

УДК 532.517:4

## ТЕСТЫ ДЛЯ ВАЛИДАЦИОННЫХ ЗАДАЧ АНОМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ЭКСТРАОРДИНАРНЫМИ ПЕРЕПАДАМИ ДАВЛЕНИЯ

© 2023 г. С. А. Исаев<sup>a,b,\*</sup>, А. Г. Судаков<sup>b</sup>, Д. В. Никущенко<sup>a</sup>, А. Е. Усачов<sup>c</sup>,  
М. А. Зубин<sup>d</sup>, А. А. Синявин<sup>d</sup>, А. Ю. Чулюнин<sup>d</sup>, Е. Б. Дубко<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>b</sup>Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации  
А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>c</sup>Московский комплекс ЦАГИ, Москва, Россия

<sup>d</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики,  
Москва, Россия

\*E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.05.2023 г.

После доработки 06.06.2023 г.

Принята к публикации 06.06.2023 г.

Представляются новые тесты для пакетов прикладных программ и моделей турбулентности для валидационных задач высокоинтенсивных вихревых течений около структурированных энергоэффективных поверхностей. Идея тестирования основывается на открытии аномальной интенсификации отрывных течений и теплообмена в наклонных канавках на пластинах и стенках каналов. В канавках за счет экстраординарных перепадов давления, подтвержденных экспериментами, генерируются закрученные потоки с высокими скоростями возвратного и вторичного течения, сопоставимыми со скоростью внешнего потока. Также внутри канавок формируются высокоградиентные зоны с трением и теплоотдачей, многократно (от 1.5–2 до 7–9 раз) превосходящих трение и теплоотдачу на плоской стенке. В качестве примера проходит тестирование пакет VP2/3, разработанный на основе оригинальных многоблочных вычислительных технологий и использующий разномасштабные пересекающиеся сетки. Сравнение численных прогнозов с экспериментами М.А. Зубина подтвердило высокие перепады статического давления между зоной торможения на наветренном склоне наклонной канавки и областью отрицательного давления в месте генерации торнадоподобного потока на входном сферическом сегменте, а также продемонстрировало приемлемость RANS-подхода для прогнозирования характеристик высокоинтенсивных закрученных потоков.

**Ключевые слова:** аномальная интенсификация, вихревая динамика, теплообмен, наклонные канавки, пластина, узкий канал, многоблочные вычислительные технологии, пакет VP2/3

**DOI:** 10.31857/S1024708423600379, **EDN:** GAKZLQ

Тестирование современных, в особенности, отечественных пакетов прикладных программ при численном моделировании аэрогидродинамических и теплообменных процессов на цифровых аналогах экспериментальных стендов представляется актуальным для оценки их точности, эффективности, адекватности прогнозов, а также для валидации инкорпорированных в них математических моделей (см., например, [1]). В качестве решаемых тестовых задач гидромеханики и теплотехники оказывается целесообразным выбрать самоорганизующиеся высокоинтенсивные отрывные и смерчевые пристеночные потоки, развивающиеся вблизи энергоэффективных структурированных поверхностей [2].

В однорядных наклонных канавках на нагретой стенке узкого канала в случае редких [3] и плотных [4] пакетов канавок численно открыто явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена и сопутствующее явление ускорения потока в ядре канала с одно- и двухрядными наклонными канавками. Рассматриваемые канавки образуются из двух половинок

сферических лунок, соединенных траншейной цилиндрической вставкой. Явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена подверглось систематическому анализу на стабилизированном гидродинамическом участке структурированного канала [5–10]. Затем были проведены исследования теплообмена при обтекании плоских пластин с многорядными канавками [11–13]. Установленные ультравысокие скорости возвратного и вторичного течения в канавках, доходящие, а подчас и превосходящие максимальную скорость в плоскопараллельном канале, обуславливаются экстраординарными перепадами давления между зонами торможения струйного входящего в канавку потока на наветренном склоне и разрежения в месте генерации смерчеобразного вихря на входном сферическом сегменте. Внутри канавок образуются области аномально высоких поверхностных градиентов течения и теплообмена, в которых многократно (до 6–9 раз) увеличиваются абсолютные величины относительного трения и тепловых потоков по сравнению с параметрами на плоской стенке. Следует отметить, что над входом в наклонную канавку образуется зона высоких скоростей пристенного потока, которые в случае узкого канала с однорядными канавками превышают максимальную скорость для плоскопараллельного канала в 1.5 и более раз.

Установлено, что угол наклона канавки  $\theta$  по отношению к набегающему потоку играет кардинально важную роль в явлении аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена, а также ускорения пристенного потока над структурированной стенкой. Диапазон углов наклона канавки  $\theta$  на стенке узкого канала, при которых реализуются значительные экстремальные скорости возвратного и вторичного течений, составляет от  $30$  до  $75^\circ$ . Установленные явления характерны также для начального участка течения около пластины и стенки канала с одно- и многорядными наклонными канавками, причем наблюдается мультипликативный эффект усиления интенсивности пристенного и отрывного течений, а также теплообмена в канавке по мере ее удаления от начала структурированного участка.

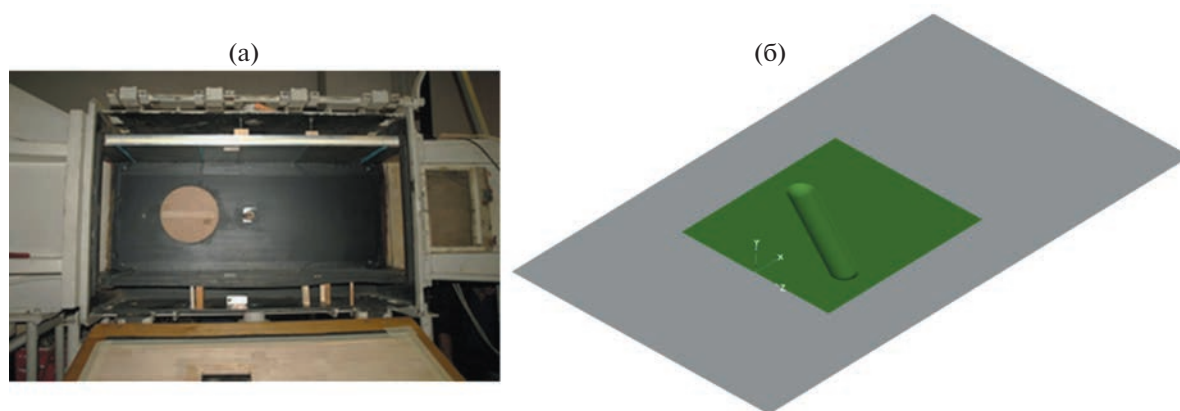
Экспериментальное подтверждение установленных численно явлений получено в Институте механики МГУ и в КазНЦ РАН, где на стендах измерялись перепады статического давления в единичных канавках на пластине при варьировании угла наклона канавок  $\theta$  от  $0$  до  $90^\circ$  для чисел Рейнольдса набегающего потока  $6.7 \times 10^4$  и  $1.65 \times 10^5$ , а также поля скорости ламинарного и турбулентного течений воздуха в узких каналах с двухрядными канавками под углами наклона  $\pm 45^\circ$  и  $\pm 135^\circ$  [14–18]. 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, в частности, VP2/3 (скорость-давление, 2D/3D). Особое значение имеет обоснование адекватности RANS-подхода для решения рассматриваемых задач с интенсивными отрывными течениями и теплообменом.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Серия экспериментов, представленная в [12, 14–17], 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. 1а). Ширина канавки  $D$  выбрана в качестве характерного масштаба, к которому отнесены все линейные размеры. Число Рейнольдса внешнего потока  $6.7 \times 10^4$ , а толщина пограничного слоя в районе канавки – 0.17. Угол наклона варьируется от  $0$  до  $90^\circ$ . В расчетной модели радиус скругления кромки канавки принят равным 0.02.

Также рассматривается обтекание единичной наклонной канавки на стенке плоскопараллельного канала. На экспериментальном стенде Института механики МГУ [18] шириной 0.2 м, высотой 0.05 м и длиной 0.6 м проведены измерения распределений статического давления на поверхности лунки шириной 0.03 м и относительными длиной 5, глубиной 0.25 (в долях ширины) под различными углами наклона  $\theta$  в диапазоне изменения от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Лунки с острой кромкой располагаются в середине канала на расстоянии 0.3 м от входного сечения. Число Рейнольдса, определенное по скорости потока и высоте канала, составляет  $1.65 \times 10^5$ . Толщина пограничного слоя на входе в рабочий участок канала имеет величину порядка 0.1 в долях высоты канала.

В качестве цифрового аналога пластины рассматривается прямоугольный участок плоской стенки длиной 22 и шириной 12.3 (рис. 1б). Центр канавки располагается на расстоянии 9.5 от входного сечения, в котором формируется равномерный поток, переходящий вблизи стенки в развивающийся пограничный слой с заданной толщиной 0.17 в районе канавки. Декартовы составляющие скорости  $u$ ,  $v$ ,  $w$  и давление  $p$  определяются по характерной скорости, в качестве которой выбирается скорость равномерного потока на входе в область. Характеристики турбулент-



**Рис. 1.** Пластина с наклонной канавкой в рабочей части аэродинамической трубы А4 (а) и ее цифровой аналог с декартовой системой координат  $x, y, z$  и многоблочные сетки (б).

ности во входном сечении определяются как в [14, 19]. На боковых границах ставятся условия симметрии. На выходной границе задаются условия продолжения решения.

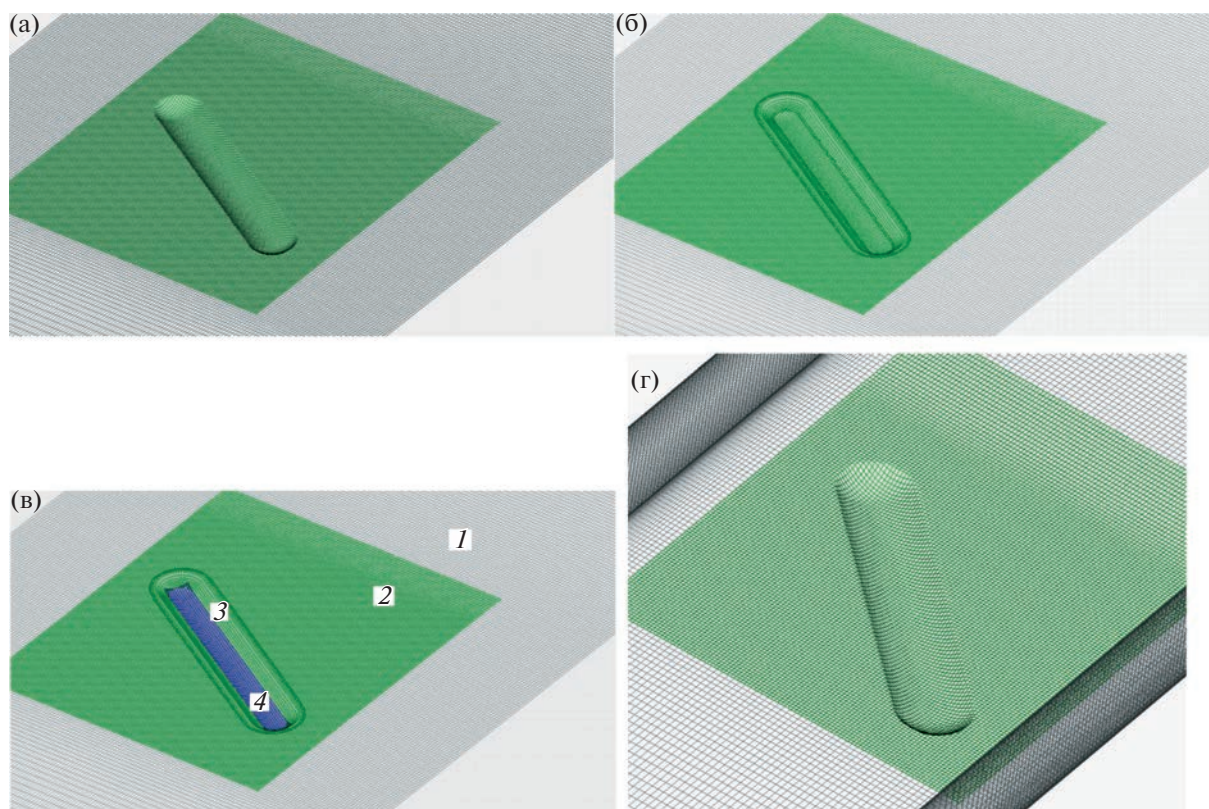
На входе в область воздушный поток изотермический с температурой  $T_{ref} = 293$  К. Нижняя омываемая стенка канала с канавкой нагревается, причем подводимый постоянный тепловой поток  $q$  пересчитывается в безразмерный вид по формуле:

$$q_{norm} = qD/(\lambda Pr Re T_{ref}),$$

а его величина принимается  $\sim 3.4 \times 10^{-5}$ . Здесь  $\lambda$  — теплопроводность воздуха. На боковых границах расчетной области для температуры  $T$  ставятся условия симметрии, верхняя граница изотермическая с температурой  $T_{ref}$ , принятой в качестве масштаба обезразмеривания. На выходе из расчетной области температура  $T$  подчиняется мягким граничным условиям.

Низкоскоростное стационарное турбулентное течение воздуха около пластины с наклонной канавкой описывается стационарными осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье—Стокса (RANS) для вязкой несжимаемой жидкости [19], которые замыкаются уравнениями модифицированной модели переноса сдвиговых напряжений (MSST). В отличие от предложенных Ф. Менгером стандартных моделей MSST 1993 [20] и MSST 2003 г. [21] в последнюю модель вводится поправка на кривизну линий тока. Корректируется поле вихревой вязкости:  $\mu_t = \mu_{t0}/(1 + C_c Ri_t)$ . Здесь  $\mu_{t0}$  — рассчитанная по стандартной модели вихревая вязкость [21],  $C_c$  — дополнительная полуэмпирическая константа, равная 0.02, определенная из условия наилучшего согласования численных прогнозов с имеющимися и специально полученными данными для ряда калибровочных экспериментов [19],  $Ri_t$  — турбулентное число Ричардсона. Как подтверждено многочисленными тестами (см., например, [22]), применение стандартной SST-модели 2003 г. [21] приводит к ложной накачке вихревой вязкости в ядра крупномасштабных вихрей и к чрезмерному уровню вихревой вязкости в целом. Описанный обобщенный подход Роди—Лещинера—Исаева (RLI) [22] позволяет избежать нефизической накачки вихревой вязкости. Поправка на кривизну линий тока в рамках подхода RLI введена в пакеты VP2/3 (Velocity-Pressure, 2D/3D) и sigma-flow [23].

Методология решения стационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса базируется на концепции расщепления по физическим процессам и реализуется в процедуре коррекции давления SIMPLEC [19, 24, 25], приспособленной для моделирования конвективного теплообмена на многоблочных структурированных сетках с их частичным перекрытием. Развиваемая методология распараллеливается применительно к кластерным (многоядерным и многопроцессорным) системам и обобщается на случай неструктурированных сеток. В отличие от [24], в [19] обобщенное дифференциальное уравнение переноса линеаризуется и записывается в приращениях зависимых переменных. В правой (явной) части этого уравнения конвективные члены дискретизируются по схеме второго порядка аппроксимации (противопоточная схема с квадратичной интерполяцией Леонарда [26] для уравнения количества движения и энергии, а также схема TVD [27] для уравнений характеристик турбулентности), а диффузионные члены — по центрально-разностной схеме [19]. Конвективные члены относительно приращений зависимых пе-



**Рис. 2.** Многоблочные расчетные сетки В (а), ВК (б) и ВЕ (в) с двумя, тремя и четырьмя фрагментарными сетками на пластине: 1 – MG; 2 – MR; 3 – Ring; 4 – Rec, а также многоблочная сетка на стенках канала В (г) со снятой верхней стенкой.

ременных в левой (неявной) части обобщенного уравнения представляются с помощью противопоточной схемы с односторонними разностями [19]. Использование центрированных сеток с размещением зависимых переменных в центрах расчетных ячеек приводит к необходимости монотонизации поля давления за счет введения коррекции Рхи-Чоу [28, 29]. Алгебраические уравнения решаются предобусловленным методом BiCGSTAB [30] с алгебраическим многосеточным ускорителем из библиотеки Демидова (AMGCL) [31] для поправки давления и ILU0 для остальных переменных. В разработанном пакете VP2/3 (Velocity-Pressure, 2D/3D) применены многоблочные вычислительные технологии (MBT), описанные в [19]. Они базируются на совокупности разномасштабных, ярусных и пересекающихся структурированных сеток, согласованных со структурными элементами физической задачи соответствующих масштабов. В двух рядах приграничных ячеек каждой из пересекающихся или накладываемых сеток параметры определяют с помощью линейной интерполяции [19].

Расчетная область строится на прямоугольном участке пластины и имеет вертикальный размер 7.3. Область пристенного потока отображается на внешней декартовой сетке MG, сгущающейся к стенке. Внутри области выделяется прилегающая к стенке прямоугольная зона в окрестности канавки протяженностью 8, шириной 7 и высотой 0.5. В ней строится косоугольная сетка MR, согласованная с криволинейной поверхностью канавки. В ее окрестности для базового варианта ячейки сеток MG и MR задаются с шагом 0.07 и 0.05 в продольном и поперечном направлениях (рис. 2). В направлении входной, выходной и боковых границ размеры ячеек сетки MG увеличиваются. Размер пристеночного шага сеток равен  $10^{-5}$ . В многоблочной сетке В, состоящей из двух фрагментарных пересекающихся сеток MG и MR, содержится примерно 5.6 млн. ячеек.

Для более точного воспроизводства высокоградиентного течения в окрестности кромок канавки строится многоблочная сетка ВК, включающая в сеточный ансамбль разномасштабных пересекающихся сеток, помимо сеток MG и MR, кромочную косоугольную сетку Ring. В сетке

Ring расчетные ячейки сгущаются на скругленных кромках. Общее количество ячеек сетки ВК порядка 6 млн.

Также рассматривается многоблочная сетка ВЕ, состоящая из четырех фрагментарных сеток. В их число входят внешняя и внутренняя прямоугольные сетки МG и MR, отображающие внешний пристеночный поток и течение в окрестности канавки. В отличие от многоблочных сеток В и ВК, расчетная сетка MR декартова и служит для детализации течения над канавкой и в следе за ней. Криволинейные эллиптические сетки Ring и Res вводятся для отображения пространственного течения внутри канавки. Ring является сеткой О-типа, а Res выступает в качестве заплатки в центральной зоне (рис. 2в).

Общее количество ячеек в ВЕ порядка 5.85 млн. Следует отметить, что рассмотренные сетки близки по суммарному количеству расчетных ячеек. Для обоснования сеточной сходимости проводятся расчеты на многоблочной сетке ВЕ1 с уменьшенным числом ячеек. Сетка ВЕ1 содержит порядка 4.5 млн. ячеек (увеличены шаги в сетках МG и MR — до 0.08 и 0.06).

Цифровой аналог экспериментального канала [18] имеет размеры  $15.2 \times 1 \times 6$  (высота канала в этой задаче выбрана в качестве характерного размера — масштаба обезразмеривания). На входе в канал задается равномерный поток с пограничным слоем толщиной, равной экспериментальному значению 0.07. Тестирование численного метода и выбранной модели турбулентности проведено на овально-траншейной лунке шириной  $b = 0.6$ , удлинением  $5b$ , глубиной  $0.25b$  при скруглении острых кромок по радиусу  $0.025b$ . Центр лунки располагается на расстоянии 4.6 от входного сечения. Рассматривается блочная расчетная сетка, состоящая из двух фрагментарных сеток (рис. 2г). Первая декартова сетка строится в плоскопараллельном канале. Она содержит порядка 3.5 млн. ячеек, сгущающихся при приближении к стенкам. В центральной части канала шаги сетки равномерные в продольном и поперечном направлениях и равны 0.05. Внутри канальной сетки располагается криволинейная, согласованная с поверхностью лунки на нагретой нижней стенке канала фрагментарная сетка, охватывающая область лунки. Указанная область имеет размеры  $3.2 \times 0.2 \times 3.2$ , в центре которой располагается центр лунки. В продольном и поперечном направлениях сетка равномерная с шагом 0.03. Количество ячеек в прилегающей к лунке криволинейной сетке составляет порядка 0.64 млн. Пристеночные шаги рассматриваемых сеток у стенок равны  $10^{-5}$ .

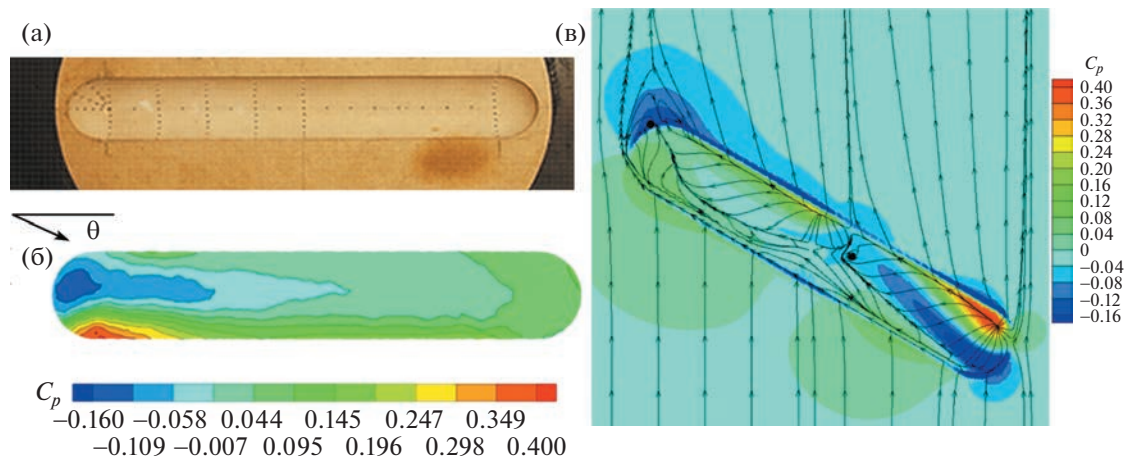
Расчетный конечно-объемный метод имеет второй порядок аппроксимации по пространственным переменным. Уравнение для поправки давления и поля декартовых составляющих скорости, давления, а также характеристик турбулентности рассчитывается на каждом итерационном шаге. Завершение итерационного процесса происходит при достижении максимальных погрешностей зависимых переменных уровня  $10^{-5}$  и стабилизации экстремальных локальных и интегральных параметров, включая суммарную теплоотдачу на контрольном участке с наклонной канавкой.

## АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В экспериментах [14] угол наклона канавки по отношению к набегающему потоку варьировался в диапазоне  $0-360^\circ$  (круговой обдув) с шагом  $5^\circ$ , что позволяло проверять наличие или отсутствие гистерезисных явлений, а также использовать свойства симметрии дренажа для повышения густоты покрытия криволинейной поверхности канавки. В процессе испытаний в аэродинамической трубе измерялись характерный скоростной напор  $q$  набегающего равномерного потока и значения избыточного давления  $\Delta p_i$  в контрольных дренажных точках  $i$  на поверхности канавки (рис. 3а). При каждом значении наклона регистрировались большие выборки (до 15 тыс. отсчетов) нестационарных показаний датчиков давления  $\Delta p_i$ .

Специальная обработка данных дренажных испытаний с использованием безразмерной системы координат  $(x, y, z)$ , связанной с центром канавки шириной  $D$ , позволила получить представление для полей распределения коэффициента давления по ее поверхности. Оно получено в виде зависимости  $C_p = f(\theta, x, y, z)$  от угла наклона вектора скорости набегающего потока для дискретного множества дренажных точек на поверхности модели (рис. 3б). Такая форма представления данных не зависит от особенностей структуры дренажа и, в этом смысле, является универсальной, а также удобной для сравнения с данными других экспериментов и аэрогидродинамических расчетов. Она также позволяет представить результаты эксперимента в наглядной графической форме, обычно характерной для представления данных численного моделирования (рис. 3б). Рассчитанное поле коэффициента давления с картиной линий тока по поверхности пластин и канавки показано на рис. 3в.





**Рис. 3.** Фотография дренированной канавки на пластине (а), измеренное (б) и рассчитанное (в) поле коэффициента давления  $C_p$  в канавке под углом наклона  $\theta = 60^\circ$ .

На рис. 4а,б и в табл. 1 и 2 представлены интегральные и локальные экстремальные характеристики течения и теплообмена, рассчитанные на сетках различной топологии и количества ячеек: базовой многоблочной сетке В из двух фрагментов, трехчастной сетке ВК с дополнительной кромочной косоугольной сеткой, многоблочной сетке ВЕ из четырех фрагментов с эллиптической криволинейной сеткой в канавке, а также сетке ВЕ1 с уменьшенным количеством ячеек. В качестве интегральных характеристик рассматриваются теплоотдача  $Nu_m$  и лобовое сопротивление  $C_x$  контрольного участка пластины с наклонной канавкой. В первом случае участок пластины ограничивается ориентированным по потоку квадратом с длиной стороны 7 с центром, совпадающим с центром канавки. Во втором случае с индексом d рассматриваются  $Nu_{md}$  и  $C_{xd}$  на поверхности пластины, ограниченной прямоугольным контуром наклонной канавки.

Получены численные прогнозы интегральных характеристик  $Nu_m$ ,  $C_x$ ,  $Nu_{md}$ ,  $C_{xd}$  (табл. 1) экстремальных величин давления ( $p_{max}$ ,  $p_{min}$ ), продольной и поперечной декартовых составляющих скорости ( $u_{max}$ ,  $u_{min}$ ,  $w_{max}$ ,  $w_{min}$ ), энергии турбулентности  $k_{max}$ , вихревой вязкости  $\mu_{tmax}$  и температуры  $T_{max}$  (табл. 2), а также распределений статического давления  $p$  в характерных сечениях канавки. Они сравниваются для указанных многоблочных сеток.

Численные прогнозы (рис. 4а,б) на различных многоблочных сетках и данные измерений для распределений давления, обезразмеренного по удвоенному скоростному напору, сравниваются в характерных продольном и поперечном сечениях наклонной канавки. Для сравнения выбраны срединное продольное сечение, начиная от входной кромки и заканчивая выходом из канавки, а также сечение стыковки входного сферического сегмента и цилиндрической траншеи.

Как следует из представленных графиков и табл. 1, 2, топология многоблочных сеток оказывает заметное влияние на точность прогнозов интегральных и локальных характеристик при выборе сеток с примерно одинаковым количеством расчетных ячеек (сетки В, ВК, ВЕ). Особенно значительные различия отмечаются для прогнозов интегральных параметров, полученных для прямоугольного контура канавки. В то же время прогнозы на сетках с аккуратным расчетом течения и теплообмена в окрестности кромок (на сетках ВК и ВЕ) оказались весьма близкими. Уменьшение количества ячеек за счет увеличения шагов в продольном и поперечном направлении на многоблочной сетке ВЕ1 с четырьмя фрагментами оказывает менее значимое влияние на

**Таблица 1**

| Grid | $Nu_m$ | $10^2 C_x$ | $Nu_{md}$ | $10^2 C_{xd}$ |
|------|--------|------------|-----------|---------------|
| В    | 125.7  | 0.5543     | 126.6     | 1.978         |
| ВК   | 126.8  | 0.6262     | 133.7     | 2.343         |
| ВЕ   | 126.1  | 0.6197     | 133       | 2.293         |
| ВЕ1  | 125.9  | 0.5811     | 130.3     | 2.044         |

Таблица 2

| Grid | $p_{\max}$ | $p_{\min}$ | $u_{\max}$ | $u_{\min}$ | $w_{\max}$ | $w_{\min}$ | $10^2 k_{\max}$ | $10^3 \mu_{t\max}$ | $T_{\max}$ |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|--------------------|------------|
| B    | 0.2006     | -0.2931    | 1.034      | -0.3485    | 0.2746     | -0.6610    | 3.121           | 2.870              | 1.039      |
| BK   | 0.2099     | -0.3413    | 1.038      | -0.4223    | 0.3138     | -0.6929    | 3.102           | 3.250              | 1.041      |
| BE   | 0.2103     | -0.3408    | 1.037      | -0.4196    | 0.3075     | -0.6881    | 3.187           | 3.251              | 1.039      |
| BE1  | 0.2082     | -0.3799    | 1.036      | -0.4255    | 0.3195     | -0.6790    | 3.451           | 3.016              | 1.040      |

Таблица 3

| SST     | $Nu_m$ | $10^2 C_x$ | $Nu_{md}$ | $10^2 C_{xd}$ |
|---------|--------|------------|-----------|---------------|
| 1993    | 126.1  | 0.6197     | 133       | 2.293         |
| 2003    | 123.8  | 0.5939     | 126.2     | 2.147         |
| 2003RLI | 124.5  | 0.6038     | 130.6     | 2.235         |

Таблица 4

| SST     | $p_{\max}$ | $p_{\min}$ | $u_{\max}$ | $u_{\min}$ | $w_{\max}$ | $w_{\min}$ | $10^2 k_{\max}$ | $10^3 \mu_{t\max}$ | $T_{\max}$ |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|--------------------|------------|
| 1993    | 0.2103     | -0.3408    | 1.037      | -0.4196    | 0.3075     | -0.6881    | 3.187           | 3.251              | 1.039      |
| 2003    | 0.2009     | -0.2683    | 1.035      | -0.3999    | 0.2940     | -0.6724    | 2.982           | 4.023              | 1.041      |
| 2003RLI | 0.2081     | -0.2963    | 1.038      | -0.4193    | 0.3574     | -0.7258    | 2.789           | 3.200              | 1.037      |

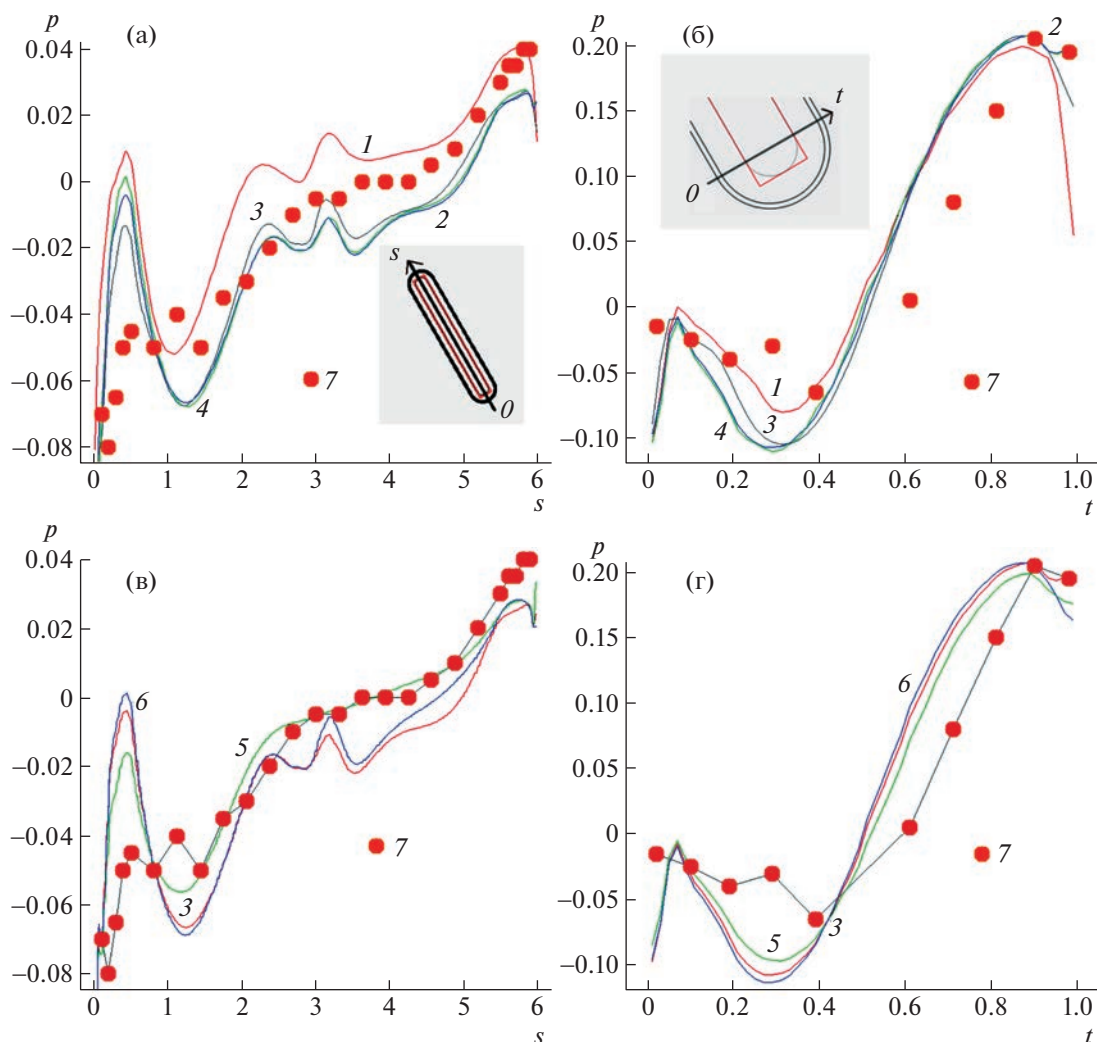
точность прогнозов в сравнении с расчетами на двухчастной сетке В. В целом расчеты на сетках с корректным отображением градиентного течения в кромочных окрестностях канавки свидетельствуют об их предпочтительности.

На рис. 4в,г и в табл. 3 и 4 представлены интегральные и локальные экстремальные характеристики течения и теплообмена, рассчитанные на многоблочной сетке BE с использованием версий стандартной SST-модели турбулентности MSST 1993 [20] и MSST 2003 [21], а также последней стандартной модели с коррекцией по Роди–Лещинеру–Исаеву MSST 2003 RLI. Отмечается близость численных прогнозов по первоначальной стандартной SST-модели 1993 г. и скорректированной SST 2003 г. с учетом влияния кривизны линий тока в рамках подхода Роди–Лещинера–Исаева.

Сравнение численных предсказаний, полученных на основе RANS подхода с использованием SST-моделей турбулентности, с измеренными полями и распределениями осредненных величин давления показывает их вполне удовлетворительное согласие, как по характеру изменения, так и по экстремальным величинам. Важно подчеркнуть, что обнаруженный ранее при численном моделировании течения в узких каналах (см., например, [2–10]) экстраординарный перепад давления между зонами торможения входящего в наклонную канавку внешнего потока на наветренном склоне и разрежения на входном сферическом сегменте канавки, формирующий интенсивный закрученный поток, подтвержден экспериментально для единичной канавки на пластине [18].

Возникновение зоны значительного избыточного отрицательного давления на входе в наклонную канавку является довольно неожиданным. Экстраординарный перепад давления предопределяет формирование вихревой структуры с интенсивными вторичным (закрученным) и возвратным высокоградиентным течением, которое характеризуется высокими скоростями. В данном случае максимальные абсолютные величины вторичного и возвратного токов доходят до 70 и 40% скорости внешнего потока.

На рис. 5 представлены сравнения измерений статического давления, отнесенного к удвоенному скоростному напору, в экспериментальном исследовании [18] с численными прогнозами отрывного течения в единичных канавках на стенке канала при числе Рейнольдса  $Re = 1.65 \times 10^5$  и углах наклона  $\theta = 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ$ . Рассматриваются характерные сечения канавки в связанной системе координат  $s, t$ , где  $s$  отсчитывается от переднего края сферического сегмента вдоль ее срединного сечения, а координата  $t$  изменяется от  $-0.5b$  до  $0.5b$  в характерном поперечном сечении



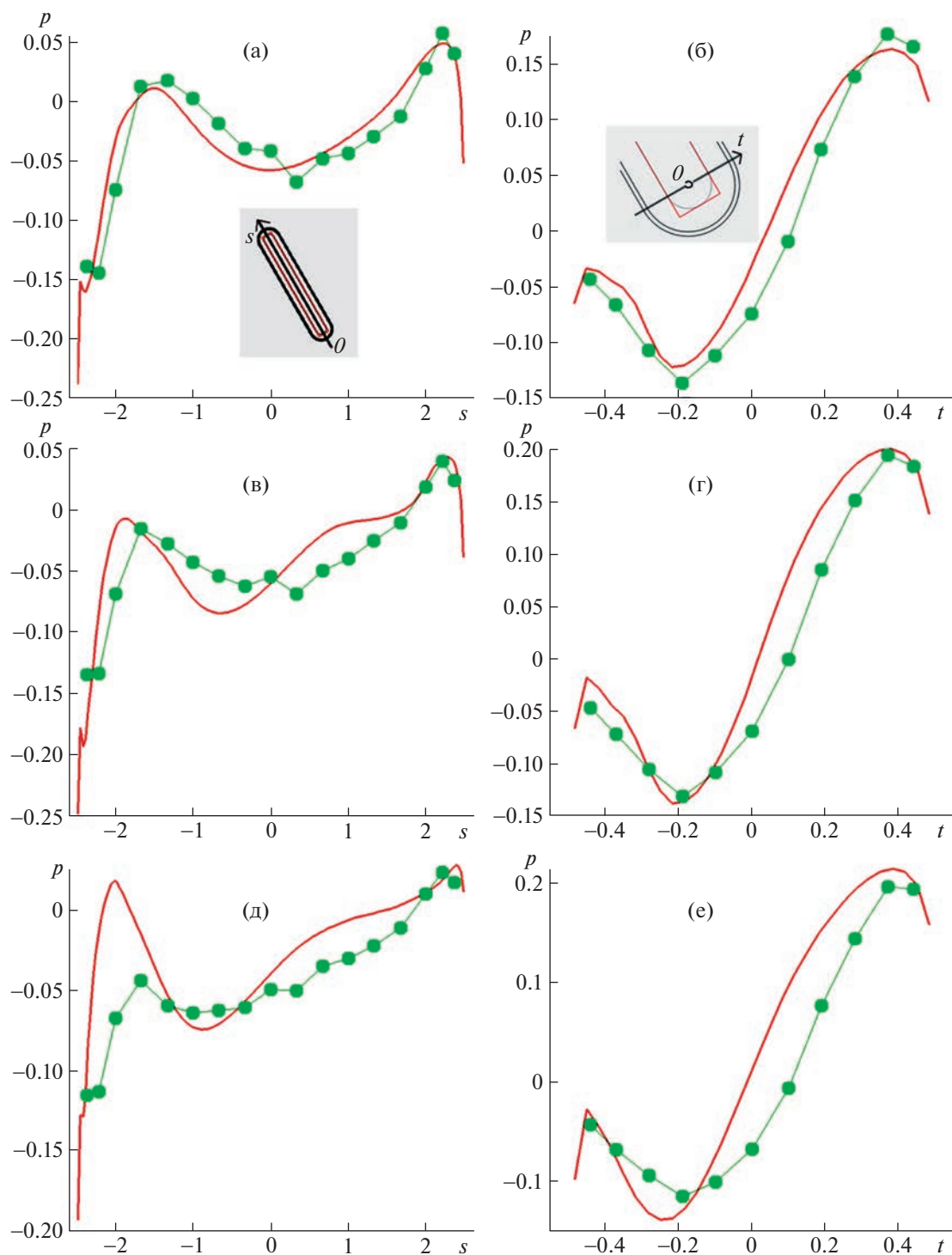
**Рис. 4.** Сравнение рассчитанных на различных сетках с MSST1993 1–4 и на сетке BE с разными моделях турбулентности 5, 6, а также измеренных (7) распределений давления в срединном продольном (а, в) и поперечном (б, г) сечениях канавки [14]. MSST93: 1 – сетка B, 2 – BK, 3 – BE, 4 – BE1; сетка BE: 5 – MSST2003, 6 – MSST2003RLI.

соединения сегмента с цилиндрической траншеей шириной  $b$  (в долях высоты канала). На рис. 6 сопоставляются экспериментальная картина линий тока на стенке канала с канавкой, полученная методом сажемасляного покрытия, и расчетная картина траекторий жидких частиц в прилегающем к стенке слое при  $\theta = 45^\circ$ . Установлено вполне удовлетворительное согласие данных расчетов и экспериментов, в том числе согласование наблюдаемых и прогнозируемых вихревых структур в канавке и в следе за ней.

Как и на плоской пластине, в наклонной канавке на стенке канала статическое давление в срединном продольном сечении возрастает от передней кромки сферического сегмента к задней кромке канавки, причем во входной части возникает зона низкого отрицательного давления, а на противоположной стороне имеется пик положительного давления. Такое распределение давления можно рассматривать аномальное, т.к. движение среды в отрывной зоне внутри канавки происходит с противодавлением.

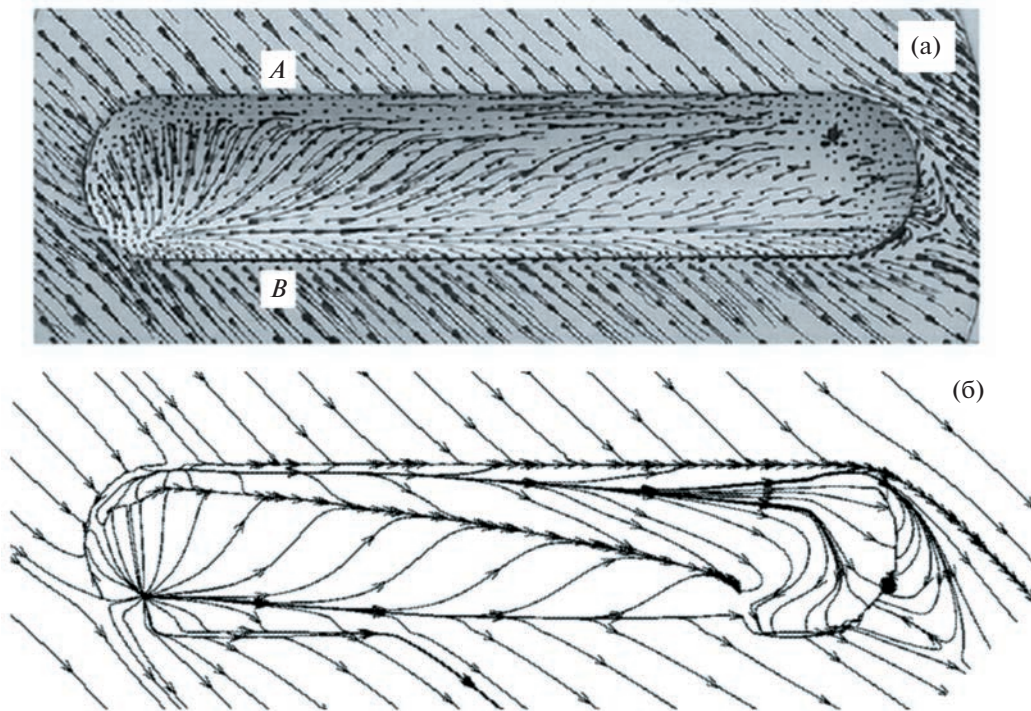
Поперек канавки в сечении стыковки сферического сегмента и цилиндрической траншеи, как и на рис. 3, возникает S-образное распределение давления с пиковым положительным значением в зоне торможения на наветренном склоне и минимальным отрицательным давлением на дне канавки в области разрежения.





**Рис. 5.** Сравнение рассчитанных (линии) и измеренных (точки) распределений давления в срединном продольном а, в, д и характерном поперечном б, г, е сечениях канавки при различных углах наклона  $\theta$ . а, б —  $\theta = 35^\circ$ ; в, г —  $45^\circ$ ; д, е —  $55^\circ$ .

Как видно из визуализации отрывного течения в канавке на рис. 6, зона отрицательного давления соответствует месту генерации торнадоподобного потока на входном сферическом сегменте [3, 4, 11, 13], а зона торможения возникает в результате взаимодействия входящего в канавку потока с ее наветренным склоном. Локальный максимум статического давления в срединном сечении входной части канавки объясняется этим торможением.



**Рис. 6.** Сопоставление саже-масляной картины растекания по поверхности канавки (а), наклоненной под углом  $45^\circ$  к набегающему потоку, на стенке канала с рассчитанной картиной визуализации отрывного течения вблизи канавки (б) для цифрового аналога экспериментального стенда.

С увеличением угла наклона канавки свыше  $35^\circ$  пиковая величина статического давления на наветренном склоне слегка увеличивается, достигая максимума при  $\theta = 45^\circ$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены новые перспективные тесты для пакетных технологий и моделей турбулентности, базирующиеся на расчетах высокоинтенсивных вихревых течений и теплообмена около структурированных энергоэффективных поверхностей. В их основе лежит открытие аномальной интенсификации отрывных течений и теплообмена в наклонных канавках на пластинах и стенках каналов, а также явления ускорения потока в ядре узкого канала со структурированной канавками стенкой. В методическом исследовании продемонстрирована приемлемость RANS-подхода для прогнозирования характеристик высокоинтенсивных закрученных потоков.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда по грантам 22-19-00056 (эксперименты) 23-19-00083 (расчеты).

#### Обозначения

$Nu$  – число Нуссельта,  $Nu = \alpha D / \lambda$

$Pr$  – число Прандтля,  $Pr = \mu c_p / \lambda$

$Re$  – число Рейнольдса,  $Re = \rho U D / \mu$

$T$  – температура, в К

$U$  – скорость набегающего потока [м/с]

$u, w$  – продольная и поперечная декартовы составляющие скорости, в отношении к  $U$

$c_p$  – теплоемкость

$D$  – ширина канавки на пластине [м]

$b$  – ширина канавки на стенке канала, в отношении к высоте канала

$s$  – продольная координата в срединном сечении канавки, в отношении к  $D$

$t$  – поперечная координата в сечении стыковки сферического сегмента и траншеи, в отношении к  $D$

$k$  — турбулентная кинетическая энергия в отношении к  $U^2$

$p$  — давление, отнесенное к  $\rho U^2$

$q$  — тепловой поток [ $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ]

$x, y, z$  — продольная, вертикальная и трансверсальная координаты, в отношении к  $D$

*Greek symbols*

$\lambda$  — теплопроводность [ $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ]

$\mu$  — коэффициент динамической вязкости [ $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ ]

$\rho$  — плотность [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ]

*Subscripts*

min, max — минимальные и максимальные величины

pl — плоская стенка

m — параметры, осредненные по площади контрольного участка

*Abbreviations*

SST — модель переноса сдвиговых напряжений

VP2/3 — скорость-давление, 2D/3D коды

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гувернюк С.В., Синявин А.А., Меснянкин С.Ю., Панин Д.Н., Чулюнин А.Ю. Специализированный тест для валидации вычислительных технологий моделирования аэродинамики большегрузных автомобилей с элементами управления отрывом // Отчет Института механики МГУ. 2015. № 5298. 54 с.
2. Исаев С.А., Судаков А.Г., Никущенко Д.В., Усачов А.Е., Чулюнин А.Ю., Дубко Е.Б. RANS расчеты интенсивных отрывных и смерчевых течений на структурированных пластинах и стенках каналов в цифровых двойниках экспериментальных стендов Института механики МГУ и КазНЦ РАН // Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике: Девятая российская конференция. М.: ИПМ им. Келдыша РАН, 2022. С. 152–156.
3. Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. V. 163 (Part.A). P. 202–207.
4. Isaev S.A., Gritckevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V. 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. 2019. V. 145. № 18737. P. 1–13.
5. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г. Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 5. С. 797–800.
6. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В. Ускорение турбулентного потока в узком облуненном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклоненных овально-траншейных лунок на стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 5. 697–702.
7. Исаев С.А., Мазо А.Б., Никущенко Д.В., Попов И.А., Судаков А.Г. Влияние на аномальную интенсификацию отрывного турбулентного течения угла наклона однорядных овально-траншейных лунок на стабилизированном гидродинамическом участке узкого канала // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. Вып. 21. С. 18–21.
8. Mironov A., Isaev S., Skrypnik A. and Popov I. Numerical and physical simulation of heat transfer enhancement using oval dimple vortex generators — review and recommendations // Energies. 2020. V. 13. № 5243.
9. Исаев С.А., Чулюнин А.Ю., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Анализ аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена на стабилизированном участке узкого канала с однорядными наклоненными овально-траншейными лунками при использовании различных сеток и моделей турбулентности // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 1. С. 116–125.
10. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Интенсификация отрывного течения в наклонных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94. № 1. С. 160–168.
11. Исаев С.А. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях // Механика жидкости и газа. 2022. № 5. С. 13–24.
12. Isaev S., Leontiev A., Gritskovich M., Nikushchenko D., Guvernyuk S., Sudakov A., Chung K.-M., Tryaskin N., Zubin M., Sinyavin A. Development of energy efficient structured plates with zigzag arrangement of multirow inclined oval trench dimples // Int. J. Thermal Sciences. 2023. V. 184. № 107988.

13. *Исаев С.А.* Аэрогидродинамические механизмы интенсификации физико-энергетических процессов на структурированных энергоэффективных поверхностях с вихревыми генераторами // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30. № 1. С. 83–88.
14. *Isaev S.A., Mikheev N.I., Dushin N.S., Goltzman A.E., Nikushchenko D.V. and Sudakov A.G.* Vortex heat transfer enhancement on energy-efficient surfaces structured by inclined trench dimples // Journal of Physics: Conference Series. 2011. V. 2119. № 012016.
15. *Isaev S.A., Guvernuyuk S.V., Mikheev N.I., Popov I.A., Nikushchenko D.V.* 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 // Journal of Physics: Conf. Ser. 2021. V. 2039. № 012009.
16. *Isaev S.A., Popov I.A., Mikheev N.I., Guvernuyuk S.V., Zubin M.A., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G.* Vortex heat transfer enhancement in the separated flow near structured dimpled surfaces // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2057. № 012002.
17. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Son E.E., Guvernuyuk S.V., Zubin M.A., Mikheev N.I., Popov I.A., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G.* Anomalous intensification of separated flow and heat transfer in one and multiple row deep inclined oval trench dimples on the wall of a narrow channel and on the plate // Journal of Physics: Conf. Ser. 2021. V. 2088. № 012018.
18. *Зубин М.А., Зубков А.Ф.* Структура отрывного обтекания цилиндрической каверны на стенке плоского канала // Механика жидкости и газа. 2022. № 1. С. 81–89.
19. *Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е.* Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 316 с.
20. *Menter F.R.* Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows // AIAA Paper. 1993. № 93–2906.
21. *Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.* Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // K. Hanjalic, Y. Nogano, and M. Tummers (Eds.) Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, Begell House Inc., 2003.
22. *Исаев С.А., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е., Харченко В.Б.* Коррекция модели переноса сдвиговых напряжений с учетом кривизны линий тока при расчете отрывных течений несжимаемой вязкой жидкости // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 4. С. 966–979.
23. *Isaev S.A.* Experience of application of SST-model-2003 with correction on streamline curvature according to Rodi-Leschziner-Isaev approach for (U)RANS calculations of separated and vortex sub- and supersonic flows // AIP Conference Proceedings. 2018. 2027, P. 020015.1–7.
24. *Ferziger J.H., Peri'c M.* Computational Methods for Fluid Dynamics/ 2nd ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1999.
25. *Van Doormaal J.P., Raithby G.D.* Enhancement of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flow // Numerical Heat Transfer. 1984. V. 7. № 2. P. 147–163.
26. *Leonard B.P.* A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation // Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 1979. V. 19. № 1. P. 59–98.
27. *Van Leer B.* Towards the ultimate conservative difference scheme V. A second order sequel to Godunov's method // J. Comp. Phys. 1979. V. 32. P. 101–136.
28. *Rhie C.M., Chow W.L.* A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation // AIAA J. 1983. V. 21. P. 1525–1532.
29. *Pascau A., Garcia N.* Consistency of SIMPLEC scheme in collocated grids, V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010. Lisbon, Portugal, 2010, 12 p.
30. *Saad Y.* Iterative methods for sparse linear systems, 2nd ed., Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 2003.
31. *Demidov D.* AMGCL: C++ library for solving large sparse linear systems with algebraic multigrid method. <http://amgcl.readthedocs.org/>