УДК 532.669.1 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-137-140

# ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ РИБЛЕТ В ТРУБЧАТЫХ ДЕТАЛЯХ

***Зайдес С.А.[1], Чан Т.З.[1], Чан Ч.Ш.[2], Чан З.К.[2]***
*[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск;*
*[2]Военно-промышленный колледж, Ханой, Вьетнам*

**Ключевые слова:** сопротивление потока, прямоугольные риблеты, число Рейнольдса, турбулентный поток, вязкий подслой, гидравлические потери.
**Аннотация.** Статья посвящена проблеме снижения гидравлических потерь и повышения энергоэффективности трубчатых деталей за счет оптимизации геометрии прямоугольных риблет. Ввиду отсутствия обобщенных методик расчета, целью исследования стала разработка комплексного подхода, сочетающего CFD-моделирование (Ansys Fluent) и вывод аналитических уравнений. В ходе работы установлены оптимальные геометрические пропорции риблет ($t/s$ = 0,1). На основе полученных численных данных построена обобщенная математическая модель, связывающая параметры риблет с числом Рейнольдса и внутренним диаметром D.

# THEORETICAL JUSTIFICATION OF OPTIMAL GEOMETRIC PARAMETERS FOR RECTANGULAR RIBLETS IN TUBULAR COMPONENTS

***Zaides C.A.[1], Tran T.D.[1], Tran T.S.[2], Tran D.Q.[2]***
*[1]Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk;*
*[2]Military Industrial College, Hanoi, Vietnam*

**Keyworks:** flow resistance, rectangular riblets, reynolds number, turbulent flow, viscous sublayer, hydraulic losses.
**Abtracts.** This paper addresses the reduction of hydraulic losses and the improvement of energy efficiency in tubular components by optimizing rectangular riblet geometry. Due to the lack of generalized calculation methods, this study develops a comprehensive approach combining CFD modeling (Ansys Fluent) and analytical derivations. The research establishes optimal geometric proportions for riblets ($t/s = 0.1$). Based on numerical data, a generalized mathematical model was constructed, linking riblet parameters with the Reynolds number and tube diameter D.

## Введение

В последние десятилетия снижение сопротивления трения в турбулентном потоке стало одной из центральных задач в области гидроаэродинамики и трубопроводного транспорта [1]. Эффективным биомиметическим решением является использование риблет, способных модифицировать структуру пристенных вихрей в пограничном слое и существенно снижать энергетические потери на трение [2]. Несмотря на высокий прикладной потенциал в различных отраслях промышленности [3], большинство современных исследований носят преимущественно феноменологический характер, что создает барьеры для их массового внедрения.

Ключевой проблемой инженерной практики остается дефицит обобщенных расчетных моделей для прямого определения оптимальных геометрических параметров риблет – высоты ($h$), ширины ($t$) и шага ($s$) – применительно к конкретным условиям эксплуатации (числу Рейнольдса $Re$ и диаметру детали $D$). В результате процесс профилирования поверхностей до сих пор базируется на ресурсоемком методе проб и ошибок [4].

**Цель исследования:** Разработка системы математических уравнений для прямого расчета оптимальных геометрических параметров прямоугольных риблет ($h, s, t$) в трубчатых деталях с целью минимизации гидравлических потерь, а также комплексная верификация предложенной аналитической модели методами вычислительной гидродинамики (CFD).

**Методика исследования.** На рисунке 1 представлена модель трубчатой детали с внутренним диаметрам $D$ с гидродинамическим стабилизированным течением при наличии прямоугольных риблет со следующими геометрическими параметрами: высота ($h$), ширина ($t$) и шаг ($s$).

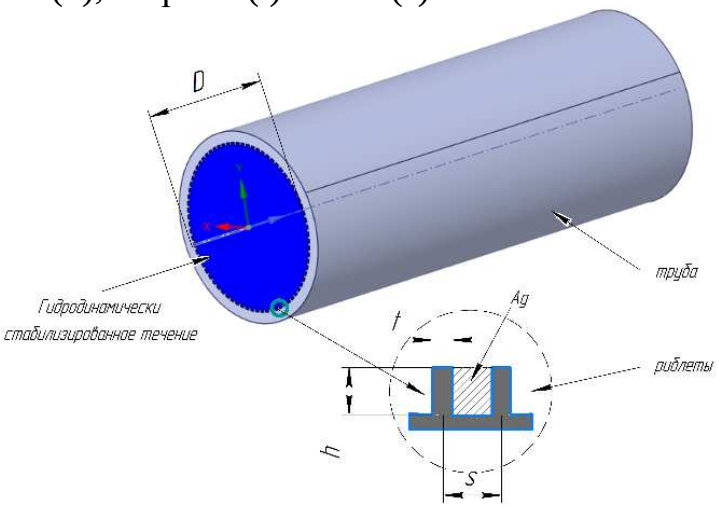



Рис. 1. Модель патрубка с прямоугольными риблетами: $Ag$ – площадь канавок между риблетами

*Характеристики жидкости*: в качестве рабочей среды принята вода со следующими физическими параметрами: динамическая вязкость: $\mu = 0{,}891 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·с), плотность: $\rho = 997$ кг/м³, кинематическая вязкость: $\nu = 8{,}9368 \times 10^{-7}$ м²/с.

Для точного моделирования сложных характеристик турбулентного потока вблизи поверхности риблет и оценки эффективности снижения гидравлических потерь в данном исследовании была выбрана модель турбулентности Shear Stress Transport (SST) $k$-ω [5]. Для экономии вычислительных ресурсов применяется периодическое (periodic) граничное условие. Данный метод позволяет полностью исключить эффекты входного участка и оптимизировать вычислительные затраты, гарантируя, что полученные гидравлические характеристики точно отражают установившийся режим работы структур риблет.

Для оценки размеров риблет с учетом корреляции с турбулентным пограничным слоем их физические размеры (высота $h$, шаг $s$) преобразуются в безразмерные пристеночные параметры вязкого подслоя стенки патрубка. Эти

безразмерные величины обозначаются знаком плюс в виде верхнего индекса (+) и рассчитываются через скорость трения $u_\tau$ и кинематическую вязкость ($\nu$):

$$h^+ = h\frac{u_\tau}{\nu} \text{ и } s^+ = s\frac{u_\tau}{\nu}. \quad (1)$$

где: $h^+$, $s^+$ – безразмерные ширины и шаги риблет; $u_\tau$ – скорость трения; $\nu$ – кинематическая вязкость.

**Результаты исследования.** Рисунок 2 представляет степень снижения гидравлических потерь и эффективные значения $s^+$ при разных отношениях $t/s$ для $D$ = 30 мм и 40 мм.

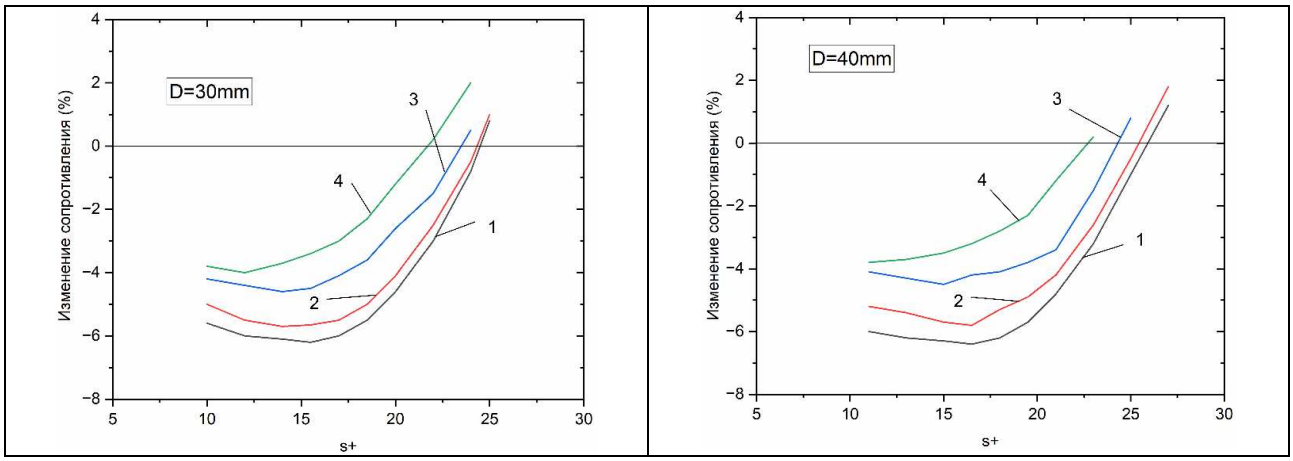



Рис. 2. Изменение гидравлического сопротивления в патрубках в зависимости от безразмерного шага прямоугольных риблет $s^+$ и отношения ширины к шагу t/s при постоянном значении $h/s$ = 0,5:
1 – $t/s$ = 0,1; 2 – $t/s$ = 0,2; 3 – $t/s$ = 0,3; 4 – $t/s$ = 0,4

Анализ рисунка 3 показывает, что для исследованных патрубков с разными диаметрами D и отношениями ширины к шагу $t/s$, чем шире риблеты (чем больше отношение $t/s$), тем меньше эффективность снижения гидравлических потерь. В частности, для $t/s$ = 0,3 и $t/s$ = 0,4 графики достигают значений снижения потерь при довольно низких $s^+_{опт.}$, около 11-12, и быстро теряют эффективность при увеличении $s^+$. В то же время $t/s$ = 0,1 и $t/s$ = 0,2 обладают лучшей эффективностью, особенно отношение $t/s$ = 0,1, которое всегда демонстрирует наибольшее превосходство, так как эффективность снижения гидравлических потерь при этом отношении неизменно достигает 6,2-6,3% при $s^+_{опт.}$ в диапазоне 14-15,5.

Таким образом, используя отношение $t/s$ = 0,1, было построено следующее математическое уравнение для определения оптимальных параметров прямоугольных риблет в зависимости от диаметра патрубка $D$ (при $D \geq 30$мм) и чисел Рейнольдса Re:

$$s = \frac{2D}{3}\left[1 + 2\cos\left(\frac{1}{3}\arccos\left(1 - \frac{23207,43}{\mathrm{Re}^{1,75}}\right) - \frac{2\pi}{3}\right)\right].$$

**Заключение.** Данное исследование установило надежную методологию оптимального проектирования структуры прямоугольных риблет с целью снижения гидравлических потерь в трубчатых деталях. На основе анализа и обобщения получены следующие основные выводы:

1. Результаты численного моделирования на платформе Ansys показывают, что эффективность снижения гидравлического сопротивления тесно зависит от

ширины прямоугольных риблет. Оптимальна конфигурация достигается при отношении $t/s = 0{,}1$.

2. На основе рациональных данных, полученных CFD были получено уравнение для определения геометрических параметров прямоугольных риблет.

**Список литературы**

1. Кузьма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Хованский Р.Б. и др. Методы снижения гидравлического сопротивления длинных криогенных трубопроводов // Тепловые процессы в технике. – 2020. – Т. 12, №7. – С. 290-300. – DOI: 10.34759/tpt-2020-12-7-290-300.
2. 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.
3. Алымов А.Д. Гидравлические потери в трубопроводных системах: анализ и методы снижения. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 298 с.
4. García-Mayoral R., Jiménez J. Hydrodynamic stability and breakdown of the viscous regime over riblets. // Journal of Fluid Mechanics. 2011, vol. 678, pp. 317-347. doi.org/10.1017/jfm.2011.114.
5. 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, vol. 9, 15p. doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100053.

Сведения об авторах:

*Зайдес Семен Азикович* – д.т.н., профессор, профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий;

*Чан Туан Зунг* – аспирант;

*Чан Чыонг Шинь* – преподаватель кафедры технологий вооружения и боеприпасов;

*Чан Зань Куанг* – преподаватель, кафедры технологий вооружения и боеприпасов.