

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕРЧЕВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ И ТЕПЛООБМЕНА В НАКЛОННЫХ УЕДИНЕННЫХ И ПАКЕТНЫХ КАНАВКАХ НА СТЕНКЕ КАНАЛА И ПЛАСТИНЕ В ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКАХ СТЕНДОВ НИИ МЕХАНИКИ МГУ, КАЗНЦ РАН И СПБПУ

С.А. Исаев^{1,2}, Д.В. Никущенко¹, Н.С. Душин³,
В.В. Сероштанов⁴, А.Ю. Чулюнин⁵, А.А. Ключ², Е.А. Осиюк²,
Е.А. Никущенко¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, dmitry@nikushchenko.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А.Новикова, Санкт-Петербург, isaeu3612@yandex.ru

³Казанский научный центр РАН, Казань, ndushin@bk.ru

⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, vladvik1992@gmail.com

⁵НИИ механики МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, chulyu-n@mail.ru

Валидационные тесты, в качестве которых рассматриваются имеющие экспериментальные аналоги задачи, служат для настройки и верификации математических моделей управляющих процессов, в частности, турбулентного переноса [1], а также оценки точности и эффективности разработанных программных кодов [2]. Недавно [3] предложены оригинальные валидационные тесты на основе исследования аномальной интенсификации отрывного течения в наклонных канавках на структурированных поверхностях пластины и стенки канала. Канавки представляют собой две половинки сферической лунки, соединенные длинной траншейной цилиндрической вставкой [4]. Во входных, ориентированных навстречу внешнему потоку, сферических сегментах формируются торнадоподобные структуры, которые развиваются в закрученные высокоинтенсивные течения в отрывных зонах внутри канавок и создают зоны отрицательного давления. Ультравысокие скорости возвратных токов и вторичного течения в канавках оказываются порядка характерной скорости внешнего потока, а подчас и превышают ее.

Как следствие, сгенерированные интенсивные вихревые потоки внутри канавок формируют зоны аномально высоких для отрывных течений градиентов параметров, характеризующиеся многократным превосходством абсолютных величин отрицательного трения и теплоотдачи по сравнению с величинами на плоских стенках.

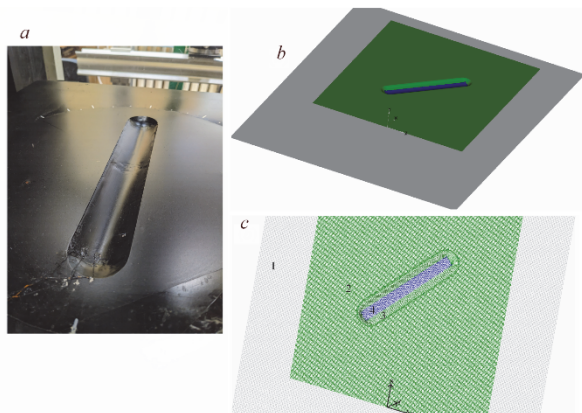


Рис. 1. Теплофизический стенд с нагретой пластиной и наклонной канавкой (а), цифровой двойник стенда (b) и многоблочная стенка с декартовой системой координат x, y, z (с). 1 – декартовая сетка для описания течения вдоль пластины; 2 – мелкомасштабная декартовая сетка в пристеночном слое нагретого участка пластины; 3 – криволинейная, согласованная с поверхностью канавки сетка О-типа; 4 – криволинейная сетка «заплатка» в центральной области канавки.

Установлена связь аномальной интенсификации отрывных течений и теплообмена в наклонных канавках с экстраординарными перепадами давления между областями торможения входящих в канавки потоков и разрежения в местах генерации торнадоподобных вихрей [5]. В данной работе рассматриваются тесты, касающиеся измерения давления в отрывном течении около единичной наклонной канавки на стенке канала и на пластине, интенсификации теплообмена в отрывной зоне во входной части наклонной канавки на изотермическом нагретом участке внутри теплоизолированной пластины и ускорения ламинарного и турбулентного воздушного потока в канале с двумя рядами наклонных канавок, расположенных по схеме $\backslash /$ и $/ \backslash$.

Эксперименты выполнены в аэродинамических трубах НИИ механики МГУ [3], на теплофизическом стенде СПбПУ Петра Великого с использованием градиентной теплотметрии (рис. 1, *a*) [6] и на аэродинамических стендах КазНЦ РАН, оснащенных измерителями скорости по методу SIV [4]. Расчеты проводятся с помощью разработанного на основе многоблочных вычислительных технологий кода VP2/3 (Velocity-Pressure, 2D/3D) [3-6].

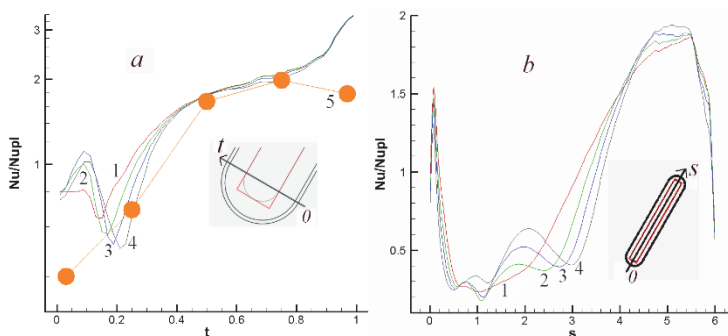


Рис. 2. Сравнение расчетных (1-4) и экспериментальных (5) распределений Nu/Nu_0 в поперечном входном сечении наклоненной под углом 45° канавки, проходящем через центр стыковки сферического сегмента и траншеи (*a*), в продольном срединном сечении канавки (*b*), полученных для различных гибридных схем. 1-4 – прогнозы, полученные с помощью пакета VP2/3; 1 – $R=0.5$; 2 – 0.7; 3 – 0.8; 4 – 0.9. 5 – данная работа.

В цифровом двойнике экспериментального стенда рассматривается конвективный теплообмен при стационарном турбулентном обтекании воздухом единичной канавки под углом наклона ϑ от 0 до 90° на нагретом участке пластины (показан целеным цветом на рис. 1, *b, c*). Нагретый изотермический участок вмонтирован в теплоизолированную пластину, на входе в которую задается равномерный поток. Степень турбулентности задается близкой к экспериментальной (1%), а масштаб турбулентности принимается порядка характерного размера обезразмеривания D . Относительный радиус скругления кромки равен 0.025. Число Прандтля Pr принимается равным 0.71.

Влияние коэффициента релаксации R в гибридной схеме аппроксимации конвективных членов уравнений количества движения на распределения Nu/Nu_0 в поперечном характерном и

продольном сечениях канавки рассматривается на рисунке 2, *a, b*, причем проводится сравнение с данными измерений с помощью ГДТП. Очевидно, что возрастание схемной диффузии с уменьшением R сглаживает распределения Nu/Nu_{pl} , незначительно влияет на максимальные относительные тепловые нагрузки. Коэффициент R в параметрическом исследовании выбирается равным 0.9. Достигнуто неплохое согласие рассчитанных распределений Nu/Nu_{pl} с экспериментальными данными, причем установлено двукратное увеличение относительной теплоотдачи на дне канавки в зоне формирования интенсивных возвратных токов.

Исследование поддержано РНФ 22-19-00056 (эксперимент) и 23-19-00083 (расчеты).

Литература

1. C.-J. Chen, S.-Y. Jaw. Fundamentals of turbulence modeling. - Taylor & Francis Ltd, 1998.
2. Yu. Deryugin, R. Zhuchko, D. Zelenskiy et al. Validation results for the LOGOS multifunction software package in solving problems of aerodynamics and gas dynamics for the lift-off and injection of launch vehicles. Mathematical Models and Computer Simulations, v. 7, no.2. 2015, pp. 144–153.
3. S.A. Isaev, A.G. Sudakov, D.V. Nikushchenko et al. Tests for validation problems of anomalous intensification of separation flow and heat transfer on structured surfaces with extraordinary pressure differences. Fluid Dynamics, v.58, no.5, 2023, pp. 894-905.
4. S.A. Isaev. Genesis of anomalous intensification of separation flow and heat transfer in inclined grooves on structured surfaces. Fluid Dynamics, v.57, no.5, 2022, pp. 558–570.
5. S.A. Isaev, S.V. Guvernyuk, D.V. Nikushchenko et al. Correlation between the abnormal enhancement of the separated flow and extraordinary pressure drops in the groove on the plate when the angle of inclination changes from 0 to 90°. Technical Physics Letters, v.49, no.8, 2023, pp. 33-36.
6. S.A. Isaev, S.Z. Sapozhnikov, D.V. Nikushchenko et al. Anomalous intensification of vortex heat transfer in the case of separated air flow over an inclined groove in a hot isothermal region of a flat plate. Fluid Dynamics, v.59, no.1, 2024, pp.45-59.