

03

Валидация подходов к решению осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса и вихреразрешающих методов при исследовании аномальной интенсификации турбулентного отрывного течения на стабилизированном гидродинамическом участке структурированного канала с двухрядными наклонными канавками

© С.А. Исаев^{1,2}, А.Ю. Чулюнин³, М.С. Грицкевич¹, Е.А. Никущенко¹, Н.И. Михеев⁴, Н.С. Душин⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

³ Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия
E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступило в Редакцию 7 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2025 г.

Принято к публикации 4 декабря 2025 г.

Полученные с помощью решения осредненных уравнений Навье–Стокса и использования одного из вариантов метода отсоединенных вихрей численные прогнозы характеристик турбулентного отрывного течения в наклонных канавках в двухрядных плотных пакетах в структурированном канале на стабилизированном участке сопоставлены между собой и с результатами численного и физического моделирования в длинном оптически прозрачном канале с 26 канавками в каждом ряду. Их приемлемое согласие подтверждает ускорение потока в ядре структурированного канала с ростом максимальной скорости в 1.3 раза по сравнению со случаем плоскопараллельного канала.

Ключевые слова: поля скорости, структурированный канал, наклонные канавки, ускорение потока в ядре, RANS, IDDES.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.62517.20564

Эффект аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена (АИОТТ) в наклонных канавках численно установлен на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS) на стабилизированном участке структурированного узкого канала [1]. Он связан с экстраординарными перепадами статического давления во входной части канавки [2] и сопровождается многократным возрастанием относительных величин отрицательного трения и числа Нуссельта внутри отрывной области течения [3]. Выбор полуэмпирической SST-модели турбулентности для RANS-расчета интенсификации смерчеобразного течения в наклонных канавках на стабилизированном участке структурированного канала обоснован в [3], а ее валидация проведена при анализе связанного с АИОТТ эффекта ускорения потока в ядре длинного оптически прозрачного канала с двухрядными канавками под углами наклона $\pm 45^\circ$ при сопоставлении измеренных методом SIV и рассчитанных профилей продольной скорости [4]. Остается злободневным вопрос о применении для расчета турбулентного отрывного течения вихреразрешающих методов, подобных использованным в [5] для моделирования обтекания сферической лунки на стенке канала. В настоящей работе он

получил разрешение при рассмотрении периодического модуля в структурированном канале с двухрядными наклонными канавками — компьютерном аналоге элемента экспериментального стенда в КазНЦ РАН [4]. Следует отметить, что в перечне представленных в [6] современных подходов к моделированию турбулентных течений особое место занимает метод моделирования отсоединеных вихрей (DES). Здесь сопоставлены результаты расчетов с помощью RANS-SST и разновидности DES (IDDES) между собой для периодического модуля, а также с численными прогнозами и данными экспериментов на стабилизированном участке длинного канала с 26 канавками в каждом ряду [4].

Аналогично [3] рассматривается участок стабилизированного турбулентного воздушного течения и теплообмена в канале высотой H с двухрядными наклонными канавками, подобными представленным в [4]. На участке изотермической структурированной стенки, на боковых теплоизолированных, нижней и верхней изотермических стенках задаются условия прилипания, а на проточных входных и выходных границах — условия периодичности. Все линейные размеры отнесены к H . Расчетный периодический модуль канала имеет высоту 1, длину 5.06

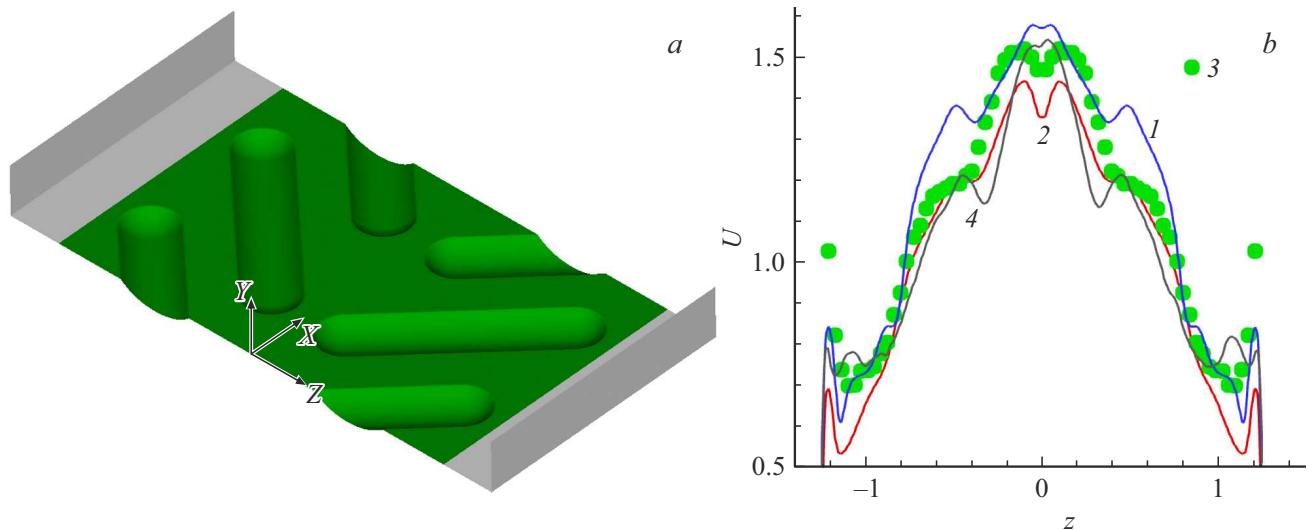


Рис. 1. Периодический модуль в узком структурированном канале с двухрядными наклонными канавками (а) и сравнение поперечных профилей продольной декартовой составляющей скорости $U(z)$ в срединном сечении модуля на высоте $y = 0.23$ от нижней стенки канала (б). 1 — расчеты RANS в периодическом модуле, 2 — расчеты RANS в длинном канале в центральном сечении 22-й канавки, 3 — эксперименты в КазНЦ РАН в длинном канале в центральном сечении 22-й канавки, 4 — расчеты IDDES в периодическом модуле.

и ширину 10. На нижней стенке располагаются два ряда канавок глубиной 0.25 с продольным шагом между центрами 2.53 (рис. 1, а). Верхняя стенка поддерживается при характерной температуре T , равной 1 (размерная величина 293 К). Канавки шириной 1 сочетают в себе два полусферических фрагмента, соединенных цилиндрической траншееей длиной 3.5, с наклоном $\pm 45^\circ$ по отношению к срединному сечению модуля. Радиус скругления кромки R варьируется от 0 до 0.1. Нижняя структурированная стенка нагревается до 303 К. Число Рейнольдса, определенное по характерной среднемассовой скорости потока U_0 и H , задается равным 4300 и соответствует эксперименту [4]. Декартова система координат x , y , z привязана к середине нижней стенки канала во входном сечении, а оси ориентируются вдоль канала, в вертикальном и поперечном направлениях. Декартовы составляющие скорости U , V , W отнесены к характерной скорости U_0 , энергия турбулентности K — к U_0^2 , а турбулентная вязкость — к $U_0 H$. На стенках задается условие прилипания. Число Нуссельта Nu определяется по градиенту температуры на стенке и перепаду между температурой стенки и среднемассовой температурой в соответствующем поперечном сечении канала. Число Нуссельта Nu_m проинтегрировано по контрольному участку стенки с канавками длиной 5.06 и шириной 8. Коэффициент гидравлических потерь ξ определяется по методике между входным и выходным сечениями периодического модуля [6]. Характеристики с индексом pl берутся в точках плоскопараллельного канала, соответствующих проекциям криволинейной структурированной стенки канала.

Как и в [3,4], численное моделирование турбулентного течения и теплообмена в периодическом

модуле канала с двухрядными канавками проводится на основе решения записанных для несжимаемой жидкости осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса и энергии [7]. Система уравнений замыкается с помощью модели переноса сдвиговых напряжений, которая модифицирована с учетом кривизны линий тока в рамках подхода Роди–Лещинера–Исаева [7]. Стационарные уравнения в линеаризованной форме решаются с использованием многоблочных вычислительных технологий и разномасштабных структурированных сеток с их частичным пересечением. Вводятся декартова сетка в периодической секции канала и криволинейная косоугольная сетка в пристеночном слое, согласованная с поверхностью канавки. Общее количество ячеек сетки варьируется от порядка 1 до 7 млн. Продольные и поперечные шаги сеток на структурированной стенке изменяются от 0.04 до 0.1. Пристеночные шаги задаются равными $(1\text{--}2.5) \cdot 10^{-4}$, причем размер $2.5 \cdot 10^{-4}$ соответствует $y^+ = 1$. Применяются процедуры коррекции градиента давления и среднемассовой температуры, реализованные в пакете VP2/3 (Velocity–Pressure, 2D/3D) [7].

Также для моделирования периодического турбулентного течения жидкости в модуле с $R = 0$ (рис. 1, а) используется вихреразрешающий подход Improved Delayed Detached Eddy Simulation (IDDES) [8]. Расчет пристеночного течения при этом осуществляется с помощью SST-модели турбулентности [9]. На входе и выходе из модуля задаются периодические граничные условия при сохранении массового расхода, а на стенах канала и поверхностях канавок — условие прилипания. Разбиение расчетной области на контрольные объемы выполнено с использованием ячеек гексагонального типа. Размер

ячейки в ядре потока составляет 0.0185, а в окрестности канавок — 0.00938. Для корректного описания течения вблизи твердых стенок применяется призматический слой ячеек, при этом высота первой ячейки выбрана так, чтобы безразмерный параметр $y^+ < 1$. Общий размер сеточной модели составляет около 10.4 млн элементов. При нестационарном решении задачи дискретизация по времени осуществляется с использованием неявной схемы второго порядка. Шаг по времени τ составляет 0.005, что обеспечивает выполнение условия по числу Куранта $Co < 1$. Для дискретизации конвективных членов используется гибридная центрально-разностная схема BCD с коэффициентом смешения 0.5. Для корректного сравнения с результатами RANS-расчета после достижения момента времени $t = 150$ инициируется процедура осреднения решения, которая продолжается до момента $t = 300$.

На рис. 1–3 представлены некоторые из полученных результатов. В табл. 1 обосновывается сеточная сходимость RANS-решений при $R = 0.02$ и 0.1 при сравнении результатов расчетов теплогидравлических характеристик Nu_m и ξ для сеток различной густоты. В табл. 2 сопоставляются экстремальные величины декартовых составляющих скорости U, V, W в периодическом модуле канала с двухрядными канавками, определенные

в рамках подходов RANS и IDDES. Представленные характеристики хорошо согласуются, причем наиболее близкими оказались коэффициенты гидравлических потерь. Следует отметить, что тепловая эффективность в структурированном канале на стабилизированном участке равна 2.85 при двукратном росте относительных гидравлических потерь ξ/ξ_{pl} . Величина U_{max} в ядре турбулентного потока в структурированном канале возрастает в 1.3 раза по сравнению со значением в плоскопараллельном канале, скорость возвратных токов приближается к 0.7, а скорости закрученных потоков в наклонных канавках превосходят 1. Максимальные скорости восходящих и нисходящих потоков внутри канавок приближаются к 0.6 и 0.4 соответственно. Таким образом, оба метода численного моделирования демонстрируют достижение в наклонной канавке ультравысоких скоростей возвратного и вторичного закрученного потока, характерного для АИОТТ.

Как видно из рис. 1, b, RANS-прогнозы поперечного профиля скорости $U(z)$ в центре 22-й канавки в длинном канале [4] хорошо согласуются с RANS-прогнозами $U(z)$ в центре периодического модуля и данными экспериментальных измерений, что свидетельствует о стабилизации потока на рассматриваемом участке канала. Полученные IDDES-результаты совпадают с приемлемой точностью с экспериментальными данными и RANS-прогнозами, хорошо отображая профиль $U(z)$ в центральной зоне канала и в окрестности стенок.

Сравнение рассчитанных методами RANS и IDDES профилей скорости $U(y)$ в трех характерных точках наклонной канавки на входном, срединном и выходном участках в периодическом модуле также показывает их удовлетворительное согласие. Оно демонстрирует перестройку профилей внутри канавки и ослабление интенсивности потока в ядре при приближении к боковой стенке (рис. 2, a). Во входной части наклонной канавки минимальная скорость возвратных токов снижается до -0.6 , а максимальная скорость потока в ядре достигает 1.47. Важно подчеркнуть, что на уровне стенки продольная составляющая скорости течения существенно превышает среднемассовую скорость и составляет 1.24, т.е. пристеночный слой над канавкой значительно утончается. Линии токов вторичного течения в центральном сечении модуля, нанесенные на поле скорости $U(z, y)$, показывают формирование спиралеобразных вихревых структур в центральной зоне канала (рис. 2, b).

Сравнение рассчитанных методами RANS и IDDES полей коэффициентов давления C_p на структурированной стенке стабилизированного участка канала демонстрирует их приемлемое согласие по максимальным и минимальным (отрицательным) величинам (рис. 3). Картинны растекания на рис. 3, a отображаются линиями тока в пристеночном слое на расстоянии $y = 0.00005$ от стенки, показывают формирование зон возвратных токов и экстраординарных перепадов

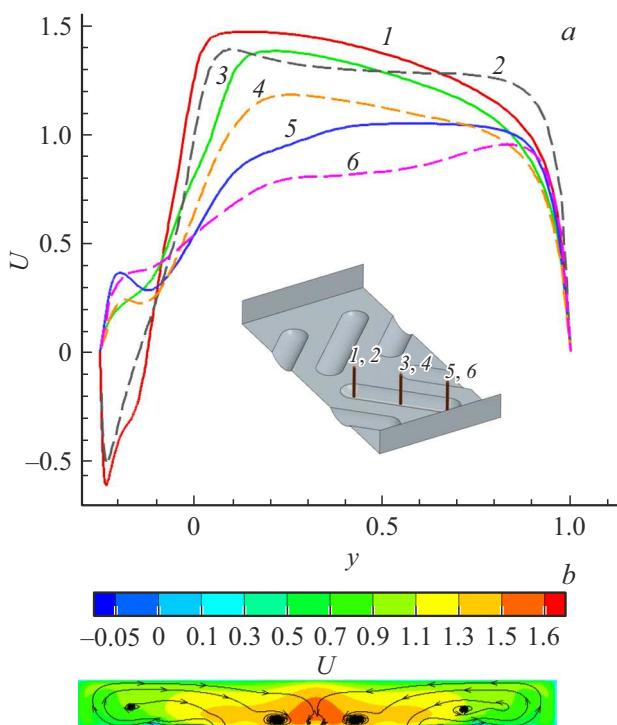


Рис. 2. Сравнение рассчитанных с помощью RANS (1, 3, 5) и IDDES (2, 4, 6) профилей $U(y)$ в центрах сечений перехода от концевых сферических сегментов к траншейной части, а также в центре наклонной канавки периодического модуля структурированного канала (a) и рассчитанное с помощью RANS поле $U(y, z)$ в срединном сечении модуля с нанесенными линиями тока вторичного течения (b).

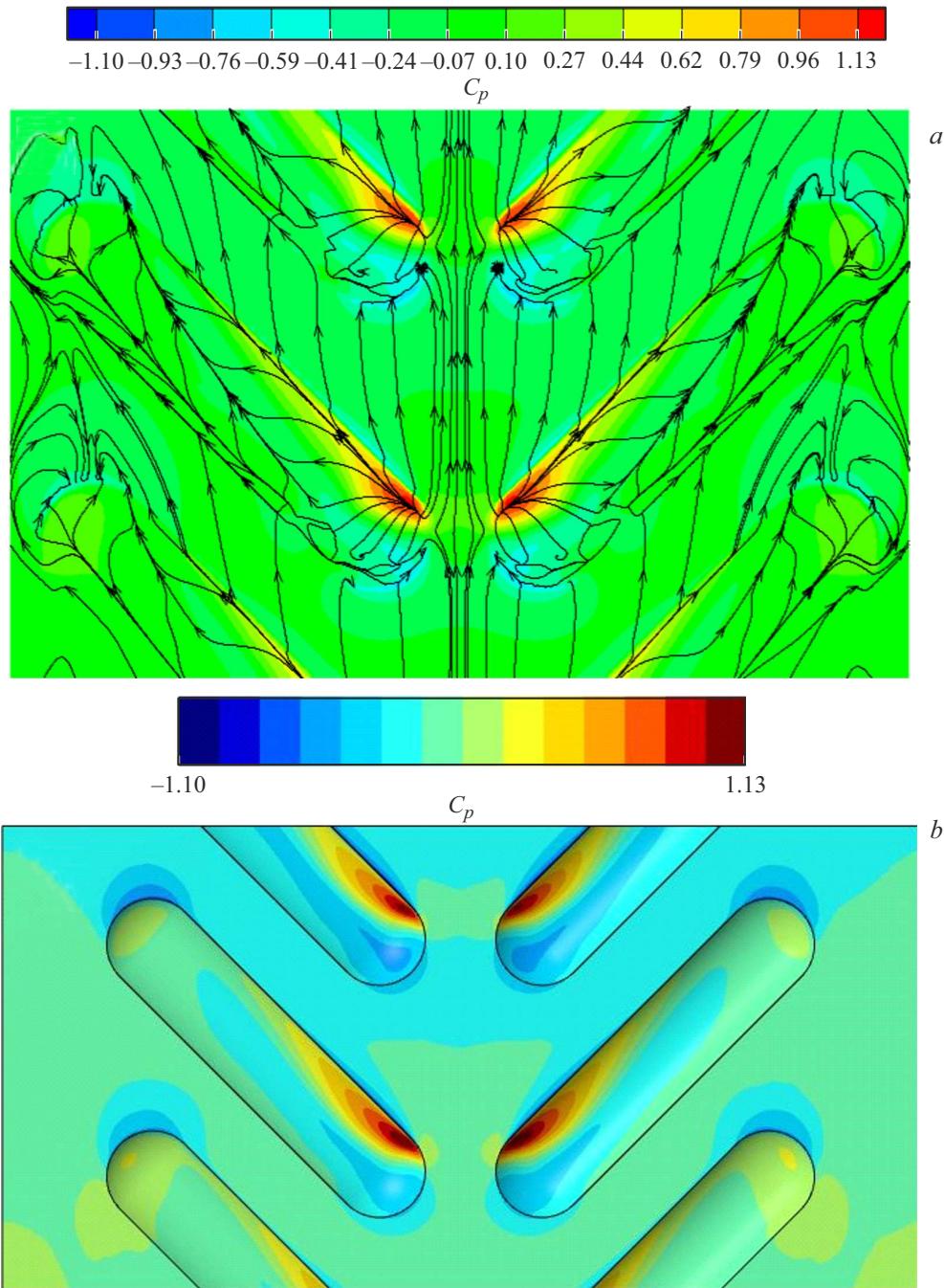


Рис. 3. Сравнение полей коэффициента давления на структурированной стенке периодического модуля канала, рассчитанных с помощью RANS с нанесенными картинами линий тока в пристеночном слое (а) и IDDES (б).

давления между зонами торможения на наветренных склонах канавок и разрежения в местах генерации смерчеобразных структур (с отрицательным избыточным давлением).

Приемлемое согласие результатов RANS-SST- и IDDES-расчетов между собой для периодического модуля и с данными экспериментов КазНЦ РАН на стабилизированном участке длинного канала с 26 наклонными канавками в двухрядном пакете на стенке подтверждает достоверность эффекта аномальной интенсификации от-

рывного течения в канавках и ускорения потока в ядре структурированного канала.

Финансирование работы

Исследования выполнены в рамках госзадания 075-03-2025-584 от 27.01.2025 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Таблица 1. Рассчитанные с помощью RANS теплогидравлические характеристики структурированных каналов при использовании сеток различной густоты

$N \cdot 10^{-6}$	R	Nu_m	ξ
1.08	0.1	34.3	0.0414
2.2	0.1	34.5	0.0424
6.6	0.02	37.4	0.0426
Фрагмент плоскопараллельного канала	—	13.1	0.0205

Таблица 2. Сравнение экстремальных характеристик отрывного течения в структурированном канале

Подход	U_{\max}	U_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	W_{\max}	W_{\min}
RANS	1.61	-0.701	0.563	-0.426	1.046	-1.046
IDDES	1.59	-0.645	0.622	-0.393	1.061	-1.056

Список литературы

- [1] S. Isaev, M. Gritkevich, A. Leontiev, I. Popov, Acta Astron., **163** (A), 202 (2019). DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.01.033
- [2] С.А. Исаев, С.В. Губернюк, Д.В. Никущенко, А.Г. Судаков, А.А. Синявин, Е.Б. Дубко, Письма в ЖТФ, **49** (15), 39 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.15.55863.19560 [S.A. Isaev, S.V. Guvernyuk, D.V. Nikushchenko, A.G. Sudakov, A.A. Sinyavin, E.B. Dubko, Tech. Phys. Lett., **49** (8), 33 (2023). DOI: 10.1011/TPL.2023.08.56684.19560].
- [3] S.A. Isaev, A.Yu. Chulyunin, D.V. Nikushchenko, A.G. Sudakov, A.E. Usachov, High Temp., **59** (1), 106 (2021). DOI: 10.1134/S0018151X21010041
- [4] S.A. Isaev, N.I. Mikheev, N.S. Dushin, A.E. Goltsman, D.V. Nikushchenko, A.G. Sudakov, J. Phys.: Conf. Ser., **2119**, 012016 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2119/1/012016
- [5] J. Turnow, R. Kasper, N. Kornev, Comp. Fluids, **172**, 720 (2018). DOI: 10.1016/j.compfluid.2018.01.014
- [6] А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, А.К. Травин, М.Л. Шур, *Современные подходы к моделированию турбулентности* (Изд-во Политехн. ун-та, СПб., 2016).
- [7] С.А. Исаев, П.А. Баранов, А.Е. Усачов, *Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэро-термодинамике* (LAP LAMBERT Academic Publ., Саарбрюкен, 2013).
- [8] M.L. Shur, P.R. Spalart, M.K. Strelets, A.K. Travin, Int. J. Heat Fluid Flow, **29**, 1638 (2008). DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001
- [9] F.R. Menter, M. Kuntz, in *The aerodynamics of heavy vehicles: trucks, buses, and trains*, ed. by R. McCallen, F. Browand, J. Ross. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics (Springer, Berlin–Heidelberg, 2004), vol. 19, p. 339–352. DOI: 10.1007/978-3-540-44419-0_30