

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-297-306>
УДК 536.24



Оригинальная статья

В. Л. Жданов*, Е. А. Пустоход, А. Д. Чорный

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ВОЗДУШНОМ КАНАЛЕ
ПРОДОЛЬНЫМИ ВИХРЯМИ**

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования интенсификации теплообмена в канале прямоугольного сечения ($0,005 \times 0,031$) м длиной 0,175 м. Нижняя поверхность канала равномерно нагревается до 343 К, а ее охлаждение осуществляется воздушным потоком при двух значениях расхода $Q = 0,0010044$ и $0,00209$ м³/с и температуре 293 К. Интенсификация теплообмена совершается вихревыми генераторами (ВГ), расположенными на нагреваемой и противоположной ей поверхностях канала. Вихревые генераторы состоят из двух прямоугольных пластин (высота пластин $h = 0,002$ м, длина $l = 0,015$ м), установленных по нормали к поверхности и под углом атаки $\alpha = 15^\circ$ к потоку. Нижние ВГ генерируют пары продольных вихрей, которые формируют за пластинами общие потоки, направленные к нагретой стенке, а верхние пары вихрей генерируют общие потоки, направленные от стенки к центру канала. Взаимодействие продольных вихрей и создаваемых ими вторичных потоков с основным потоком усиливает смешение внутри канала и теплообмен с поверхностями. Исследование выполнено методом RANS в интервале чисел Рейнольдса 1200–2600, рассчитанных по высоте вихревого генератора и скорости потока на входе в канал. Показано, что тепловая мощность канала с вихревыми генераторами на нижней поверхности увеличивается по сравнению с аналогичной в канале с гладкими стенками на 17–23 % соответственно указанным расходам. При расположении ВГ на нижней и верхней поверхностях тепловая мощность возрастает на 27–32 %. Метод может найти практическое применение при разработке конструкций теплообменников для охлаждения малоразмерных источников тепловыделения или для обеспечения теплообмена в труднодоступных областях.

Ключевые слова: воздушный канал, вихревые генераторы, тепловой поток, продольные вихри

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Жданов Валерий Львович* – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0001-6674-203X>. E-mail: valery.zhdanov@hmti.ac.by; *Пустоход Егор Александрович* – младший научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. E-mail: pustokhod@hmti.ac.by; *Чорный Андрей Дмитриевич* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>. E-mail: anchor@hmti.ac.by

Вклад авторов: *Жданов Валерий Львович* – формулирование идеи, исследовательских целей и задач, написание текста статьи, анализ результатов; *Пустоход Егор Александрович* – проведение численных исследований, подготовка графического материала; *Чорный Андрей Дмитриевич* – разработка методологии исследования, анализ литературных источников.

Для цитирования: Жданов, В. Л. Интенсификация теплообмена в воздушном канале продольными вихрями / В. Л. Жданов, Е. А. Пустоход, А. Д. Чорный // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 297–306. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-297-306>

Поступила в редакцию: 22.08.2024

Доработанный вариант: 10.09.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

© Жданов В. Л., Пустоход Е. А., Чорный А. Д., 2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Valery L. Zhdanov*, Egor A. Pustohod, Andrei D. Chorny

*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus,
15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus***HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN AIR CHANNEL BY LONGITUDINAL VORTEXES**

Abstract Numerical investigation of heat transfer is carried out in an air channel of the rectangular cross section (0.005×0.031) m with the length of 0.175 m. The lower surface of the channel is uniformly heated up to 343 K, and the air flow temperature at the channel entrance is 293 K. Two flow rates $Q = 0.0010044$ and 0.00209 m³/s are considered. The heat transfer between the channel surfaces and the cooling air flow enhances by vortex generators (VG) placed at a heated and an opposite surfaces. These generators are formed by two rectangular plates arranged vertically on the surface and at an angle of attack $\alpha = 15^\circ$ to the flow. The plate height is $h = 0.002$ m and its length is 0.015 m. The VGs at the heated surface creates a pair of longitudinal vortexes that generates behind the plates a common flow to the surface while a pair of longitudinal vortexes at the upper surface creates the common flow away from it. Interaction of longitudinal vortices and secondary flows created by them with the main flow enhances mixing inside the channel and heat exchange with surfaces. Investigation was carried out by the RANS method at $Re = 1300$ – 2600 based on the VG height and the flow velocity at the channel entrance. It is shown that the thermal power of the channel with VG at the lower surface increases relative to that in the smooth walls channel by 17–23 % for the considered flow rates. If VG are placed at the both surfaces, the channel thermal power increases by 27–32 % depending on the flow rate.

Keywords: air channel, vortex generators, heat flow, longitudinal vortices

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Valery L. Zhdanov* – Dr. Sci. (Engineering), Leading Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus. <https://orcid.org/0000-0001-6674-203X>. E-mail: valery.zhdanov@hmti.ac.by; *Egor A. Pustohod* – Junior Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: pustokhod@hmti.ac.by; *Andrei D. Chorny* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>. E-mail: anchor@hmti.ac.by.

Contribution of the authors: *Valery L. Zhdanov* – formulation of ideas, research goals and objectives, writing the text of the article, analyzing the results; *Egor A. Pustohod* – numerical calculations, preparing graphic material; *Andrei D. Chorny* – development of research methodology, analysis of literary sources.

For citation: Zhdanov V. L., Pustokhod E. A., Chorny A. D. Heat transfer enhancement in air channel by longitudinal vortexes. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 297–306 (in Russian). doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-297-306

Received: 22.08.2024

Modified: 10.09.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Введение. В связи с интенсивным развитием мощностей компьютеров и обслуживающего сетевого оборудования увеличивается генерация тепла на критических элементах архитектуры указанной техники, что снижает надежность ее функционирования. Поэтому возникает необходимость отвода избыточной тепловой энергии. Данная задача должна решаться с помощью устройств ограниченных физических размеров. Это условие определило внимание к методам интенсификации теплообмена маломасштабными возмущениями, в том числе с помощью генерации продольных вихрей.

Интерес к продольным вихревым структурам проявился в XX в. по мере раскрытия их преимуществ перед поперечными вихрями [1–3]. Прежде всего, они имеют существенно меньшее сопротивление, поскольку их оси совпадают с направлением основного потока, в котором они возникают. Продольные вихри генерируют нормальные и поперечные скорости, что, усиливая трехмерность потока, обеспечивает интенсификацию смешения.

Были исследованы как одиночные, так и парные продольные вихри [2–4]. Продольные вихри разрушают гидродинамический и тепловой пограничный слой, усиливая отвод или подвод тепла к поверхности, и увеличивают теплообмен в канале на 10–77 % в зависимости от режима течения [4]. Генерация продольных вихрей, как правило, осуществлялась с помощью тонких пластин, установленных по нормали к поверхности под углом атаки к потоку. Пара таких пластин, которая при взаимном расположении формирует конфузурный канал, генерирует пару продоль-

ных вихрей, создающих общий поток, направленный от поверхности. Трение на поверхности под этим потоком снижается. При формировании пластинами диффузорного канала пара продольных вихрей генерирует общий поток, направленный к поверхности. Этот поток уменьшает толщину пристеночного слоя и приводит к росту напряжений сдвига на поверхности. Поэтому вихревые генераторы (ВГ), формирующие диффузорный канал, применяются для интенсификации теплообмена с поверхностью [5–7]. Так, теплообмен в воздушном канале с одним рядом ВГ при ламинарном режиме течения увеличивается с 16,5 по 44,0 %, а перепад давления возрастает только на 12 % [8]. При этом режиме течения в канале пара продольных вихрей увеличивает теплообмен на 33 % по сравнению с воздействием одиночного вихря [9]. Применение одновременно в канале двух и более пар ВГ увеличивает интенсификацию теплообмена, но возникает большая неопределенность в прогнозировании конечных результатов, поскольку взаимное расположение ВГ оказывает существенное влияние на смешение. Такие исследования крайне ограничены.

В данной работе исследуется интенсификация теплообмена в узком канале с подводом тепла при установке на его внутренней поверхности вихревых генераторов диффузорного и конфузорного типа.

Объект и метод исследования. Объектом исследования являлся воздушный канал прямоугольного сечения шириной 0,031 м, высотой 0,005 м и длиной 0,175 м. К его нижней поверхности подводился тепловой поток так, что ее температура возрастала до 343 К. Охлаждение осуществлялось воздушным потоком с температурой входа 293 К. Интенсификация теплообмена обеспечивалась вихревыми генераторами двух типов. Создающие общий поток к стенке пары генераторов располагались на нижней поверхности в четыре ряда (рис. 1, *b*). На верхней поверхности пары ВГ создавали общий поток от стенки к центру канала и размещались в три ряда (рис. 1, *c*).

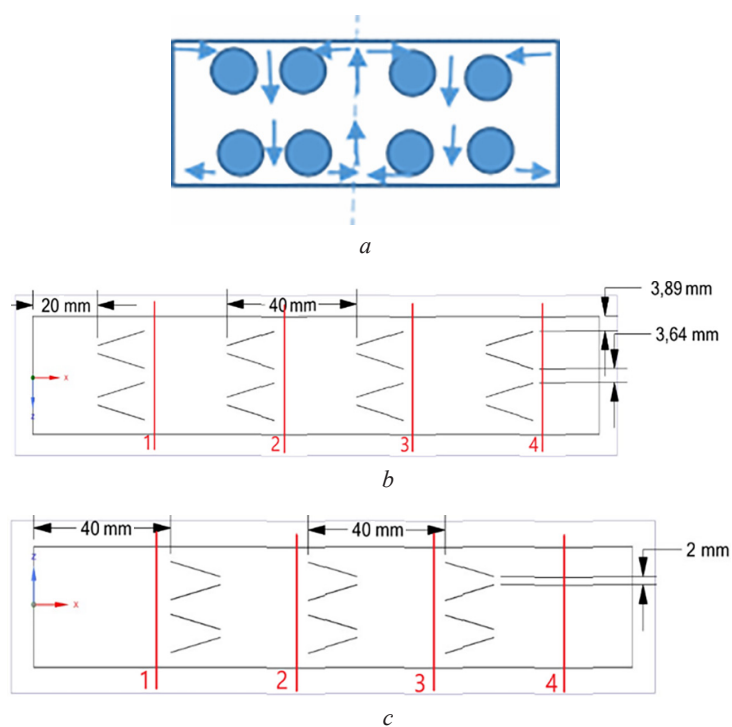


Рис. 1. Схема генерации вихревых пар в канале (*a*); расположение вихревых генераторов на нижней (*b*) и верхней (*c*) поверхностях канала

Fig. 1. Diagram of vortex pair generation in the channel (*a*); arrangement of vortex generators on lower (*b*) and upper (*c*) surfaces of the channel

Вихревой генератор был образован двумя тонкими пластинами с соотношением высоты ($h = 0,002$ м) к длине ($l = 0,015$ м), равным $h/l = 0,133$, установленными под углом атаки к потоку $\alpha = \pm 15^\circ$. Расстояние между передними кромками ВГ на нижней поверхности и задними кромками ВГ на верхней поверхности равнялось высоте пластины. Расстояние между кромками смежных ВГ составило $1,82h$.

Моделирование проводилось средствами верифицированного программного продукта Ansys Fluent¹. В качестве метода численного моделирования используется модель RANS, предполагающая совместное решение осредненных по Рейнольдсу уравнений переноса импульса и уравнения неразрывности [10]. Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений и описания турбулентности применялась стандартная SST (Shear-Stress Transport) $k-\omega$ модель турбулентности, учитывающая как процессы, происходящие непосредственно в пограничных слоях около стенок, так и особенности развития свободных течений.

Для построения расчетной области использовалась флагманская мозаичная технология Fluent Mosaic сеточного генератора Ansys Fluent Meshing, сочетающая в себе poly- и hex-элементы. Минимальный размер поверхностного элемента составляет $2,5 \cdot 10^{-4}$ м, коэффициент роста ячейки соответствует рекомендованному для данной модели турбулентности значению в 1,2 пункта. Итоговое количество конечно-объемных ячеек модели составило порядка 0,6 млн единиц.

На входе в расчетную область задавались постоянный расход и интенсивность турбулентности $Tu = 1\%$, на ее выходе – статическое давление (давление окружающей среды). На стенках канала и поверхностях генераторов ставились условия прилипания (равенство нулю скоростей). На нижней стенке канала поддерживалась равномерно распределенная постоянная температура. Температура вихревых генераторов принимала температуру стенки, на которой они установлены, и изменялась с изменением температуры воздушной среды в канале.

Результаты и их обсуждение. Расчеты выполнены при двух значениях расхода воздушного потока $Q = 0,0010044$ и $0,00209$ м³/с для канала с гладкими стенками и для канала с вихревыми генераторами соответственно. Рассмотрены два варианта расположения вихревых генераторов:

- 1) только на нижней нагреваемой поверхности;
- 2) на нижней и на верхней поверхностях.

Числа Рейнольдса, рассчитанные по средней скорости потока в канале и высоте ВГ, для этих расходов соответствовали значениям $Re_h = 1300$ и 2600 . Расчет поля скорости в канале с гладкими стенками показал, что форм-фактор потока на входе равен $H = 2,17$, а на выходе $H = 1,98$ при $Q = 0,0010044$ м³/с. При расходе $Q = 0,00209$ м³/с форм-фактор потока на входе в канал $H = 1,98$ снижался до значения $H = 1,80$ на выходе из него. Таким образом, у стенок канала имел место переходный режим течения от ламинарного к турбулентному.

Мониторинг полей температур в поперечном сечении канала осуществлялся по четырем сечениям на расстоянии от входа в канал: 0,0395 м (сечение 1), 0,0795 м (сечение 2), 0,1195 м (сечение 3) и 0,1595 м (сечение 4) (см. рис. 1, *b*, *c*). Продольные вихри усиливали перемешивание в канале. Каждая пара вихрей на нижней стенке канала создавала общий поток к ней. Этот поток нагревался на поверхности и поступал к боковым стенкам и к центру канала. Крайние пластины смежных ВГ в центре канала формировали восходящий нагретый поток (см. рис. 1, *a*).

Визуализация распределения температур представлена в сечениях 1–4 для двух расходов воздушного потока при расположении ВГ на нижней поверхности (рис. 2). Продольные вихри при своем формировании захватывали и удерживали воздушную массу при температуре ее входа в канал. Эта температура сохранялась до следующего ряда ВГ, где структуры, по-видимому, частично разрушались, а вновь формирующиеся вихри имели уже более высокую температуру (см. рис. 2, *b*). При увеличении расхода воздушного потока выравнивание температуры вихрей с окружающей средой ускорялось.

Каждая пара вихрей на нижней стенке индуцировала возникновение зеркально отраженных вихрей, которые располагались ближе к верхней стенке. Их взаимодействие создавало нисходящие потоки. Следует также принять во внимание, что продольные вихри, развиваясь у стенок канала, индуцировали противоположную завихренность в этой области. Таким образом, в канале возникали вихревые зоны, интенсифицирующие смешение потока. Температура воздушной среды, вовлекаемая в эти локальные зоны смешения, возрастала за каждым рядом ВГ. За третьим рядом ВГ разница температур между продольными вихрями и средой заметно снижалась, а за

¹ ANSYS Fluid Dynamics Verification Manual Release 14.0 ANSYS, Inc. August 2011 Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317 ANSYS, Inc. Is certified to ISO 9001:2008. URL: <http://www.ansys.com> (date of access: 20.02.2022).

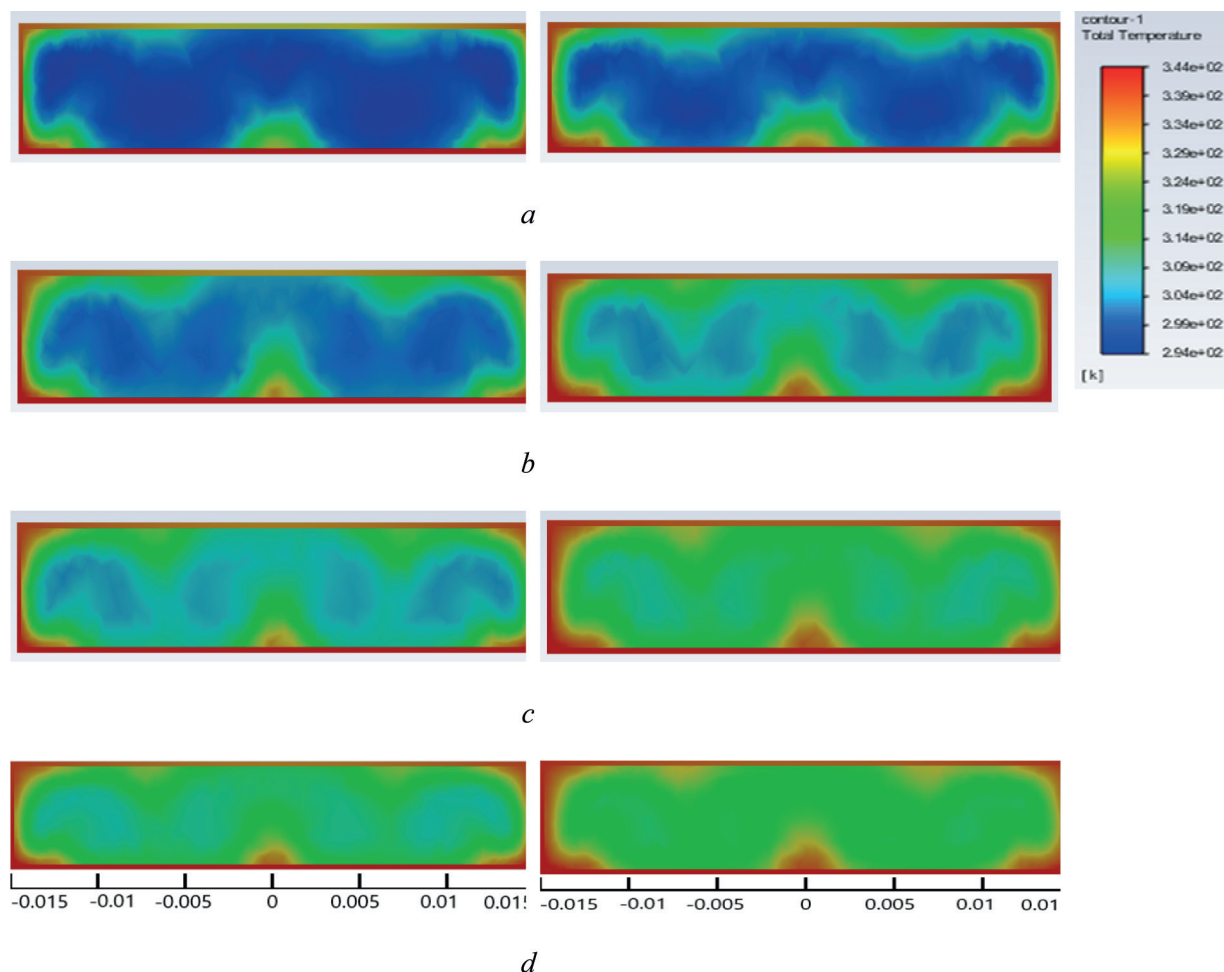


Рис. 2. Поле температур в канале с вихревыми генераторами на нижней поверхности: *a* – сечение 1; *b* – сечение 2; *c* – сечение 3; *d* – сечение 4. Левые изображения – $Q = 0,0010044 \text{ м}^3/\text{с}$; правые изображения – $Q = 0,00209 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 2. Temperature field in the channel with lower vortex generators: *a* – section 1; *b* – section 2; *c* – section 3; *d* – section 4. Left builders – $Q = 0.0010044 \text{ m}^3/\text{s}$; right builders – $Q = 0.00209 \text{ m}^3/\text{s}$

четвертым рядом температура в поперечном сечении канала становилась вполне однородной (см. рис. 2, *c, d*).

Количественные изменения температуры в канале у нижней поверхности, в его центре и у верхней поверхности представлены для двух расходов на рис. 3.

Вихревые генераторы направляли часть воздушного потока к нагретой стенке, и в области контакта температура была минимальной. Прогретая среда перетекала к боковым стенкам и в центр канала, где формировался нагретый поток от стенки между смежными вихревыми генераторами (см. рис. 3, *a*). За последующими рядами ВГ температура воздушного потока возрастала у поверхности и становилась более однородной, а локальный максимум в центре канала снижался.

В середине канала изменения температуры отражали взаимодействие вихревых структур меньшего масштаба (см. рис. 3, *b*). За первым рядом ВГ в центре канала формировался двугорбый профиль температуры в результате взаимодействия восходящего потока от нагретой стенки и нисходящего более холодного потока. Холодный поток создавался индуцированными вихрями, возникающими у верхней поверхности (см. рис. 2, *a*). За каждым последующим сечением на этой координате максимум температуры увеличивался, отражая усиление прогрева потока как у нижней, так и у верхней стенок. Локальные максимумы температур проявлялись на оси каждой пары ВГ расположенных на нижней стенке. Они вызваны потоками прогретой среды от верхней стенки, генерируемые виртуальными парами вихрей (см. рис. 2, *b–d*).

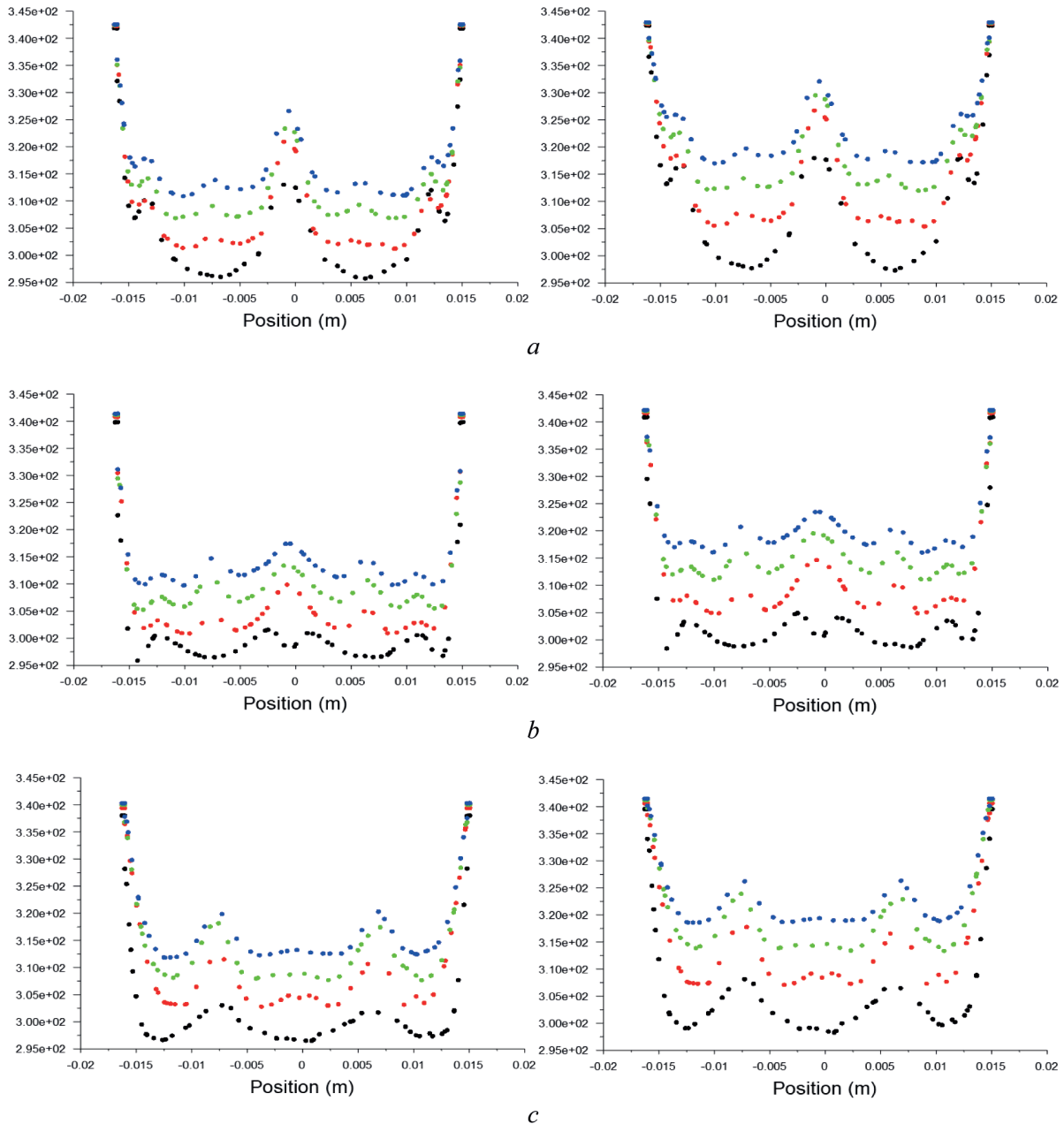


Рис. 3. Распределение температуры по поперечному сечению канала с вихревыми генераторами на нижней поверхности: *a* – у нижней поверхности; *b* – в середине канала; *c* – у верхней поверхности.

Обозначения: • сечение 1; • сечение 2; • сечение 3; • сечение 4.

Левая колонка – $Q = 0,0010044 \text{ м}^3/\text{с}$; правая колонка – $Q = 0,00209 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 3. Temperature distributions across the channel with vortex generators at the lower surface:

a – at a lower surface; *b* – in the channel center; *c* – at an upper surface.

Naming: • section 1; • section 2; • section 3; • section 4. Left column – $Q = 0.0010044 \text{ m}^3/\text{s}$; right column – $Q = 0.00209 \text{ m}^3/\text{s}$

Распределение температуры потока у верхней поверхности канала определялось взаимодействием вихрей, генерируемых в углах канала, с вихрями, индуцированными нижними ВГ (см. рис. 3, *c*). Это взаимодействие создавало нисходящие воздушные потоки, прогретые у стенки, на координатах осей нижних генераторов. Средняя температура потока на выходе из канала вполне однородна. Увеличение расхода воздушного потока ускоряло его прогрев и температуру на выходе.

Визуализация температуры по сечению канала при установке ВГ на нижней и верхней поверхностях выполнена в том же диапазоне шкалы температур, что и для предыдущего варианта

расположения ВГ. Формирующиеся вихревые структуры захватывали среду с более низкой температурой и сохраняли ее на всей длине канала. Диссипация вихревых структур заметно ускорялась с ростом расхода охлаждающего потока. Генерируемые верхними ВГ структуры оказались подобными виртуальным структурам, формирующимся под влиянием только нижних генераторов (рис. 4).

Генерация вихрей на верхней поверхности усиливала взаимодействие вихревых структур в поперечном сечении канала. Возникли продолжительные замкнутые вихревые области пониженной температуры, перекрывающие поперечное сечение канала и существующие на всей его длине. Их взаимодействие определяло неочевидный перенос тепла от нижней поверхности и стенок канала в воздушный поток и его распределение по сечению канала. Исходя из рис. 4, создается впечатление, что прогрев потока в канале ослабевает, однако представленные изменения температуры по контролируемым сечениям канала это опровергают (рис. 5).

Видно, что у нижней поверхности канала максимум температуры потока в центре канала, формируемый смежными генераторами, уменьшался за первым рядом ВГ из-за усиления встречного нисходящего потока от верхней стенки. Температура прогретого потока, создаваемого нижними ВГ, у стенок канала увеличивалась. Средняя температура по сечению канала возрастала в среднем на 2–4 К с каждым новым рядом генераторов по сравнению с этими распределениями, полученными в канале с ВГ только на нижней поверхности.

В центральной части канала температура воздушного потока чуть выше за первым рядом нижних генераторов. На оси канала в этом сечении отчетливо проявился минимум температуры. Это указывало на усиление влияния нисходящего потока от верхней поверхности канала, который фактически создавался сразу за передней кромкой верхних ВГ (рис. 5, *b*). Неоднородность температуры за вторым сечением сильно возрастала, что отражало интенсивное смешение внутри канала под воздействием продольных вихрей и генерируемых ими вторичных потоков. Эта неоднородность в поперечном сечении канала ослабевала за третьим рядом генераторов и суще-

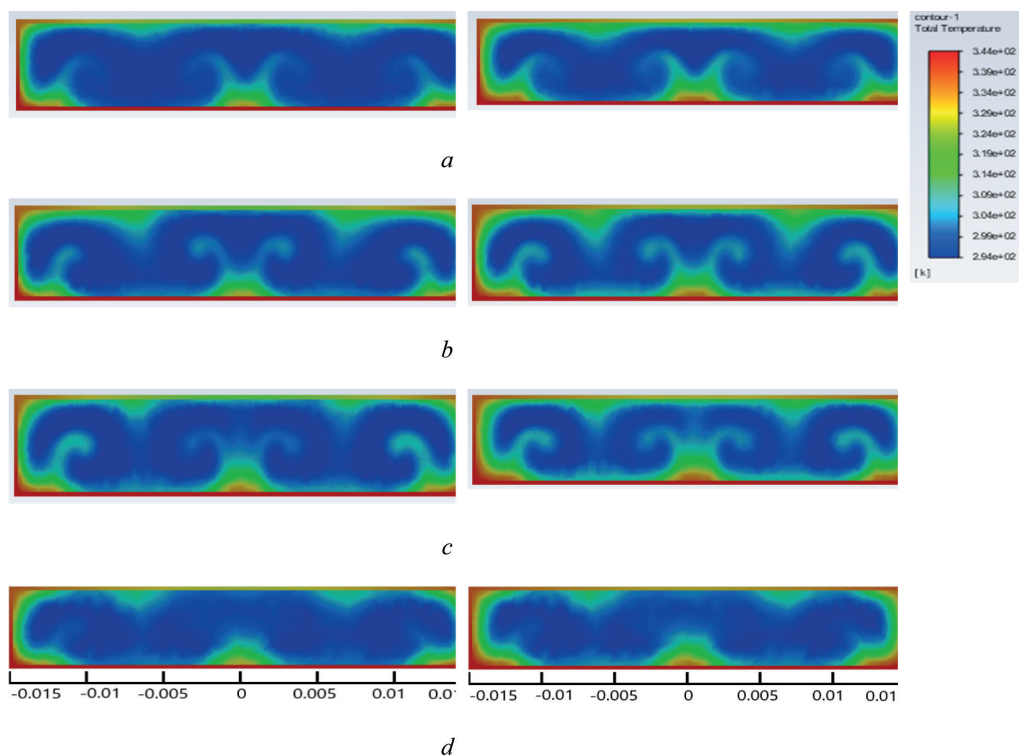


Рис. 4. Поле температур в канале с вихревыми генераторами на нижней и верхней поверхностях: *a* – сечение 1; *b* – сечение 2; *c* – сечение 3; *d* – сечение 4. Левые изображения – $Q = 0,0010044 \text{ м}^3/\text{с}$; правые изображения – $Q = 0,00209 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 4. Temperature distributions across the channel with vortex generators at the lower and upper surfaces: *a* – section 1; *b* – section 2; *c* – section 3; *d* – section 4. Left builders $Q = 0.0010044 \text{ m}^3/\text{s}$; right builders – $Q = 0.00209 \text{ m}^3/\text{s}$

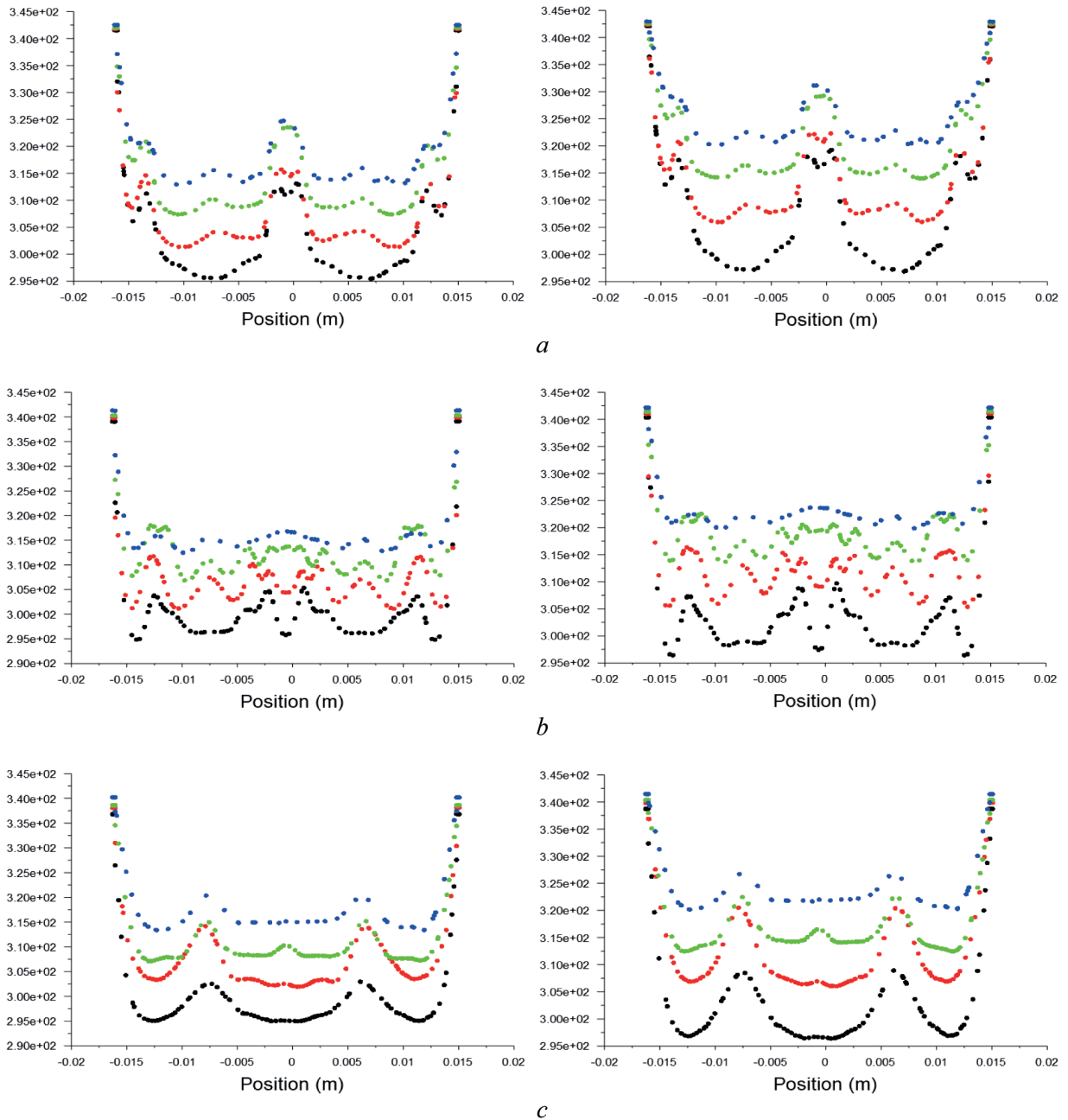


Рис. 5. Распределение температуры по поперечному сечению канала с вихревыми генераторами на нижней и верхней поверхностях: *a* – у нижней поверхности; *b* – в середине канала; *c* – у верхней поверхности. Обозначения: • сечение 1; • сечение 2; • сечение 3; • сечение 4. Левая колонка – $Q = 0,0010044 \text{ м}^3/\text{с}$; правая колонка – $Q = 0,00209 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 5. Temperature distributions across the channel with vortex generators at the lower and upper surfaces: *a* – at a lower surface; *b* – in the channel center; *c* – at an upper surface. Naming: • section 1; • section 2; • section 3; • section 4. Left column – $Q = 0.0010044 \text{ m}^3/\text{s}$; right column – $Q = 0.00209 \text{ m}^3/\text{s}$

ственно вырождалась за четвертым рядом. Температура на выходе из канала в среднем увеличилась на 5 К по сравнению с предыдущей геометрией канала (см. рис. 4, *a, b*).

Распределения температуры в воздушном потоке у верхней стенки становились более однородными и демонстрировали рост температуры. По всей видимости, перенос тепла от стенок к верхней поверхности заметно возрастал при увеличении интенсивности вихревых зон. Эта прогретая среда направлялась в середину канала на координатах осей нижних генераторов. Пара ВГ в центре канала, направляющая общий поток к верхней стенке, также способствовала повышению его температуры. Полный механизм переноса тепла сложно представить, и требуется более детальное изучение взаимодействия нижних и верхних пар продольных вихрей.

Изменения перепада давления, температуры и тепловой мощности воздушного потока в канале с гладкими стенками и с ВГ представлены в таблице.

Изменение параметров воздушного канала, вызванное установкой вихревых генераторов
Changing in air channel parameters caused by vortex generators

Конфигурация канала	Расход потока, м ³ /с	Перепад давления, Па	Перепад температуры, К	Снимаемая мощность, кВт
Канал с гладкими стенками	0,0010044	34,64	25,20	0,0284
	0,00209	95,76	18,68	0,044
Канал с ВГ на нижней поверхности	0,0010044	56,89	29,49	0,03334
	0,00209	163,53	23,00	0,054
Канал с ВГ на двух поверхностях	0,0010044	64,36	31,91	0,0361
	0,00209	180,50	24,76	0,0581

Проведенные исследования показали, что тепловая мощность, снимаемая воздушным потоком в канале с ВГ на нижней стенке, увеличивалась по сравнению с аналогичной мощностью, снимаемой в канале с гладкими стенками, на 17,4 и на 22,7 % при расходе 0,0010044 и 0,00209 м³/с соответственно. В канале с ВГ на обеих поверхностях тепловая мощность воздушного потока возрастала на 27,1 и 32,0 % соответственно с ростом расхода. Увеличение тепловой мощности, однако, сопровождалось существенным приростом перепада давления.

Заключение. Выполнены численные исследования теплообмена в воздушном канале методом RANS при температуре охлаждающего воздушного потока 293 К и двух значениях расхода: 0,00209 и 0,0010044 м³/с, при которых в канале с гладкими стенками реализовывался режим переходного течения от ламинарного к турбулентному. Подвод теплового потока выполнялся через нижнюю поверхность канала и обеспечивал равномерный ее прогрев до температуры 343 К. Интенсификация теплообмена осуществлялась вихревыми генераторами, установленными на нижней и верхней поверхностях канала.

Генераторы образованы двумя прямоугольными пластинами длиной 0,015 м и высотой 0,002 м расположенными по нормали к поверхности с углом атаки $\alpha = \pm 15^\circ$. Нижние ВГ создавали пару продольных вихрей, которые формировали общий поток к нагретой стенке, а вихри смежной пары у центра канала формировали поток от стенки. В свою очередь верхние ВГ создавали нисходящий общий поток от стенки, а их смежные продольные вихри формировали общий поток к стенке. Генерация этих дополнительных потоков обеспечивала усиление перемешивание воздушной среды в поперечном сечении канала. Выполнена визуализация распределения температуры в четырех сечениях канала по его длине. Показано, что вихревые структуры заполняют поперечное сечение канала и сохранялись на всей его длине, диссипируя тем быстрее, чем выше расход воздушного потока.

Тепловая мощность канала с ВГ, установленными на нижней поверхности, увеличилась на 17,4 и 22,7 %, а перепад давления – на 64 и 71 % соответственно при расходах 0,0010044 и 0,00209 м³/с. В канале с ВГ на нижней и верхней поверхностях тепловая мощность возросла на 27,1 и 32,0 %, а перепад давления – на 86 и 89 % соответственно для указанных расходов.

Рассмотренный метод интенсификации теплообмена в узком канале с помощью малоразмерных вихревых генераторов может найти практическое применение при проектировании малогабаритных теплообменников, когда нет существенных ограничений по перепаду давления. Изготовление таких теплообменников с использованием современных 3D адаптивных технологий экономит материальные и энергетические ресурсы.

Список использованных источников

1. Pearcy, H. H. Introduction to Shock-Induced separation and its prevention by design and boundary Layer control / H. H. Pearcy // Boundary Layer and Flow Control: Its Principle and Applications / ed. G. V. Lachmann. – Pergamon Press, 1961. – Vol. 2. – Part IV. – P. 1166–1344. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-1323-1.50021-X>
2. Pauley, W. R. Experimental study of the development of longitudinal vortex pairs embedded in a turbulent boundary layer / W. R. Pauley, J. K. Eaton // AIAA Journal. – 1988. – Vol. 26, № 7. – P. 816–823. <https://doi.org/10.2514/3.9974>

3. Mehta, R. D., Longitudinal vortices imbedded in turbulent boundary layers. Part 2. Vortex pair with 'common flow' upwards / R. D. Mehta, P. Bradshaw // *J. Fluid Mech.* – 1988. – Vol. 188. – P. 529–546. <https://doi.org/10.1017/S0022112088000837>
4. Jacobi, A. M. Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: A review of recent progress / A. M. Jacobi, R. K. Shah // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 1995. – Vol. 11, Iss. 3. – P. 295–309. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(95\)00066-U](https://doi.org/10.1016/0894-1777(95)00066-U)
5. Joardar, A. Heat transfer enhancement by winglet-type vortex generator arrays in compact plain-fin-and-tube heat exchangers / A. Joardar, A. Jacobi // *Int. J. Refrigeration.* – 2008. – Vol. 31, Iss. 1. – P. 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.04.011>
6. Hiravennavar, S. A note on the flow and heat transfer enhancement in a channel with built-in winglet pair / S. Hiravennavar, E. Tulapurkara, G. Biswas // *Int. J. Heat Fluid Flow.* – 2007. – Vol. 28, Iss. 2. – P. 299–305. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.03.030>
7. Experimental study of rectangular channel with modified rectangular longitudinal vortex generators / Chunhua Min [et al.] // *Int. J. Heat Mass Trans.* – 2010. – Vol. 53, Iss. 15–16. – P. 3023–3029. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.026>
8. KeWei Song. Interaction of counter rotating longitudinal vortices and the effect on fluid flow and heat transfer / KeWei Song, Song Liu, LiangBi Wang // *Int. J. Heat Mass Trans.* – 2016. – Vol. 93. – P. 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.001>
9. Nandana, V. Numerical study on the enhancement of heat transfer performance in a rectangular duct with new winglet shapes / V. Nandana, U. Janoske // *Therm. Sci. Eng. Progress.* – 2018. – Vol. 6. – P. 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.03.005>
10. Wilcox, D. C. *Turbulence modeling for CFD* / D. C. Wilcox. – La Canada, California: DCW Industries Inc., 1998. 537 p.

References

1. Pearcy H. H. Part IV. Introduction to Shock-Induced separation and its prevention by design and boundary Layer control. Lachmann G. V. (ed.). *Boundary Layer and Flow Control: Its Principle and Applications. Vol. 2.* Pergamon Press, 1961, pp. 1166–1344. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-1323-1.50021-X>
2. Pauley W. R., Eaton J. K. Experimental study of the development of longitudinal vortex pairs embedded in a turbulent boundary layer. *AIAA Journal*, 1988, vol. 26, no. 7, pp. 816–823. <https://doi.org/10.2514/3.9974>
3. Mehta R. D., Bradshaw P. Longitudinal vortices imbedded in turbulent boundary layers. Part 2. Vortex pair with 'common flow' upwards. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, vol. 188, pp. 529–546. <https://doi.org/10.1017/S0022112088000837>
4. Jacobi A. M., Shah R. K. Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: A review of recent progress. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1995, vol. 11, iss. 3, pp. 295–309. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(95\)00066-U](https://doi.org/10.1016/0894-1777(95)00066-U)
5. Joardar A., Jacobi A. Heat transfer enhancement by winglet-type vortex generator arrays in compact plain-fin-and-tube heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*, 2008, vol. 31, iss. 1, pp. 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.04.011>
6. Hiravennavar S., Tulapurkara E., Biswas G. A note on the flow and heat transfer enhancement in a channel with built-in winglet pair. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007, vol. 28, iss. 2, pp. 299–305. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.03.030>
7. Chunhua Min, Chengying Qi, Xiangfei Kong, Jiangfeng Dong. Experimental study of rectangular channel with modified rectangular longitudinal vortex generators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, iss. 15–16, pp. 3023–3029. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.026>
8. KeWei Song, Song Liu, LiangBi Wang. Interaction of counter rotating longitudinal vortices and the effect on fluid flow and heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 93, pp. 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.001>
9. Nandana V., Janoske U. Numerical study on the enhancement of heat transfer performance in a rectangular duct with new winglet shapes. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 6, pp. 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.03.005>
10. Wilcox D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada, California, DCW Industries Inc., 1998. 537 p.