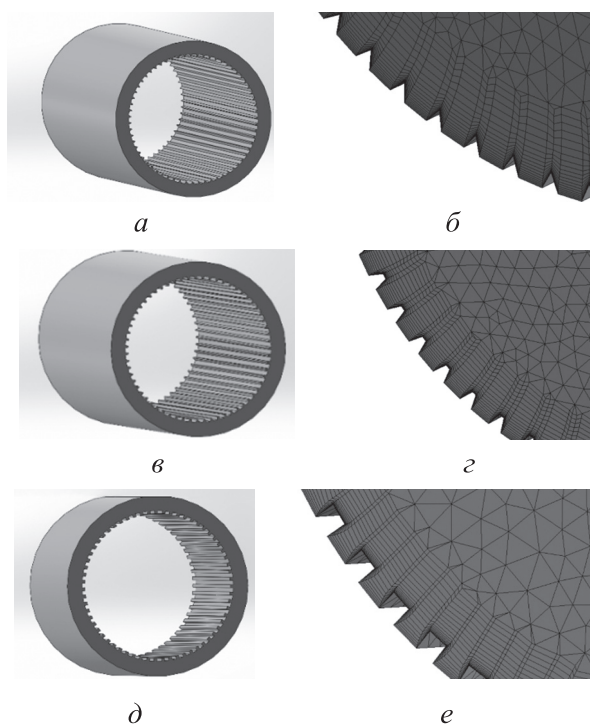


Рис. 3. Модели (а, в, д) и расчетные сетки (б, г, е) внутренней поверхности трубы с треугольными (а, б), трапециевидными (в, г) и прямоугольными (д, е) риблетами

условие отсутствия скольжения (no slip), а на выходе — условие Pressure Outlet (0 Па) с целью упрощения расчетов и обеспечения численной стабильности.

Для моделирования турбулентного потока и анализа влияния ребристых поверхностей труб на поток использована модель $k-\omega$ SST, разработанная Ф.Р. Ментером [19]. Эта модель предназначена для точного моделирования и расчета параметров вблизи поверхности объекта, в рассматриваемом случае — шероховатого пристенного пограничного слоя.

Для расчета гидравлических потерь в канале трубопровода использовано выражение

$$\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}},$$

где Δp — потери давления между двумя концами трубы; $p_{\text{вх}}$ и $p_{\text{вых}}$ — полное давление на входе в трубу и на выходе из нее.

Потеря энергетического потока представляет собой потери давления между двумя концами трубы [18].

Для определения вектора теплового потока $\mathbf{q}''$ использовано уравнение теплопроводности Фурье, а конвективная составляющая автоматически интегрируется через решение уравнения энергии [20]:

$$\mathbf{q}'' = -\lambda \nabla T + \sum_j h_j J_j + \dots,$$

где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ∇T — градиент температуры (производная температурного поля по пространству), К/м; $\sum_j h_j J_j$ — тепловой поток, обусловленный диффузией вещества.

Тогда общий тепловой поток, передаваемый через поверхность с площадью поперечного сечения S , вычисляется как

$$Q = \iint_S (\mathbf{q}'' \cdot \mathbf{n}) dS, \quad (2)$$

где $\mathbf{n}$ — вектор нормали, определяющий направление теплопередачи.

Другим важным параметром, определяющим способность к теплопередаче, является число Нуссельта Nu — отношение общего количества теплоты, фактически переданного конвекцией, к количеству теплоты, которое перешло бы только за счет теплопроводности через такой же слой неподвижной РЖ [11]:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda},$$

где α — коэффициент конвективной теплопередачи, определяемый с помощью модуля Surface Heat Transfer Coefficient в среде ANSYS Fluent.

Результаты моделирования. Оценка гидравлических потерь потока. Для оценки гидравлических потерь необходимо проанализировать распределение давления потока по всей длине трубы.

Распределение давления потока по длине трубы с треугольными, трапециевидными и прямоугольными риблетами показано на рис. 4. Видно, что при одинаковых входных условиях потока форма риблет влияет на сопротивление, возникающее при ударе потока об их профиль. Максимальное давление потока в зоне начального контакта у трубы с треугольными риблетами (3599 Па) существенно выше, чем у труб с трапециевидными (3473 Па) и прямоугольными (3399 Па) риблетами.

Форма риблет также определяет различия в поддержании начального сопротивления в

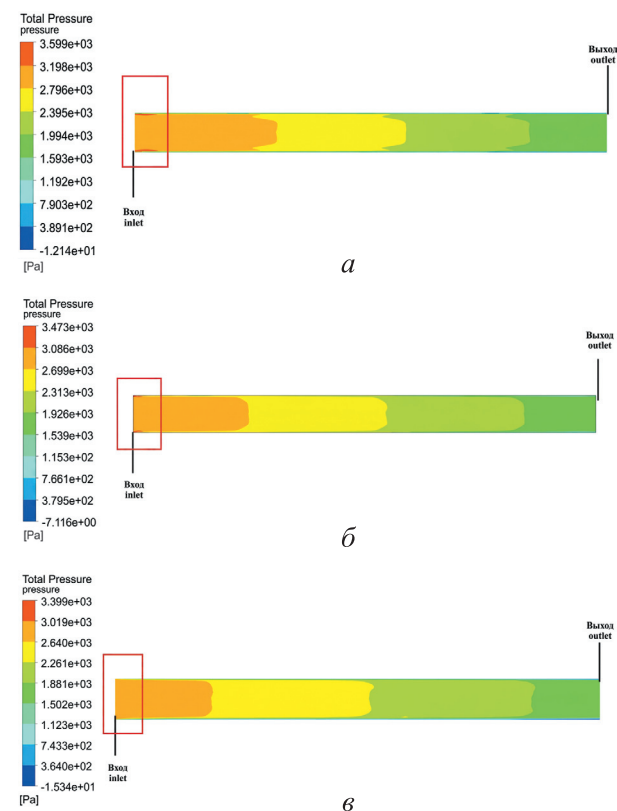


Рис. 4. Распределение давления потока, Па, по длине трубы с треугольными (а), трапециевидными (б) и прямоугольными (в) риблетами

пристенной области. В то время как треугольные риблеты не способны обеспечить раннее отрывное течение потока, и зона высокого давления сохраняется на довольно большой протяженности, трапециевидные риблеты показывают средний результат, поддерживая ее на более коротком участке (см. рис. 4).

В трубе с прямоугольными риблетами после создания сопротивления из-за взаимодействия с их профилем поток высокого давления отделяется наиболее рано по впадинам между риблетами. Благодаря этому высокое давление потока вблизи стенки быстро снижается, что позволяет поддерживать более стабильное и равномерное давление во всем потоке. Это предотвращает быстрое падение давления потока, наблюдаемое у трапециевидных риблет и, особенно, у треугольных.

Параметры, связанные с энергетическими потерями потока, полученные на основании результатов расчета в программе ANSYS Fluent, приведены в табл. 1.

Наибольшее различие в потерях наблюдается между прямоугольными и треугольными риблетами, достигая 305,87 Па. В то время как снижение потерь у трапециевидных риблет находится на среднем уровне. Это означает, что прямоугольные риблеты обладают наибольшей эффективностью в ограничении гидравлических потерь.

Наиболее важные результаты по выявлению причины большей эффективности прямоугольных риблет, чем у риблет другой формы, приведены на рис. 5 и 6.

Анализ распределения давления потока на входе в трубу с риблетами разного типа (см. рис. 5) показывает, что треугольные риблеты создают обширные зоны повышенного давления во всей входной области потока РЖ. Трапециевидные риблеты демонстрируют несколько лучшие характеристики, так как давление в ядре турбулентного потока снижается до относительно низкого уровня (примерно 2500...2700 Па). Однако по сравнению с прямоуголь-

Таблица 1

Результаты исследования энергетических потерь потока в трубах с риблетами разной формы

Форма риблеты	$p_{\text{вх}}$, Па	$p_{\text{вых}}$, Па	Δp , Па
Треугольная	3161,22	1627,97	1533,25
Трапециевидная	3004,10	1623,23	1380,87
Прямоугольная	2855,67	1628,29	1227,38

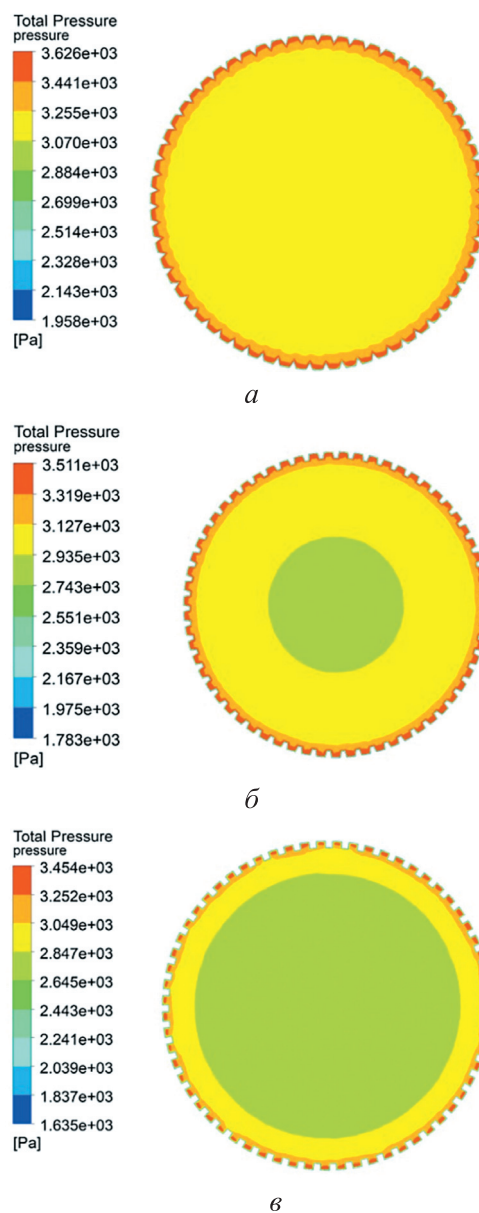
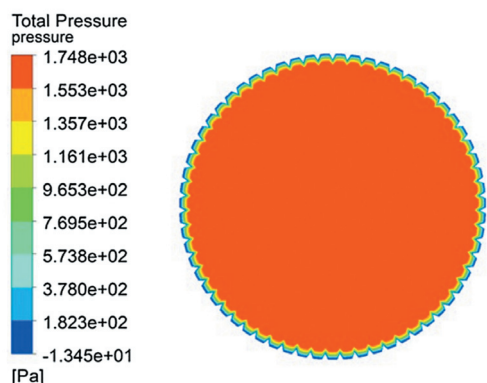


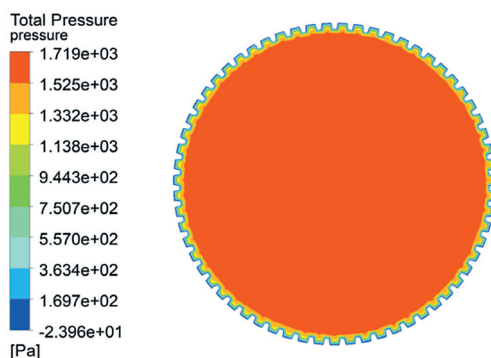
Рис. 5. Результаты моделирования давления потока на входе в трубу с треугольными (а), трапециевидными (б) и прямоугольными (в) риблетами

ными риблетами два других типа проявляют существенные недостатки.

Кроме того, в области впадин между риблетами, где в пограничном слое доминируют вязкие силы, треугольные и трапециевидные риблеты формируют обширные зоны высокого давления потока (треугольные примерно 3626 Па, трапециевидные — 3511 Па) из-за дополнительного сопротивления, создаваемого их формой. В то же время прямоугольные риблеты, хотя и создают определенное геометрическое сопротивление, образуют более тон-



а



б

Рис. 6. Результаты моделирования давления потока, Па, на выходе из трубы с треугольными (а), трапециевидными (б) и прямоугольными (в) риблетами

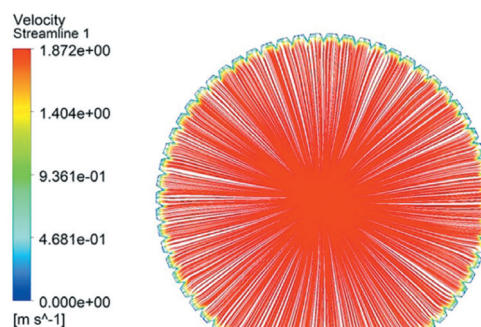
кие зоны высокого давления потока, которые эффективно взаимодействуют с переходным слоем, что способствует общему снижению давления.

Как видно из рис. 6, прямоугольные риблеты больше способствуют смещению областей высокого давления дальше от пограничного слоя, чем другие риблеты. Трапециевидные риблеты показывают наименьшую эффективность в отделении этих зон от стенки. Благодаря чему вязкий пограничный слой у прямоугольных риблет остается более стабильным, а давление потока сохраняется на более высоком уровне, так как трение вблизи стенки риблет такой формы меньше, чем у других вариантов.

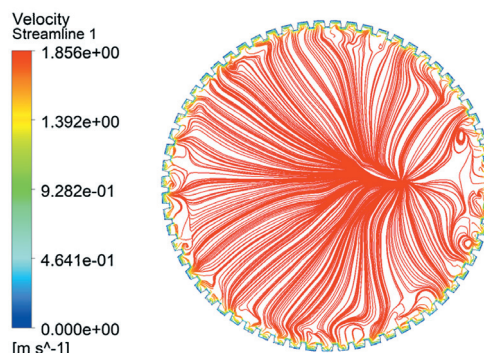
Кроме того, анализ потоков показывает, что благодаря своей форме прямоугольные риблеты создают более равномерное распределение среднего давления в турбулентном потоке на входе. Именно эта особенность объясняет различия в среднем общем давлении потока на входе в трубу с риблетами разного типа, что в итоге определяет разницу в уровне гидравлических потерь.

Эффективность риблет в снижении гидравлических потерь во всех исследованиях обусловлена тем, что вихревые потоки благодаря риблетной поверхности поднимаются и отделяются от пограничного слоя, тем самым стабилизируя пограничный слой, что снижает гидравлические потери.

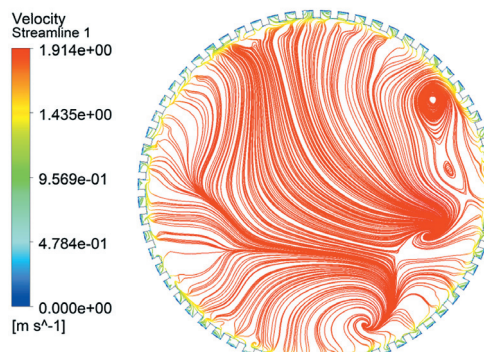
Распределение скорости течения потока по сечению труб с треугольными, трапециевидными и прямоугольными риблетами показано на рис. 7. Видно, что треугольные риблеты почти не способны отодвинуть крупные вихри от по-



а



б



в

Рис. 7. Распределение скорости течения потока, м/с, по сечению труб с треугольными (а), трапециевидными (б) и прямоугольными (в) риблетами

граничного слоя. Вихри продолжают воздействовать на пограничный слой, создавая наибольшие гидравлические потери.

В трубе с трапециевидными риблетами вихри значительно приподняты по сравнению с таковыми в трубе с треугольными риблетами, но все еще недостаточно далеко от пограничного слоя, и плотность вихрей остается высокой. Однако в случае прямоугольных риблет вихри поднимаются выше, объединяются и формируют турбулентный поток со скоростью течения, превышающей таковую у других форм.

Сравнение результатов теплопередачи потока. Рассмотрено влияние формы риблет на эффективность теплопередачи потока.

Результаты расчета коэффициента Нуссельта Nu и общего теплового потока Q (количества теплоты, рассеиваемой на поверхности пограничного слоя) приведены в табл. 2.

Зависимости общего теплового потока Q и числа Нуссельта Nu от формы риблет показаны на рис. 8. Видно, что число Нуссельта увеличивается от треугольной формы к трапециевидной и достигает наивысшего значения у прямоугольной. Одновременно с ростом числа Nu кривая общего теплового потока Q также постепенно возрастает от треугольной формы к трапециевидной и достигает максимума у прямоугольной. Это точно отражает взаимосвязь между коэффициентом теплопередачи и общим количеством теплоты, передаваемой на поверхности стенки трубы.

Для объяснения такого результата рассмотрим рис. 9, где показано распределение температуры по поверхности трубы с треугольными, трапециевидными и прямоугольными риблетами. Видно, что благодаря более высоким значениям числа Нуссельта у прямоугольных и трапециевидных риблет теплообмен происходит эффективнее, чем у треугольных. Поэтому в потоке над прямоугольными и трапециевидными риблетами не образуются многие зоны

Таблица 2

Значения коэффициента Нуссельта и общего теплового потока Q для труб с риблетами разной формы

Форма риблеты	Nu	Q , Вт
Треугольная	94,65	5,61
Трапециевидная	110,76	6,18
Прямоугольная	116,70	6,80

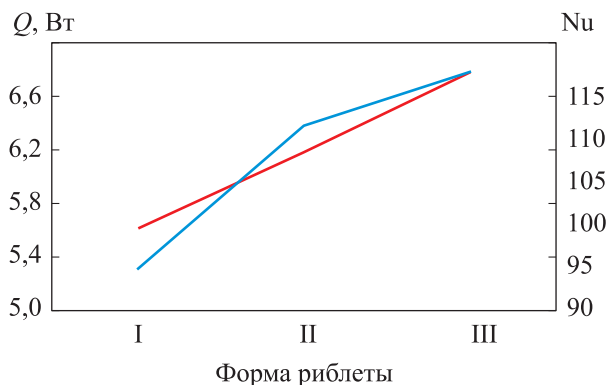


Рис. 8. Зависимости теплового потока Q (—) и числа Нуссельта Nu (—) от формы риблеты: I, II и III — треугольная, трапециевидная и прямоугольная риблета соответственно

повышенной температуры, как это наблюдается у риблет треугольного типа.

Максимальное различие температур по всей поверхности составляет $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($25,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ у треугольных и $25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ у трапециевидных), что незначительно. Так как температура почти одинаковая, различия в рассеиваемой тепловой мощности между риблетами разного типа в основном обусловлены их формой. Иными словами, когда форма риблет приводит к уменьшению толщины теплового пограничного слоя в зоне контакта с потоком, способность поверхности к теплообмену повышается.

Это указывает на то, что значительный вклад в способность к теплопередаче вносят именно вершины риблет. Наблюдая за увеличенным фрагментом на рис. 9, можно заметить, что у треугольных риблет по всей поверхности почти одинаковая интенсивность теплообмена. Боковые поверхности треугольных риблет оказывают меньшее влияние на теплопередачу, чем поверхности впадин между ними.

Благодаря более широкой вершине трапециевидных риблет их способность к теплообмену лучше, чем у треугольных. Однако в канавках между этими трапециевидными риблетами наблюдается более светлый оттенок, что указывает на снижение теплового потока для компенсации интенсивного теплоотвода с поверхности их вершин.

Напротив, прямоугольные риблеты имеют две вертикальные боковые стороны, что приводит к тому, что смачиваемая поверхность по их бокам совпадает по направлению с вектором нормали $\mathbf{n}$ в формуле (2). Это способствует то-

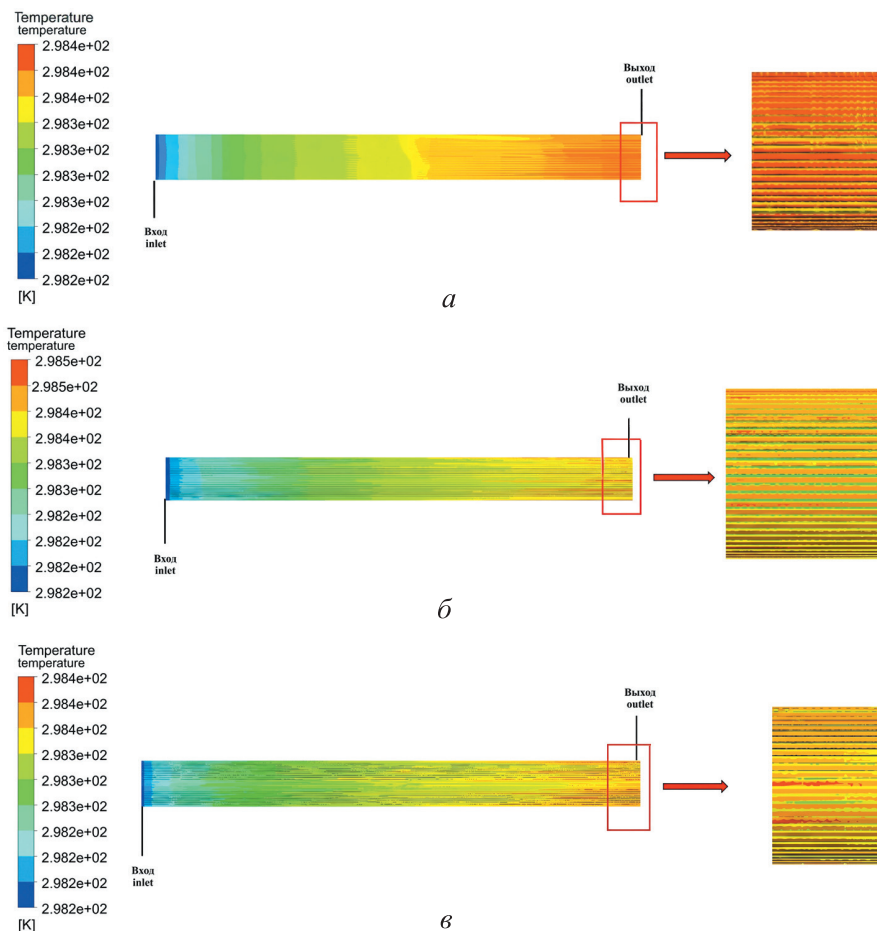


Рис. 9. Распределение температуры по поверхности трубы с треугольными (а), трапециевидными (б) и прямоугольными (в) риблетами

му, что теплообмен в основном сосредоточен на поверхности вершины риблет.

Кроме того, благодаря тому, что площадь вершины прямоугольных риблет является наибольшей, обеспечивается максимальный среди всех типов риблет контакт теплового пограничного слоя с основным потоком. Поэтому количество передаваемой теплоты также является наибольшим среди всех форм риблет.

Выводы

1. Исследована способность риблет разной формы, расположенных внутри трубы, снижать гидравлические потери и повышать эффективность теплопередачи.

2. По результатам исследования установлено следующее:

- гидравлические потери и теплопередачу в

трубе при одинаковых базовых размерах риблет определяет их форма;

- прямоугольные риблеты обеспечивают наименьшие гидравлические потери (1227,38 Па против 1380,87 Па у трапециевидных риблет и 1533,25 Па у треугольных), наибольшее число Нуссельта и тепловой поток (6,8 Вт против 6,18 Вт у трапециевидных риблет и 5,61 Вт у треугольных);

- турбулентный поток в трубе с прямоугольными риблетами имеет вихри, поднятые дальше от пограничного слоя и формирующие зоны более крупных вихрей с более высокой скоростью течения потока; это свидетельствует о том, что трубы с риблетами такой формы способны полностью устранить их недостаток — отложение осадка на стенках, который служит причиной увеличения гидравлических потерь, снижения расхода потока и повышения вероятности повреждения труб.

Литература

- [1] Алымов А.Д. *Гидравлические потери в трубопроводных системах*. Москва, Инфра-Инженерия, 2014. 298 с.
- [2] Дерюгин В.В., Васильев В.Ф., Уляшева В.М. *Тепломассообмен*. Москва, Лань, 2020. 240 с.
- [3] Dean B., Bhushan B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 2010, vol. 368, no. 1929, pp. 4775–4806, doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0201>
- [4] Collicott S.H., Valentine D.T., Houghton E.L., Carpenter P.W. *Chapter 3 — Viscous flow and boundary layers*. Aerodynamics for Engineering Students, Butterworth-Heinemann, 2026, pp. 147–249, <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-399544-3.00007-4>
- [5] García-Mayoral R., Jiménez J. Hydrodynamic stability and breakdown of the viscous regime over riblets. *J. Fluid Mech.*, 2011, vol. 678, pp. 317–347, doi: <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.114>
- [6] García-Mayoral R., Jiménez J. Drag reduction by riblets. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 2011, vol. 369, no. 1940, pp. 1412–1427, doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0359>
- [7] Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. Москва, Дрофа, 2003. 840 с.
- [8] Монин А.С., Яглом А.М. *Статистическая гидромеханика*. Ч. 1. *Механика турбулентности*. Москва, Наука, 1965. 640 с.
- [9] Choi H., Moin P., Kim J. Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets. *J. Fluid Mech.*, 1993, vol. 255, pp. 503–539, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112093002575>
- [10] Reynolds O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1895, vol. 186, pp. 123–164.
- [11] Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P. et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley, 2011. 1080 p.
- [12] Walsh M.J., Weinstein L.M. Drag and heat-transfer characteristics of small longitudinally ribbed surfaces. *AIAA J.*, 1979, vol. 17, no. 7, pp. 770–771, doi: <https://doi.org/10.2514/3.61216>
- [13] Soleimani S., Eckels S. A review of drag reduction and heat transfer enhancement by riblet surfaces in closed and open channel flow. *Int. J. Thermofluids*, 2021, vol. 9, art 100053, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100053>
- [14] Bechert D.W., Bruse M., Hage W. Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin. *Exp. Fluids*, 2000, vol. 28, no. 5, pp. 403–412, doi: <https://doi.org/10.1007/s003480050400>
- [15] Sharma V., Dutta S. Investigation of Bio-inspired Sawtooth Riblets for Boundary Layer Flow Over a Flat Surface. *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng* 47, 2023, pp. 1417–1435, <https://doi.org/10.1007/s40997-023-00612-6>
- [16] Cherghani M.M., Malekan M.R. Shark skin-inspired surface designs for drag reduction in drinking water distribution pipes. *Water Res.*, 2025, vol. 284, art. 123965, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123965>
- [17] ANSYS *design modeler user's guide*. Version 2019 R1. ANSYS, 2019. 450 p.
- [18] Идельчик И.Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям*. Москва, Машиностроение, 1992. 672 с.
- [19] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, doi: <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [20] Лыков А.В. *Теория теплопроводности*. Москва, Высшая школа, 1967. 600 с.

References

- [1] Alymov A.D. *Gidravlicheskie poteri v truboprovodnykh sistemakh* [Hydraulic losses in pipeline systems]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2014. 298 p. (In Russ.).
- [2] Deryugin V.V., Vasilyev V.F., Ulyasheva V.M. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow, Lan Publ., 2020. 240 p. (In Russ.).

- [3] Dean V., Bhushan B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 2010, vol. 368, no. 1929, pp. 4775–4806, doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0201>
- [4] Collicott S.H., Valentine D.T., Houghton E.L., Carpenter P.W. *Chapter 3 — Viscous flow and boundary layers*. Aerodynamics for Engineering Students, Butterworth-Heinemann, 2026, pp. 147–249, <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-399544-3.00007-4>
- [5] García-Mayoral R., Jiménez J. Hydrodynamic stability and breakdown of the viscous regime over riblets. *J. Fluid Mech.*, 2011, vol. 678, pp. 317–347, doi: <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.114>
- [6] García-Mayoral R., Jiménez J. Drag reduction by riblets. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 2011, vol. 369, no. 1940, pp. 1412–1427, doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0359>
- [7] Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2003. 840 p. (In Russ.).
- [8] Monin A.S., Yaglom A.M. *Statisticheskaya gidromekhanika*. Ch. 1. *Mekhanika turbulentnosti* [Statistic hydromechanics. P. 1. Turbulence mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 640 p. (In Russ.).
- [9] Choi H., Moin P., Kim J. Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets. *J. Fluid Mech.*, 1993, vol. 255, pp. 503–539, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112093002575>
- [10] Reynolds O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1895, vol. 186, pp. 123–164.
- [11] Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P. et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley, 2011. 1080 p.
- [12] Walsh M.J., Weinstein L.M. Drag and heat-transfer characteristics of small longitudinally ribbed surfaces. *AIAA J.*, 1979, vol. 17, no. 7, pp. 770–771, doi: <https://doi.org/10.2514/3.61216>
- [13] Soleimani S., Eckels S. A review of drag reduction and heat transfer enhancement by riblet surfaces in closed and open channel flow. *Int. J. Thermofluids*, 2021, vol. 9, art 100053, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100053>
- [14] Bechert D.W., Bruse M., Hage W. Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin. *Exp. Fluids*, 2000, vol. 28, no. 5, pp. 403–412, doi: <https://doi.org/10.1007/s003480050400>
- [15] Sharma V., Dutta S. Investigation of Bio-inspired Sawtooth Riblets for Boundary Layer Flow Over a Flat Surface. *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng* 47, 2023, pp. 1417–1435, <https://doi.org/10.1007/s40997-023-00612-6>
- [16] Cherghani M.M., Malekan M.R. Shark skin-inspired surface designs for drag reduction in drinking water distribution pipes. *Water Res.*, 2025, vol. 284, art. 123965, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123965>
- [17] ANSYS *design modeler user's guide*. Version 2019 R1. ANSYS, 2019. 450 p.
- [18] Idelchik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook on hydraulic resistances]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 672 p. (In Russ.).
- [19] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, doi: <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [20] Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat transfer]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 27.03.2026

Информация об авторах

ЗАЙДЕС Семен Азикович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: zsa@ex.istu.edu).

ЧАН Туан Зунг — аспирант кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: trantuandung98@gmail.com).

КЛИМОВА Лариса Генриховна — кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной и компьютерной графики. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: larisgoko@yandex.ru).

Information about the authors

ZAIDES Semen Azikovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: zsa@ex.istu.edu).

TRAN Tuan Dung — Postgraduate, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: trantuandung98@gmail.com).

KLIMOVA Larisa Genrikhovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering and Computer Graphics. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: larisgoko@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайдес С.А., Чан Т.З., Климова Л.Г. Выбор и обоснование формы риблет для снижения гидравлических потерь и повышения теплопередачи в изделиях трубчатой формы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 9, с. 56–66.

Please cite this article in English as:

Zaides S.A., Tran T.D., Klimova L.G. Selection and justification of riblet geometry for hydraulic loss reduction and heat transfer enhancement in tubular components. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 9, pp. 56–66.