

**RANS РАСЧЕТЫ ИНТЕНСИВНЫХ ОТРЫВНЫХ И
СМЕРЧЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ НА
СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛАСТИНАХ И
СТЕНКАХ КАНАЛОВ В ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКАХ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДОВ ИНСТИТУТА
МЕХАНИКИ МГУ И КАЗНЦ РАН**

**С.А. Исаев^{1,2}, А.Г. Судаков², Д.В. Никущенко¹, А.Е. Усачов³,
А.Ю. Чулюнин⁴, Е.Б. Дубко²**

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, isaev3612@yandex.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, sudakov-1950@mail.ru

³Научно-исследовательский московский комплекс ЦАГИ, Москва, usachov_al@mail.ru

⁴НИИ механики МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, chulyu-n@mail.ru

Тестирование современных, в особенности, отечественных пакетных технологий на цифровых аналогах экспериментальных стендов РФ представляет актуальную задачу для обеспечения информационной безопасности. Мировую значимость такому тестированию придает выбор в качестве решаемых задач самоорганизующихся высокоинтенсивных отрывных и смерчевых пристеночных потоков около структурированных поверхностей с наклонными канавками на пластине и стенке узкого канала.

В [1, 2] открыто явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на энергоэффективных структурированных поверхностях и сопутствующее явление ускорения потока в ядре канала с многорядными наклонными канавками. В последние годы эти явления получили экспериментальное подтверждение [3–5]. Прежде всего, обоснованы экстраординарные перепады статического давления в наклонных канавках, которые предопределяют ультравысокие скорости возвратного и вторичного течения. Измерения поля скорости в узких каналах показали ускорение потоков в ядре канала в зонах над входами в наклонные канавки.

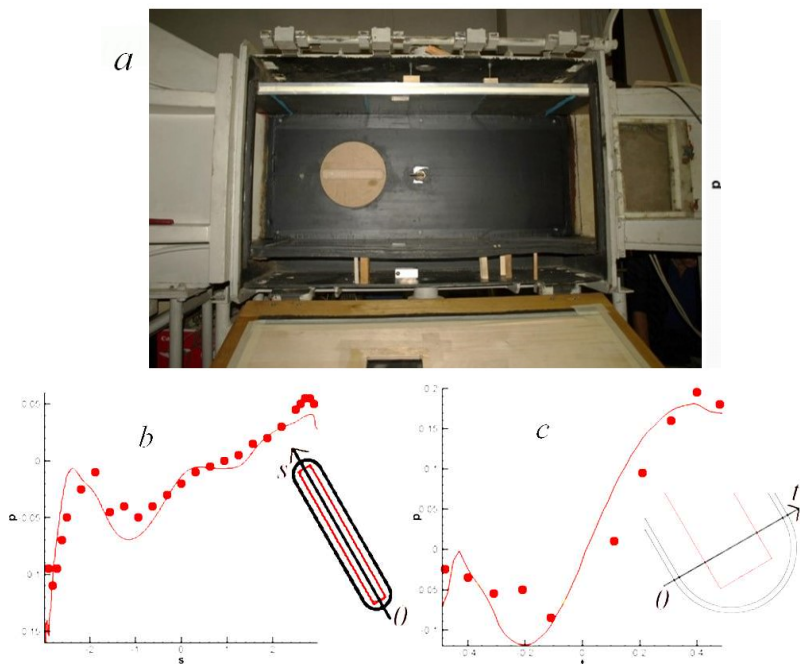


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки в НИИ механики МГУ с наклонной канавкой на пластине при варьировании углом наклона от 0 до 90° (а), сравнение расчетных (линии) и экспериментальных (точки) распределений статического давления в срединном продольном (b) и характерном поперечном (c) сечениях

Развитые экспериментальные базы данных позволяют развернуть систематические численные исследования по сравнительному анализу прогнозов, полученных на различных типах расчетных сеток, с использованием разноуровневых моделей турбулентности, разнообразных универсальных и университетских кодов. Особое значение имеет обоснование адекватности RANS-подхода для решения рассматриваемых задач с интенсивными отрывными течениями.

В данной работе представляются некоторые результаты проведенных исследований и обозначаются их желаемые перспективы.

Серия экспериментов проведена на аэродинамической трубе А4 НИИ механики МГУ, в рабочей части которой размещается

пластина с канавкой длиной 6, шириной 1 и глубиной 0.25 (рис. 1). Число Рейнольдса внешнего потока 67000, а толщина пограничного слоя в районе канавки – 0.16. Угол наклона варьируется от 0 до 90 градусов. Численные прогнозы турбулентного обтекания воздухом пластины с уединенной канавкой получены на основе применения пакета VP2/3. На рис. 2.3 установлено, что численные прогнозы вполне удовлетворительно качественно и количественно коррелируют с экспериментальными данными. Хорошо согласуются максимумы давления в зоне торможения внешнего потока на наветренном склоне во входной части канавки и в ее выходной области в продольном срединном сечении. Также хорошо улавливаются минимумы отрицательного давления в зоне разрежения, где начинает формироваться торнадоподобный вихрь (переходящий в закрученный поток).

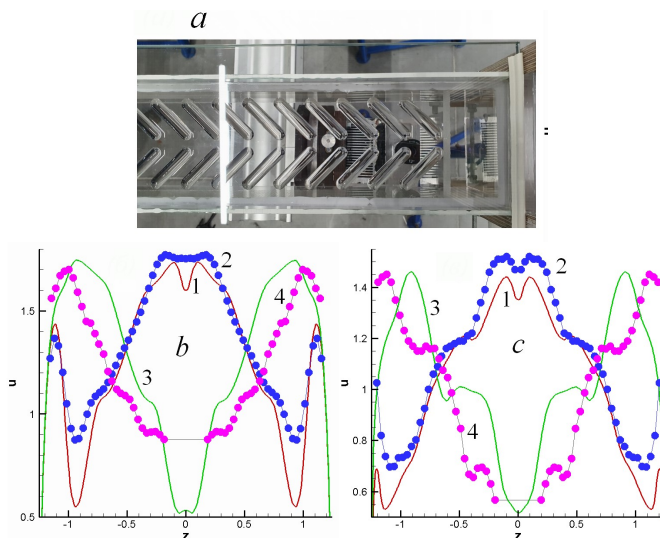


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки структурированного узкого канала с плотным расположением наклонных канавок (а) и сравнение расчетных (1,3) и экспериментальных (2,4) поперечных профилей продольной составляющей скорости $u(z)$ при ламинарном (b – $Re=10^3$) и турбулентном (c – $Re=4000$) режимах течения. 1,2 – $\varphi=\pm 45^\circ$; $y=0.4$; 3,4 – $(\pm 135^\circ)$; 0.23

Таким образом, получено численное и экспериментальное подтверждение управляющего механизма аномальной интенсификации отрывного течения теплообмена в наклонной канавке, выявлены углы наклона, при которых он успешно функционирует. Важно подчеркнуть, что существенно расширен диапазон чисел Рейнольдса внешнего потока, при котором наблюдается это интересное явление.

Эксперимент на установке в КазНЦ РАН нацелен на подтверждение явления ускорения в ядре потока с заметным превышением максимальной скорости по сравнению с максимумом скорости в плоскопараллельном канале с гладкими стенками (рис. 2). В оптически прозрачном канале (высота 10 мм, ширина 100 мм, длина 800 мм) с двухрядными 26-ю канавками на стенке при двух значениях числа Рейнольдса 1000 и 4300 выполнены измерения динамики векторных полей скорости потока и выполнено обобщение экспериментальных данных по структуре течения и турбулентности. Ширина канавок 10 мм выбрана в качестве характерного размера. Длина канавок 4,5, глубина 0,25, шаг между центрами 2,53 (плотное расположение), рассмотрены два ∇ и \wedge пакета канавок под углами $\pm 45^\circ$ и $\pm 135^\circ$. Установлено, что в формирующемся в конце облуненном канале над входом в лунки имеет место выраженная область повышенной скорости на координате y порядка 10-15% высоты канал. Для сравнения экспериментальных данных по продольной скорости с результатами численного моделирования проведены расчеты ламинарного ($Re=1000$) и турбулентного ($Re=4000$) течения в узком канале с однорядными 26-ю канавками, близкими по геометрии к экспериментальным аналогам. Таким образом, на продольной полосе канала над однорядным ансамблем лунок формируется сдвиговое течение с максимумом скорости над входом в лунки. Этот максимум превышает максимум скорости в плоскопараллельном канале и таким образом подтверждает обнаруженное численно явление ускорения потока в облуненном канале.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ по проектам N.N. 18-01-00210 и 21-58-52013.

Литература

1. S.A. Isaev, M.S. Gritckevich, A.I. Leontiev, O.O. Milman, D.V. Nikushchenko. NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples. *Int. J. Heat Mass Transf.*, v. 145, no. 18737, 2019, pp. 1–13.
2. S.A. Isaev, A.Yu. Chulyunin, D.V. Nikushchenko, A.G. Sudakov, A.E. Usachov. Analysis of the anomalous intensification of a separate flow and heat transfer in a stabilized section of a narrow channel with single-row, inclined, oval-trench dimples with the use of various grids and turbulence models. *High Temp.*, v. 59, no. 1, 2021, pp. 106–114.
3. S.A. Isaev, S.V. Guvernuyuk, N.I. Mikheev, I.A. Popov, D.V. Nikushchenko. Numerical and experimental study of abnormal enhancement of separated turbulent flow and heat transfer in inclined oval-trench dimples on the plate and on the narrow channel wall. *J. Phys. Conf. Series*, v. 2039, no. 012009, 2021.
4. М.А. Зубин, А.Ф. Зубков. Структура отрывного обтекания цилиндрической каверны на стенке плоского канала. *Механика жидкости и газа*, №1, 2022, с.81–89.
5. S.A. Isaev, I.A. Popov, N.I. Mikheev, S.V. Guvernuyuk, M.A. Zubin, D.V. Nikushchenko, A.G. Sudakov. Vortex heat transfer enhancement in the separated flow near structured dimpled surfaces. *J. Phys. Conf. Series*, v. 2057, no. 012002, 2021.