

УДК 532.517:2. 621.1.016.4

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЛОКАЛЬНОГО УСКОРЕНИЯ ЛАМИНАРНОГО ПОТОКА В КАНАЛЕ С АНОМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ ТЕПЛООБМЕНА В ДВУХРЯДНЫХ НАКЛОННЫХ КАНАВКАХ

© 2024 г. С. А. Исаев^{a, b, c, *}, О. О. Мильман^c, Н. И. Михеев^d, Д. В. Никущенко^a, Н. С. Душин^d,
А. А. Ключ^b, Е. А. Осюк^b

^aСанкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

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

^cНаучно-производственное внедренческое предприятие Турбокон, Калуга, Россия

^dКазанский научный центр РАН (ФИЦ КазНЦ РАН), Казань, Россия

*e-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.05.2024 г.

После доработки 11.06.2024 г.

Принята к публикации 11.06..2024 г.

Проведено экспериментальное и численное исследование аномальной интенсификации ламинарного отрывного течения и теплообмена (АИЛОТТ) в канале с двумя рядами из 26 плотно расположенных канавок под углами наклона $\pm 45^\circ$ при равномерном потоке на входе и изменении чисел Re от 1000 до 5500. Обосновывается локальное ускорение потока с достижением в безразмерных переменных максимальной скорости порядка 1.8 и утончение пристеночного слоя с ростом продольной скорости, достигающей до величины 1.4 на расстоянии $y=0.005$ от стенки при Re=2500, над входными сферическими сегментами канавок. Установлена взаимосвязь местного ускорения в центре канала и АИЛОТТ, причем отмечается, что при Re=5500 минимальная величина относительного отрицательного трения доходит до -25 , а относительная теплоотдача от структурированного участка канала достигает 5.2.

Ключевые слова: аномальная интенсификация, наклонные канавки, узкий канал, ламинарный поток, отрывное течение, вихревой теплообмен, воздух.

DOI: 10.31857/S1024708424040038, **EDN:** OYSKEA

Интенсификация ламинарного теплообмена в микро- и миниканалах энергетических устройств типа воздушных конденсаторов [1] и объектов микроэлектроники, таких как микрочипы многопроцессорных компьютеров [2], играет важную роль в системах их охлаждения. Упорядоченные элементы дискретной шероховатости, такие как впадины [3] и выступы [4], служат для создания структурированных поверхностей энергообмена. Нанесенные оребрением или обвальцовкой [4] выступы на омываемой стенке каналов позволяют получить высокую тепловую эффективность таких поверхностей, но при этом потери полного давления растут опережающими темпами. Впадины, лунки, канавки [3] кардинально уменьшают гидравлические потери в проточных трактах, но теплоотдача от структурированных стенок оказывается заметно ниже по сравнению с выступами.

Следует отметить, что получившие широкое распространение в луночных технологиях [5] сферические лунки гораздо реже применяются для интенсификации ламинарного теплообмена в микроканалах [6, 7]. Стремление повысить тепловую эффективность структурированных поверхностей привело к использованию несимметричных форм лунок типа поперечных овальных лунок при их шахматном расположении [8], поперечных канавок и невысоких выступов [9]. Также интересны комбинированные системы, сочетающие сферические лунки с вихревыми генераторами флюгерного типа [10].

Овальные лунки представляют собой композиции половинок исходной сферической лунки, соединенные цилиндрической вставкой длиной λ в долях ширины лунки. Расположенные под углом к набегающему потоку овальные лунки оказались эффективными генераторами спиралевидных вихрей, интенсифицирующими теплообмен не только в следе за лунками, но и внутри них. Отрывное течение

и теплообмен в каналах с пакетами редко расположенных на нагретой стенке однорядных овальных лунок умеренного удлинения рассчитывались на стабилизированном [11] и начальном [12, 13] гидродинамических участках для воздушного и масляного теплоносителей. В [13] рассматривается течение воздуха в узком канале шириной 2.5 и переменной высотой от 0.4 до 0.8 при варьировании числа Рейнольдса от 100 до 2500. На стенку нанесен пакет из 22 овальных лунок глубиной 0.2, шириной 1, длиной 1.8, радиусом скругления кромки 0.25 и шагом между центрами лунок 1.8. Важно отметить, что максимальная скорость в канале достигает 2.04 от среднemasсовой скорости, а максимальная поперечная скорость 0.75. Тепловая эффективность при $Re=2500$ оказалась равной 1.45 при росте относительных гидравлических потерь 1.25.

Увеличение λ свыше 1.5–2, когда длина траншейной части овальной лунки становится преобладающей в сравнении с шириной лунки, привело к рассмотрению овально-траншейных лунок (ОТЛ), позже названных канавками [14]. При увеличении λ наблюдается трансформация отрывного течения, которая сопровождается резким уменьшением длины зоны возвратных токов во входной части ОТЛ, ростом интенсивности возвратного течения и закрученного потока, причем максимальная величина вторичной скорости достигает величины порядка 0.85 при $\lambda \sim 5$. Аномальная интенсификация отрывного турбулентного течения и теплообмена в ОТЛ на стабилизированном гидродинамическом участке турбулентного воздушного потока ($Re=10^4$) в канале с однорядными редко расположенными (с шагом 6) ОТЛ при угле наклона 45° открыта в [15]. Максимальная абсолютная величина отрицательного трения в среднем продольном сечении ОТЛ в 4 раза превосходит трение в плоскопараллельном канале, а максимальная величина числа Нуссельта почти в пять раз превышает аналогичную величину на плоской стенке [16]. В [17–19] рассчитано ламинарное течение воздуха (при $Re=10^3$) в узком канале шириной 4 с однорядными наклоненными под углом 45° ОТЛ с $\lambda=3.5$ при варьировании глубиной лунки в пределах от 0 до 0.39 в долях высоты канала. Открыто местное ускорение воздуха в ядре потока, связанное с полуторакратным увеличением максимальной скорости в зоне над входной частью наклонных ОТЛ по сравнению с максимумом скорости в плоскопараллельном канале, при глубинах ОТЛ свыше 0.25. Аномальная интенсификация отрывного ламинарного течения ($Re=10^3$) и теплообмена в ОТЛ наблюдается при их плотном расположении на начальном гидродинамическом участке канала с 31 однорядными наклонными ОТЛ при постановке условий симметрии на боковых границах продольного участка [20]. Вдали от входа минимальная величина относительного отрицательного трения в характерном продольном сечении канала, проходящем через центр сечения стыковки входного сферического сегмента и траншейной части ОТЛ, достигает -4 . Физический механизм явления аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена связан с образованием экстраординарного сосредоточенного перепада давления между близко расположенными зонами торможения входящего в ОТЛ потока и низкого отрицательного давления в ядре смерчеобразного вихря, возникающего во входном полусферическом сегменте лунки.

Данная статья акцентирует внимание на взаимосвязи локального ускорения ламинарного потока над входными частями наклонных канавок с аномальной интенсификацией ламинарного отрывного течения и теплообмена (АИЛОТТ) на начальном гидродинамическом участке в узком микроканале с двухрядными ОТЛ – канавками, плотно расположенными под углами наклона к ламинарному потоку $\pm 45^\circ$ на нагретой изотермической стенке при размещении входных сферических сегментов вблизи продольной плоскости симметрии. Локальное ускорение потока в ядре канала над входными сегментами канавок и его замедление вблизи адиабатических боковых стенок канала обосновывается экспериментально и численно при числе Рейнольдса 10^3 . Устанавливается корреляция АИЛОТТ и ускорения потока в канале, прогрессирующих с ростом Re от 10^3 до 5.5×10^3 .

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования выполнены с использованием двумерного оптического метода измерений Smoke Image Velocimetry [21], имеющего более высокое пространственное разрешение и лучшую устойчивость к большим градиентам скорости, чем PIV. Рабочим телом в опытах был воздух, движение которого создавалось воздуходувкой, установленной в выходной части экспериментальной установки и работающей на всасывание. Регулирование скорости течения осуществлялось дискретно, комбинациями задействованных калиброванных критических сопел. Засев потока трассерами

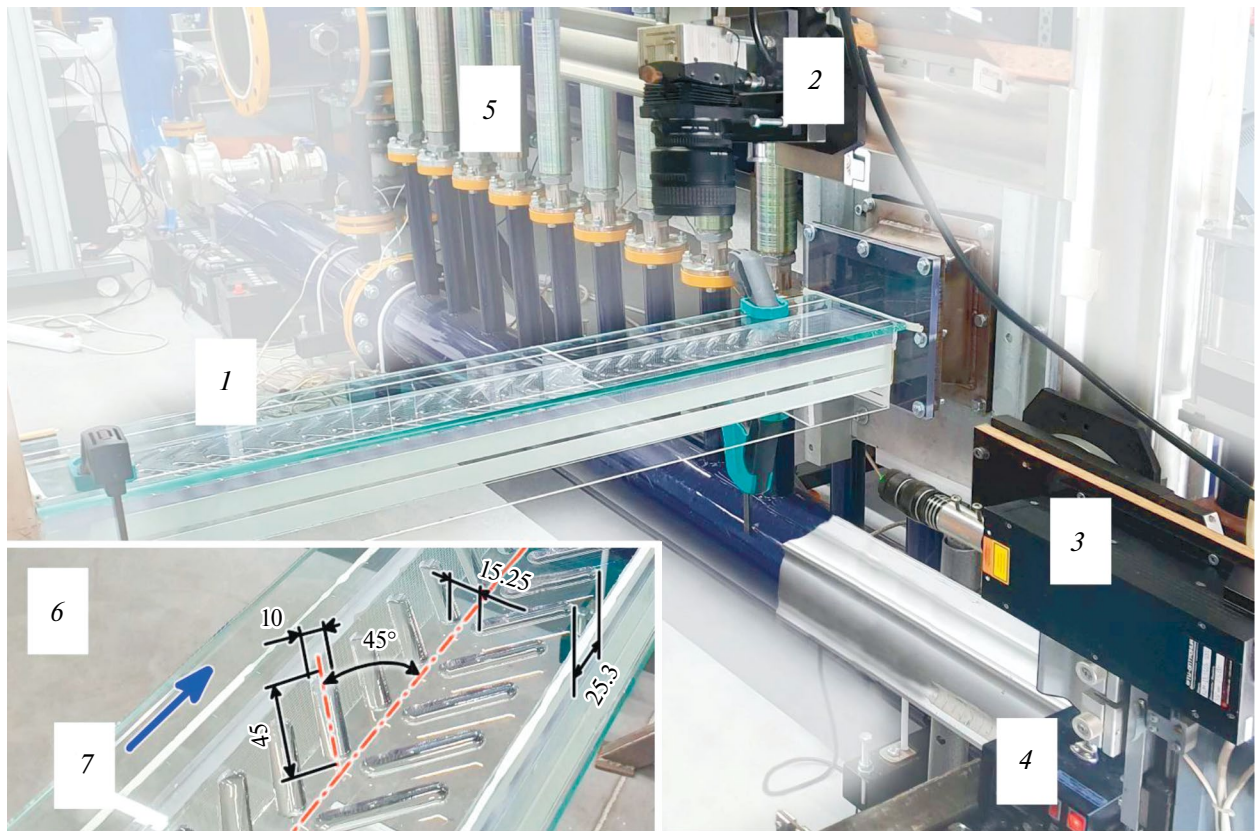


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – рабочий участок; 2 – скоростная видеокамера; 3 – DPSS-лазер; 4 – координатное устройство; 5 – набор критических сопл; 6 – геометрия поверхности с канавками; 7 – направление потока.

выполнялся стандартным для оптических методов измерений способом – генератором тумана с рабочей жидкостью средней плотности. Для исключения влияния на результаты измерений струи, выходящей из генератора тумана, всасывание трассеров в измерительный участок осуществлялось из большого объема, ограниченного продуваемыми стенками, и заполняемого трассерами на значительном удалении от входного сечения измерительного участка.

Измерительный участок высотой $h=0.01$ м, шириной 0.1 м и длиной 0.8 м (рис. 1) изготовлен из стекла и прозрачного поликарбоната. Нижняя стенка измерительного участка представляла собой вкладыш из поликарбоната, на поверхности которого были отфрезерованы наклонные канавки. Геометрия поверхности с канавками показана на вставке 6 рис. 1. Размеры приведены в мм. Количество канавок в поперечном сечении измерительного участка – 2, вдоль участка – 26.

Съемка течения проводилась с частотой 4000 кадров/с скоростной видеокамерой Fastec HiSpec. Характеристики камеры при необходимых настройках, к сожалению, не позволяли снимать всю канавку и прилегающие к ней области, поэтому съемка поля течения в одной измерительной плоскости осуществлялась последовательно в нескольких окнах. Световой нож создавался непрерывным лазером KLM-532h с диодной накачкой и выходной мощностью до 5 Вт и ориентировался параллельно поверхности с канавками. Фокусировка светового ножа осуществлялась таким образом, что толщина светового ножа в области съемки не превышала 0.0005 м. Дальнейшее уменьшение толщины слоя, в котором снимается движение трассеров, выполнялось объективом скоростной видеокамеры за счет уменьшения глубины резкости. Точность позиционирования камеры и лазера относительно рельефа поверхности измерительного участка обеспечивалась автоматизированным прецизионным трех-координатным перемещающим устройством.

Измерения выполнены в окрестности 22 канавки от входа на расстояниях от стенки с канавками y/h : 0.02, 0.05, 0.08, 0.13, 0.23, 0.33, 0.43, 0.53, 0.63 и 0.73. Число Рейнольдса при измерениях равнялось 1000 и рассчитывалось по среднемассовой скорости и высоте канала.

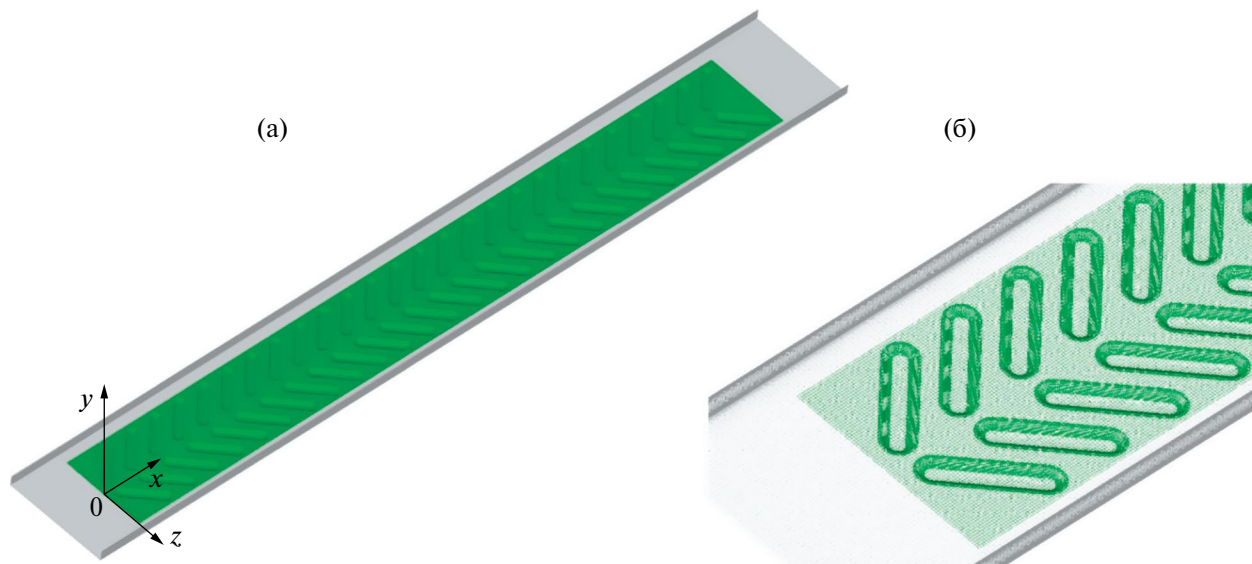


Рис. 2. Цифровой аналог стенда (а) с расчетной сеткой (б).

Размер сличаемых фрагментов изображений при программной обработке кадров составлял $16 \times 16 \text{ pix}^2$. Масштабный коэффициент равнялся 0.083 мм/пикс . Количество обрабатываемых пар кадров в каждом измерении составляло 10000 штук. Ко всем результатам измерений применялась процедура тестирования на предмет выпадающих векторов и коррекции осциллограмм скорости на основе получаемых статистических характеристик для фиксированной точки пространства.

Цифровой аналог экспериментального стенда (рис. 2а) представляет собой узкий плоскопараллельный канал с характерным размером – высотой H , на нижней стенке которого нанесены два ряда из 26 плотно расположенных канавок глубиной 0.25 под углами наклона $\pm 45^\circ$ к ламинарному потоку воздуха [14]. Во входном сечении канала низкоскоростной поток равномерный. Длина и ширина канала составляют 78.75 и 10 , а длина входного и выходного его участков с плоскими стенками – 5 и 5.75 соответственно. Структурированный участок канала с двухрядными канавками на рис. 2а, закрашенный зеленым цветом, имеет протяженность 68 , а его ширина равна 8 . В середине входного поперечного сечения участка с канавками располагается центр системы декартовых координат: продольной x , вертикальной y и поперечной z . Соответствующие декартовы составляющие скорости ламинарного течения обозначаются как U , V , W . Внутри каждой канавки вводится связанная система координат s , y , t , ориентированных в срединном продольном сечении, вертикальном направлении и в поперечном характерном сечении перехода от входного сферического сегмента к цилиндрической траншее.

Двухрядные канавки шириной 1 состоят из двух половин сферической лунки глубиной 0.25 и соединяются цилиндрической траншеей длиной 3.5 [14]. Они ориентируются таким образом (углы наклона $\pm 45^\circ$), чтобы их входные сферические сегменты располагались в районе центрального продольного сечения канала, а выходные сегменты находились в окрестности боковых стенок. Шаг между центрами канавок в плотном пакете выбирается равным 2.5 , а радиус скругления кромок канавок принимается равным 0.025 .

Для описания стационарного ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости в канале со структурированной стенкой используется система стационарных уравнений Навье–Стокса. Конвективный теплообмен описывается уравнением энергии. Соответствующий экспериментальным условиям равномерный поток, т.е. $U=1$; $V=W=0$, задается во входном сечении канала. Мягкие граничные условия (условия продолжения решения) выполняются на выходе из канала. Условие прилипания задается на стенках канала. Верхняя плоская стенка канала поддерживается при комнатной температуре 20°C (293K), которая выбирается в качестве характерной – безразмерная $T=1$. Температура нижней структурированной стенки принимается изотермической и равной 30°C (303K), т.е. безразмерная температура $T=1.034$. Боковые стенки канала теплоизолированные.

Многоблочная сетка (рис. 26) строится на основе разномасштабных фрагментов структурированных сеток [22]. Канальный поток с равномерным профилем продольной составляющей скорости на входе отображается на декартовой сетке MG, сеточные линии которой сгущаются по мере приближения к стенкам. Максимальные шаги сетки MG по продольной x и поперечной z координатам составляют 0.15, а по вертикальной координате y — 0.05. Шаги у стенки равны 2.5×10^{-4} . Сетка MG содержит порядка 4.2 млн расчетных ячеек. В нее встраивается согласованная с нижней стенкой сетка MR, покрывающая структурированный участок размером 68 на 8 и имеющая высоту 0.2. Сетка MR предназначена для детального отображения пристеночного отрывного течения. Шаги сетки по продольной и поперечной координатам равны 0.1. Сетка MG содержит порядка 1.6 млн расчетных ячеек. Для лучшего разрешения высокоградиентных зон течения каждая из 52 наклонных канавок накрывается кромочной криволинейной сеткой O-типа. Шаг кромочной сетки по окружной координате вдоль криволинейной кромки имеет величину порядка 0.05, а сеточные линии по нормали к кромкам сгущаются до величины шага, равной 0.03. В итоге многоблочная сетка содержит 10.8 млн расчетных ячеек.

Численное решение стационарных уравнений Навье—Стокса для описания ламинарного течения несжимаемой вязкой жидкости, а также уравнения энергии для прогнозирования характеристик теплообмена, основываются на концепции расщепления по физическим процессам [22] с применением согласованной процедуры коррекции давления SIMPLEC [23] и многоблочных структурированных сеток с их частичным перекрытием. Обобщенное уравнение переноса записывается в приращениях зависимых переменных, в качестве которых выступают декартовы составляющие скорости и тепло-содержание. В явной части обобщенного уравнения дискретизация конвективных членов уравнений количества движения и энергии осуществляется с помощью гибридной схемы переменного порядка аппроксимации. Центральная-разностная схема применяется для представления диффузионных членов. В неявной части обобщенного уравнения используется противопоточная схема с односторонними разностями. В гибридной схеме HS объединяются второго порядка аппроксимации противопоточная схема с квадратичной интерполяцией Леонарда [24], которая берется с весовым коэффициентом смешения R , и первого порядка аппроксимации противопоточная схема с односторонними разностями с весовым коэффициентом $(1-R)$.

Широко известный подход на основе центрированных расчетных сеток, в котором зависимые переменные определяются в центрах ячеек, требует монотонизации поля давления за счет введения коррекции Рхи—Чоу [25, 26]. Решение алгебраических уравнений проводится предобусловленным методом BiCGSTAB [27] с алгебраическим многосеточным ускорителем из библиотеки Демидова (amgcl) [28] для поправки давления и с помощью ILU(0) факторизованного алгоритма для остальных переменных. Решение тепловой задачи не влияет на решение динамической задачи, поскольку физические свойства теплоносителя не меняются. Оригинальный пакет VP2/3 (Velocity-Pressure, 2D/3D) разработан на базе многоблочных вычислительных технологий (MBT), описанных в [22].

MBT базируется на использовании разномасштабных структурированных сеток с перекрытием, согласованных с геометрией канала. Параметры в двух рядах приграничных ячеек каждой из перекрывающихся сеток определяются линейной интерполяцией [24]. Установлено, что такой подход эквивалентен применению адаптивных неструктурированных сеток и не требует чрезмерных вычислительных ресурсов. Его преимущество состоит в обеспечении надлежащей точности прогнозов без измельчения сеток, так как этот метод автоматически разрешает все значимые гидродинамические и теплофизические особенности. Вполне очевидно, что пересчеты с сетки на сетку с помощью линейной интерполяцией являются источником ошибок. Однако тестовые расчеты стационарного циркуляционного течения в каверне с подвижной крышкой при $Re=1000$ [29] показали приемлемую точность численных прогнозов.

Процесс решения задачи итерационный. На каждом итерационном шаге решается уравнение поправки давления и рассчитываются поля декартовых составляющих скорости, давления, а также характеристик турбулентности. Вычислительный процесс заканчивается при достижении максимальных погрешностей зависимых переменных уровня 10^{-5} и выходе на стабилизацию экстремальных локальных и интегральных параметров, включая коэффициент гидравлических потерь и суммарную теплоотдачу на контрольном участке с наклонными канавками. В данной работе представляются локальные характеристики течения и теплообмена в канале с двухрядными наклонными канавками. В их число входят продольные и поперечные распределения перепада статического давления $P-P_{pl}$, относительной теплоотдачи Nu/Nu_{pl} , в характерных сечениях канала и канавок. Индекс pl относится к параметрам плоскопараллельного канала, в том числе на нагретой стенке.

Следует отметить, что коэффициент гидравлических потерь ζ в канале, в том числе при нанесении на нагретую стенку двухрядных наклонных канавок, определяется по методике расчета гидравлических потерь в канале со сферической лункой [30]. Расчетные прогнозы по предложенной методике хорошо согласуются с оценками энтропийных источников по Хервигу [31].

Параметрические расчеты проводятся с помощью разработанного на основе многоблочных вычислительных технологий распараллеленного кода VP2/3 (Velocity-Pressure, 2D/3D) [22] на 24-ядерном процессоре Intel Xeon Gold 6562.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2–16 и в табл. 1 представлены некоторые из полученных результатов.

В качестве базовой расчетной сетки выбрана многоблочная сетка, содержащая 9.25 млн расчетных ячеек. В табл. 1 приведены результаты анализа сеточной сходимости при сравнении численных прогнозов интегральных и экстремальных локальных характеристик течения и теплообмена, полученных на трех различных сетках с количеством расчетных ячеек 9.1, 9.25 и 9.7 млн. Сетки отличаются высотой прилегающей к канавкам области, которая выбирается равной 0.1, 0.2 (базовая) и 0.3. Относительные величины тепловой эффективности $\text{Numm}/\text{Numm}_{\text{pl}}$ и гидравлических потерь ζ/ζ_{pl} выбраны в качестве интегральных характеристик, а $-U_{\text{min}}$ и W_{max} — в качестве экстремальных локальных параметров. Сходимость по сеткам удовлетворительная и в дальнейшем параметрические расчеты проводятся на базовой сетке.

Проведенные методом SIV [21] замеры полей продольной составляющей скорости в пространстве сечения канала в районе 22 канавки (цветная картина распределения U в вертикальном сечении на уровне $y=0.05$ приведена на рис. 3) нацелены прежде всего на анализ сформировавшейся структуры потока вдали от входного сечения. В районе срединного сечения канала формируется течение с максимальной скоростью, причем начиная с высоты $y=0.43$ ее величина превосходит максимальную скорость в плоскопараллельном канале U_{ch} , равную 1.5. У боковых стенок канала пристеночное течение в зазорах между стенками и концевыми участками канавок имеет локальный максимум скорости, по величине значительно уступающий U_{ch} . Наибольший интерес вызывает развитие канального потока в узком промежутке между поперечными сечениями канала, проходящими через характерные точки L и R в срединном сечении на дне канавки. Точки L и R являются центрами поперечных сечений стыковки входного и концевого сферических сегментов соответственно с траншейным участком канавки, а точка C представляет ее центр.

Измеренные профили скорости $U(z)$ в трех поперечных сечениях канала, проходящих через точки L , C , R на дне канавки, иллюстрируют динамику воздушного потока на разных высотах от нижней стенки канала, начиная от $y=0.02$ до $y=0.73$. Значительное влияние отрывного течения в наклонной канавке отмечается на высотах $y=0.02$ и 0.05 , на которых наблюдаются наибольшие различия в профилях $U(z)$ над канавкой в поперечных сечениях, проходящих через точки L , C , R на дне 22 канавки. В прилегающем к структурированной стенке слое воздуха толщиной порядка 0.1 возникает переменное по продольной координате поле скорости U . Над этим слоем происходит стабилизация в ядре канального потока. В вертикальных сечениях, начиная с $y=0.13$, профили $U(z)$ практически сливаются. Лишь при $y=0.43$, 0.63 , 0.73 в сечении, проходящем через центр канавки C , наблюдается некоторое отличие профилей измеренных $U(z)$ от других профилей $U(z)$ в зонах, прилегающих к боковым стенкам.

Профили скорости в рассматриваемых сечениях поперек канала можно разделить на несколько участков. Для сечений, проходящих через точки L и R , таких участков пять, а для сечения через центр канавки — три. Два общих участка в сечениях простираются над плоскими участками нижней стенки от плоскости симметрии до края 22 канавки и от краев 21 и 22 канавок до боковой стенки. Остальные участки лежат в сечениях канавок между их краями. В сечении через точку L присутствуют два участка во входном сферическом сегменте 22 канавки и в концевом сферическом сегменте 21 канавки. В сечение через точку R включаются участки в концевом сферическом сегменте 22 канавки и во входном участке 23 канавки.

В ближайшем к стенке сечении при $y=0.02$ продольные составляющие скорости в окрестности плоскости симметрии на рис. 3а для всех рассматриваемых профилей $U(z)$ минимальны и не слишком отличаются друг от друга, находясь в интервале изменения от 0.2 до 0.3. В сечении, проходящем через точку L 22 канавки, наблюдается резкое возрастание $U(z)$ с достижением максимума, близкого

Таблица 1. Влияние общего количества расчетных ячеек N на интегральные и локальные экстремальные характеристики

N (млн ячеек)	$\text{Numm}/\text{Numm}_{\text{pl}}$	$\zeta / \zeta_{\text{pl}}$	$-U_{\text{min}}$	W_{max}
9.1	2.69	2.12	-0.481	1.112
9.25	2.76	2.14	-0.505	1.177
9.7	2.92	2.22	-0.531	1.210

к скорости входного потока (порядка 0.85), с последующим снижением до края 21 канавки (~ 0.35). Второй локальный максимум $U(z)$ возникает над концевым сегментом 21 канавки и достигает величины порядка 0.5. В сечении через точку C 22 канавки максимум скорости $U(z)$ достигает величины порядка 0.7 и оказывается смещенным к центру канавки. Падение скорости отмечается над плоской стенкой между канавками. В сечении, проходящем через точку R , локальный максимум $U(z)$ порядка 0.6 возникает на входном участке 23 канавки. Далее скорость падает до величины порядка 0.25 перед краем 22 канавки и дальше растет до 0.45. За краем 21 и 22 канавки наблюдается локальный минимум $U(z)$ порядка 0.1. На ближайшем к боковой стенке участке возникают локальные максимумы, имеющие величины порядка 0.2–0.3.

В сечении $y=0.05$ продольные составляющие скорости в окрестности плоскости симметрии на рис. 3б для всех рассматриваемых профилей $U(z)$ немного подрастают по сравнению с аналогичными профилями на рис. 3а и не слишком отличаются друг от друга, находясь в интервале изменения от 0.35 до 0.45. Максимум продольной скорости, равный 1.16, наблюдается над точкой L в сечении, проходящем через эту точку. Второй максимум $U(z)$ порядка 0.5 в этом сечении возникает со смещением к переднему краю 21 канавки. В сечении через точку C 22 канавки максимум скорости $U(z)$ достигает величины порядка 1.06 и несколько смещается к плоскости симметрии по сравнению с соответствующим максимумом на рис. 3а. В сечении, проходящем через точку R , локальный максимум порядка 0.9 возникает на входном участке 23 канавки. Второй максимум порядка 0.46 наблюдается над концевой частью канавки с некоторым смещением к плоскости симметрии по сравнению с соответствующим максимумом на рис. 3а. За краем 21 и 22 канавки наблюдается локальный минимум $U(z)$ порядка 0.1–0.15. На ближайшем к боковой стенке участке возникают локальные максимумы, имеющие величины порядка 0.3–0.44, причем наибольшая величина скорости достигается в сечении, проходящем через точку L .

Начиная с $y=0.13$, как уже указывалось, профили скорости $U(z)$ в сечениях, проходящих через точки L , C , R 22 канавки, оказались весьма близкими, хотя наблюдаются и некоторые отличия. Так, локальные минимумы $U(z)$ вблизи плоскости симметрии при $y=0.13$ (рис. 3в) находятся в диапазоне изменения от 1.05 до 1.2, причем наибольшая величина U относится к сечению, проходящему через точку C . Максимумы $U(z)$ наблюдаются в продольном сечении, проходящем вблизи точки L . Наибольший из них порядка 1.5 относится к поперечному сечению через точку L , а наименьший порядка 1.43 принадлежит сечению через точку C . Резкое уменьшение $U(z)$ по мере удаления от плоскости симметрии переходит в плавное снижение до величины 0.45, соответствующее концевой части канавки там, где при меньших высотах от стенки наблюдались локальные максимумы $U(z)$. В продольных полосах канала между канавками и боковыми стенками наблюдается локальный максимум $U(z)$, величина которого приближается к 1. Стоит отметить, что локальный минимум $U(z)$ в начале полосы для сечения через центр 22 канавки оказывается порядка 0.6.

В вертикальном сечении $y=0.23$ (рис. 3г) локальные минимумы $U(z)$ вблизи плоскости симметрии находятся в диапазоне 1.45–1.55, причем наименьший из них принадлежит профилю $U(z)$ в сечении через центр 22 канавки. Максимум $U(z)$, равный 1.65, приближается к плоскости симметрии по сравнению со случаем для $y=0.13$. С ростом координаты ($-z$) быстрое уменьшение $U(z)$ переходит в плавное и достигает локального минимума порядка 0.7. Максимум скорости в продольной полосе между канавкой и боковой стенкой приближается к 1.2. Можно отметить, что локальный минимум $U(z)$ в начале канала между боковой стенкой и канавкой достигает 0.8 в сечении через центр 22 канавки.

В вертикальном сечении $y=0.43$ (рис. 3д), близком к среднему сечению канала, максимум $U(z)$ практически располагается в плоскости симметрии и составляет 1.7 для сечений, проходящих через точки L и R , а также 1.78 в сечении через точку C . Почти линейно скорость падает до 0.85 в сечении через точку C

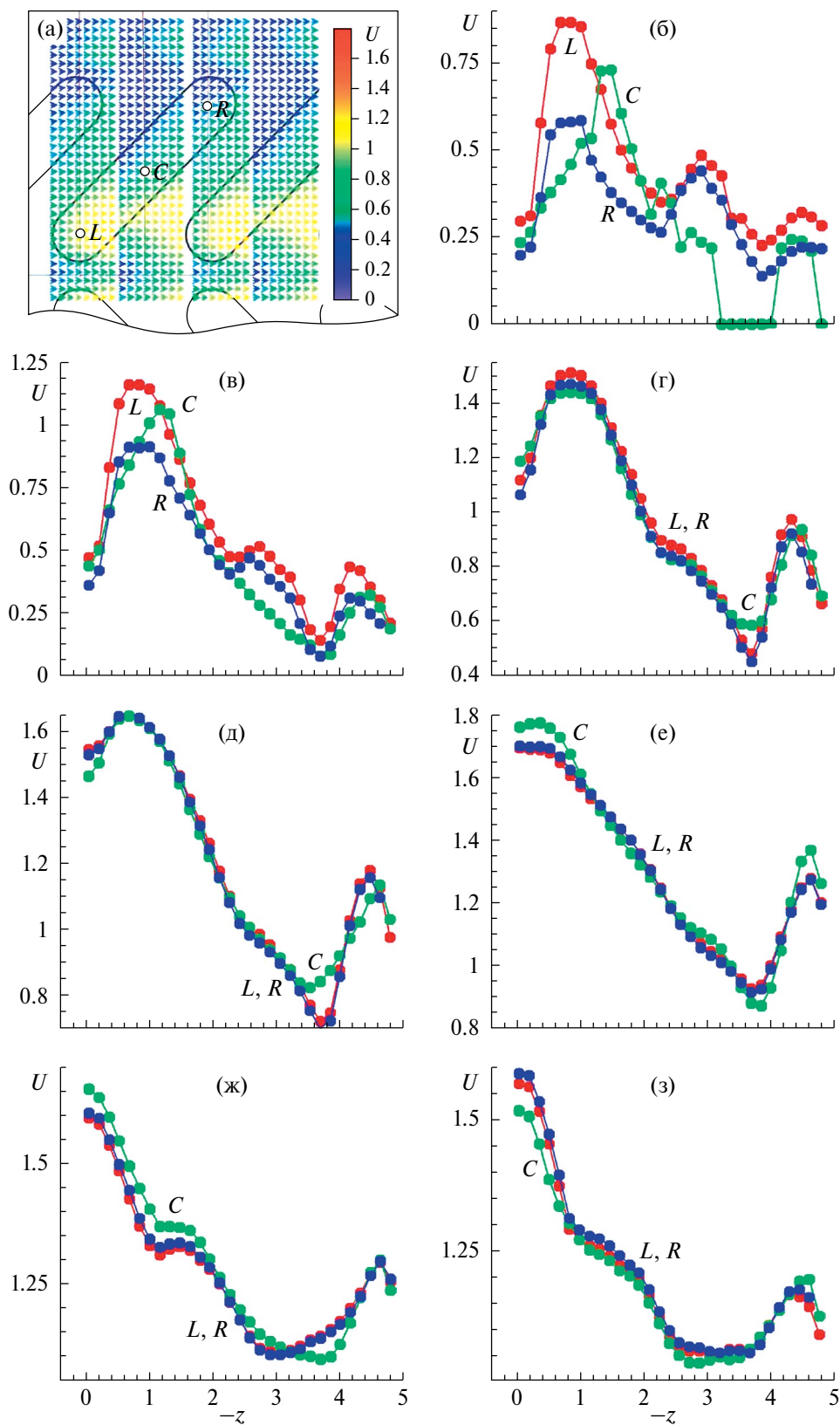


Рис. 3. Векторное поле продольной составляющей скорости U в сечении $y=0.05$ (а) и сравнение измеренных профилей $U(z)$ в трех сечениях L , C , R канала в окрестности 22 канавки при изменении координаты y : б) — $y=0.02$; в) — 0.05 ; г) — 0.13 ; д) — 0.23 ; е) — 0.43 ; ж) — 0.63 ; з) — 0.73 . $Re=1000$.

и до 0.9 в остальных сечениях. Максимум скорости в продольной полосе между канавкой и боковой стенкой приближается к 1.4 в сечении через точку C и к 1.3 для сечений через точки L и R .

В приближающемся к верхней плоской стенке сечении $y=0.63$ (рис. 3е) профиль $U(z)$ в окрестности плоскости симметрии канала носит струйный характер с максимумом 1.65 для поперечного сечения через точку C и 1.6 для остальных рассматриваемых сечений. Быстрое снижение $U(z)$ отмечается примерно до $z=-1$, а затем на протяжении 0.6 скорость почти не меняется, оставаясь в промежутке изменения от 1.3 до 1.36. Дальнейшее уменьшение $U(z)$ продолжается до $z=-3$ и достигает минимума 1.1. Максимум скорости в продольной полосе между канавками и боковыми стенками равен 1.3.

В ближайшем к верхней стенке сечении $y=0.73$ (рис. 3, ж) максимум скорости в срединной плоскости приближается к 1.6 для сечений, проходящих через точки L и R , и к 1.52 для сечения через центр 22 канавки. Профиль скорости $U(z)$ снижается довольно быстро до $z=-1$, а затем с замедлением, достигая минимума, равного 1.05, на дистанции примерно 2.6 от плоскости симметрии. Затем, на расстоянии 1.2 скорость на уровне 1.05 остается близкой к постоянной. Максимум скорости в продольной полосе между канавками и боковыми стенками равен 1.3.

Сравнение измеренных продольных составляющих скорости U в трех поперечных сечениях 22 канавки, проходящих через характерные точки L , C и R , с их численными прогнозами при варьировании расстоянием y от плоского участка нижней структурированной стенки, начиная от 0.02 до 0.73 проводится на трех рисунках 4–6. Экспериментальные точки взяты из рис. 3, а сплошные линии представляют расчетные зависимости $U(z)$. В целом, согласование экспериментальных и расчетных результатов удовлетворительное, но имеются отдельные значительные различия в минимальной величине U в зоне перехода от продольного участка с наклонными канавками к продольной полосе между этим участком и боковой стенкой, а также в максимальной величине U на указанном продольном участке около боковой стенки.

Аномальное отрывное течение и теплообмен в узком канале со структурированной нагретой стенкой анализируются с ростом Re (рис. 7) и характеризуются многократным увеличением экстремальных величин относительного трения f/f_{pl} , перепадов статического давления $P-P_{pl}$, относительной теплоотдачи Nu/Nu_{pl} в продольных сечениях канала, проходящих через центр стыковки сферического сегмента и траншейной части ($z=-0.764$). Параметры с индексами pl определяются в точках на нагретой стенке плоскопараллельного канала с координатами (x, z) , соответствующими точкам на структурированной поверхности.

Подобно численному исследованию [20], по мере удаления от начала структурированного участка канала отрывное течение на входных участках наклонных канавок быстро интенсифицируется, причем с ростом Re наблюдается усиление интенсивности возвратных токов (рис. 7а, б). При $Re=1000$ минимальное относительное трение в донной части канавок уменьшается от -0.5 до -2.4 , при $Re=2000$ — от -0.9 до -6.5 , при $Re=3500$ — от -1.6 до -9.3 , при $Re=5500$ — от -5.8 до -26 . При $Re=2000$ максимальные величины f/f_{pl} на наветренных кромках канавок увеличиваются от 3.3 до 18, а в промежутках между канавками уровень относительного трения растет от 1.55 до 5.

Аномальная интенсификация отрывного течения в наклонных канавках, как известно [14], связана с экстраординарным перепадом давления поперек них в месте перехода от сферического сегмента к траншейной части канавки. Особо следует подчеркнуть, что формирование зон отрицательного статического давления в сферическом сегменте обусловлено генерацией интенсивных смерчеобразных вихревых структур. По мере удаления от входного сечения в начале структурированного участка канала перепады давления в канавках (рис. 7в) быстро нарастают на первых 8 канавках, причем максимум $P-P_{pl}$ для $Re=2000$ на наветренном склоне 8 канавки оказывается порядка 0.25, а минимум на дне -0.13 . На удаленных от входа в канал канавках перепады давления стабилизируются.

Локальное число Нуссельта на структурированной нагретой стенке определяется по нормальному градиенту температуры, отнесенному к разнице между температурой стенки и среднemasсовой температурой в сечении канала, согласно описанной в [32] методике. Циклическое увеличение относительной теплоотдачи Nu/Nu_{pl} по длине канала в продольном сечении входных участков канавок при $z=-0.764$ значительно усиливается по мере роста Re (на рис. 7г, д показаны кривые 1–4 для Re в промежутке от 1000 до 5500). Максимумы относительной теплоотдачи на наветренных кромках канавок быстро увеличиваются и приближаются к стабилизации в конце канала. Для $Re=2000$ $(Nu/Nu_{pl})_{max}$ возрастают от 4 до 30. Внутри канавок на подветренных сторонах наблюдается резкий провал Nu/Nu_{pl} до уровня, не

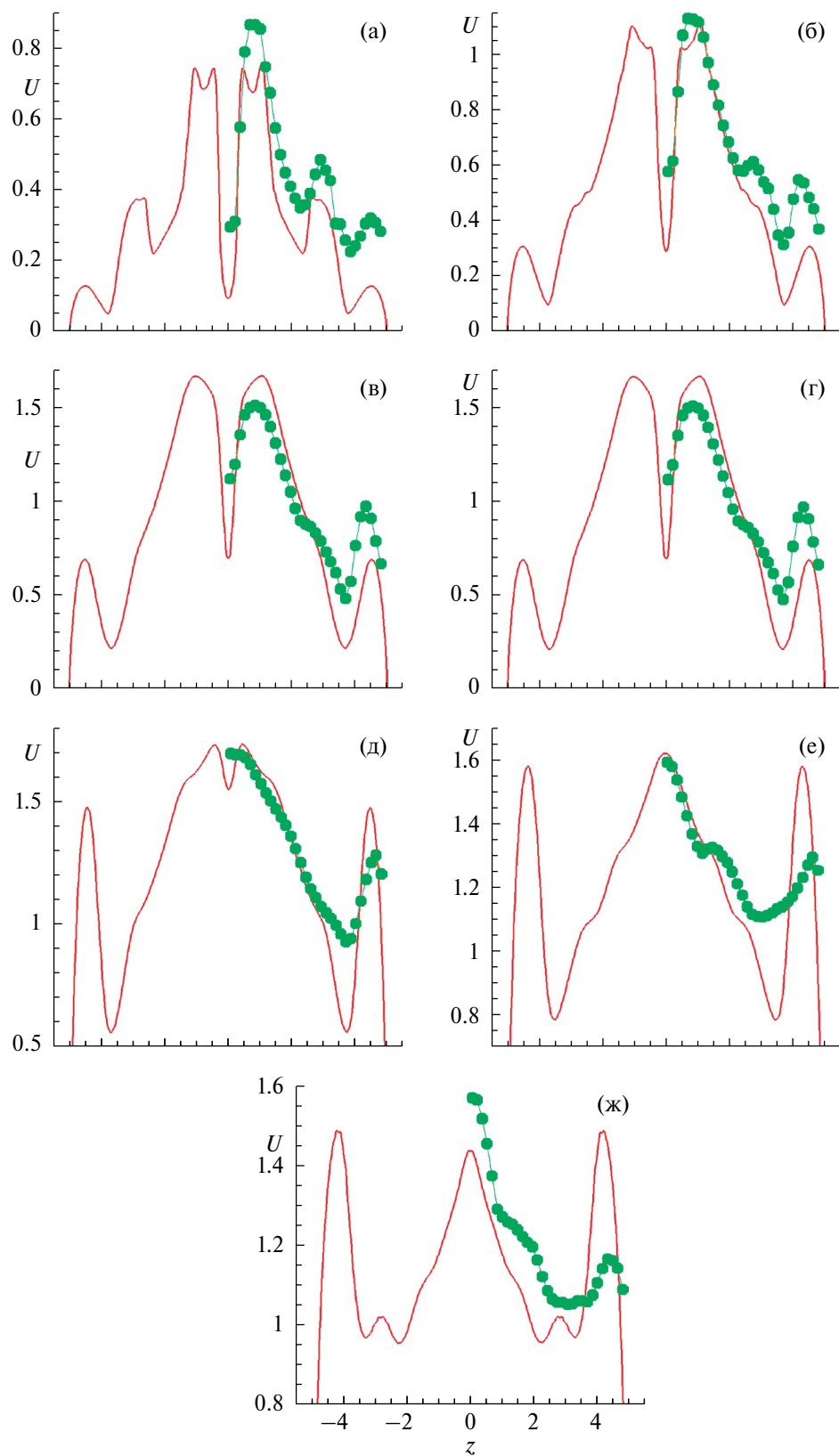


Рис. 4. Сравнение расчетных прогнозов (сплошные линии) и экспериментальных замеров (точки) профилей продольной составляющей скорости U в центре L переходного сечения от входного сферического сегмента к траншейной части: а) — $y=0.02$; б) — 0.05 ; в) — 0.13 ; г) — 0.23 ; д) — 0.43 ; е) — 0.63 ; ж) — 0.73 . $Re=1000$.

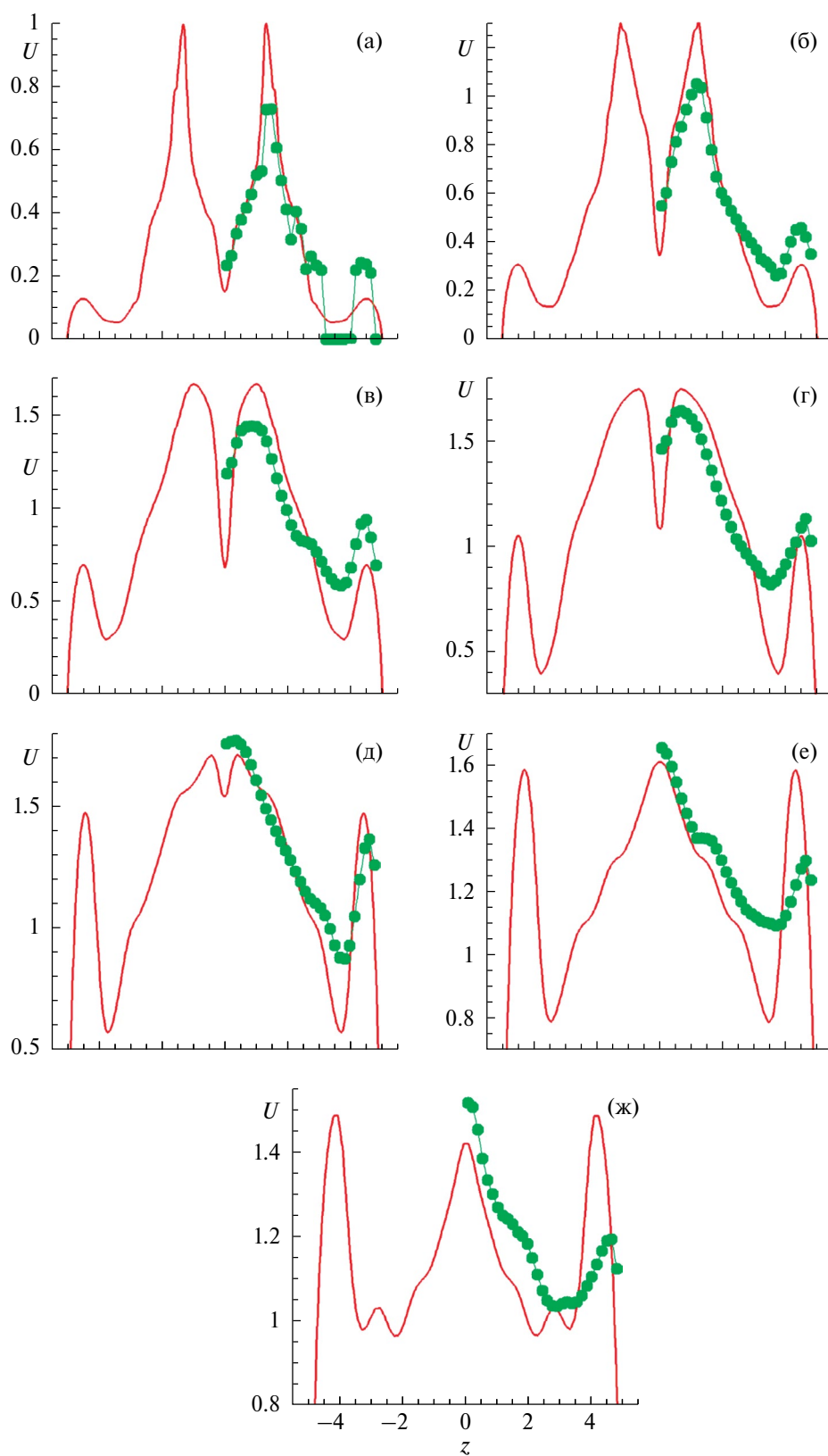


Рис. 5. Сравнение расчетных прогнозов (сплошные линии) и экспериментальных замеров (точки) профилей продольной составляющей скорости U в центре C 22-й канавки: а) — $y=0.02$; б) — 0.05 ; в) — 0.13 ; г) — 0.23 ; д) — 0.43 ; е) — 0.63 ; ж) — 0.73 . $Re=1000$.

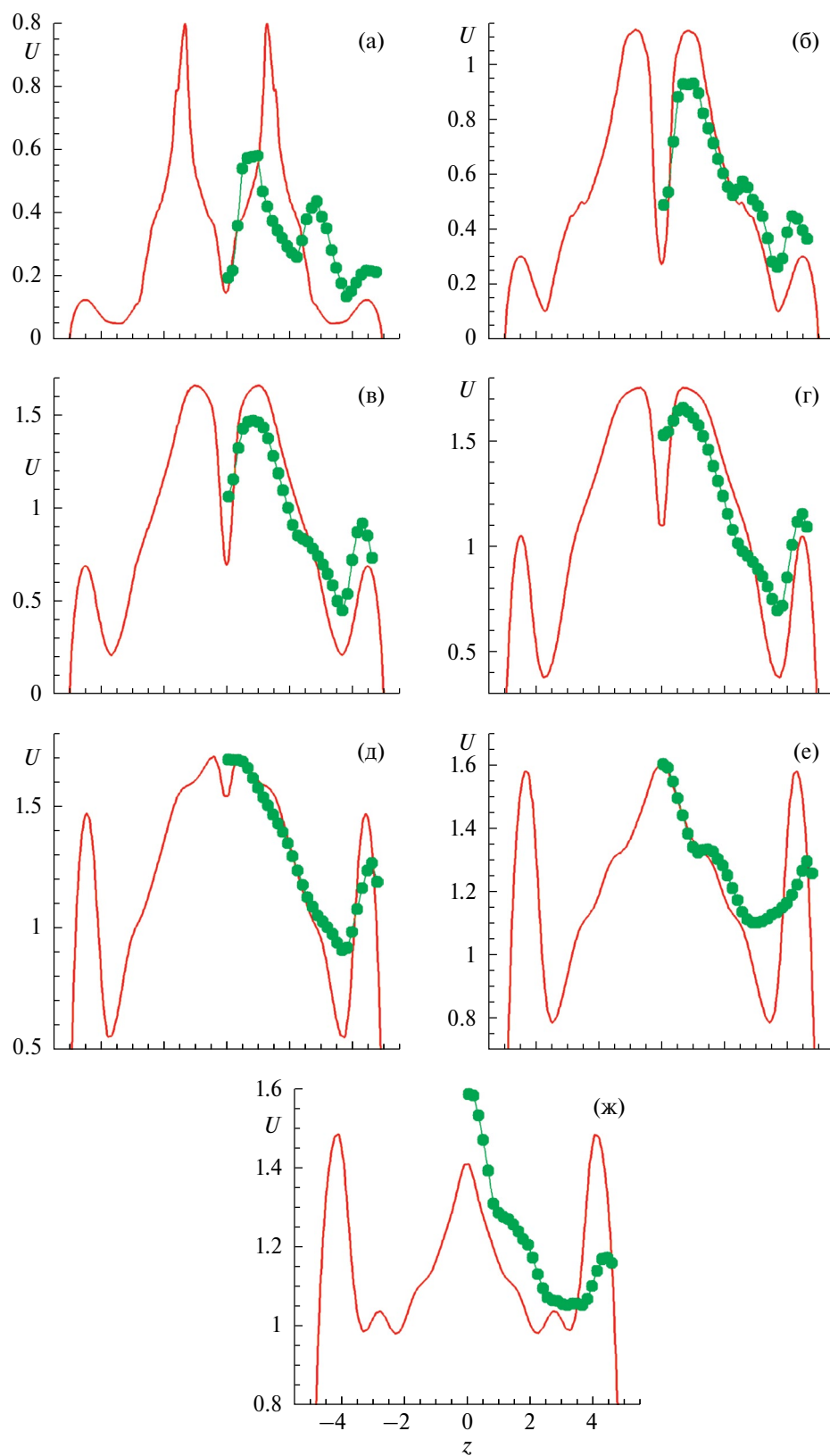


Рис. 6. Сравнение расчетных прогнозов (сплошные линии) и экспериментальных замеров (точки) профилей продольной составляющей скорости U в центре R переходного сечения от траншейной части и выходному сферическому сегменту: а) — $y=0.02$; б) — 0.05 ; в) — 0.13 ; г) — 0.23 ; д) — 0.43 ; е) — 0.63 ; ж) — 0.73 . $Re=1000$.

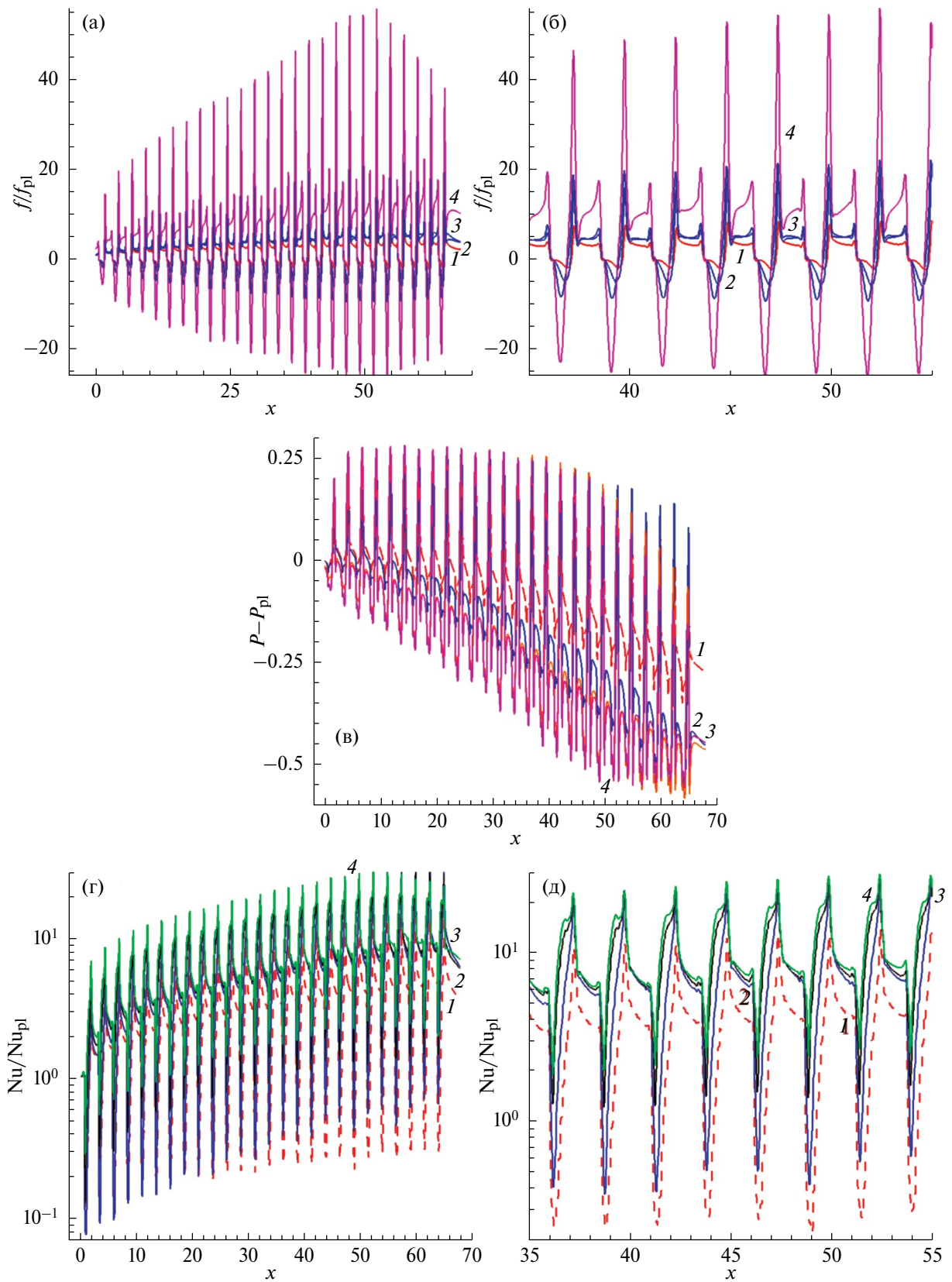


Рис. 7. Влияние Re на распределения относительного трения f/f_{pl} (а, б), перепада давления $P - P_{pl}$ (в), относительного числа Нуссельта Nu/Nu_{pl} (г, д) в сечении канала $z = -0.764$ (в): 1 – $Re = 1000$; 2 – 2000; 3 – 3500; 4 – 5500.

превышающего 0.7 в конце канала. В промежутках между канавками относительная теплоотдача уменьшается, но ее средний уровень растет по длине канала, достигая величин порядка 8 для $Re=2000$.

На рис. 8а, б анализируется влияние Re на распределения $U(x)$ вблизи стенки на высоте $y=0.005$ в продольном сечении канала $z=-0.764$. Осцилляции продольной составляющей скорости с нарастанием локальных максимумов над канавками по мере удаления от входа в канал сохраняются на двух рассмотренных участках канала от 0 до 25 и от 30 до 65. На первом ближайшем к входу участке наблюдается интенсификация ламинарного потока в пристеночном слое канала над входами в канавки, причем локальные максимумы монотонно возрастают с ростом Re . Например, для $Re=5500$ к шестой канавке $U_{\max}$ увеличивается с 0.8 до 1.05. На втором участке канала протяженностью от 30 до 65 происходит трансформация потока с незначительным снижением локальных максимумов по мере роста Re свыше 2500 (кривые 3). При этом $U_{\max}$ для $Re=2500$ достигает к концу участка величины 1.4. Отмеченное выше снижение $U_{\max}$ усиливается с ростом Re . Так для $Re=5500$ к концу участка $U_{\max}$ уменьшается от наибольшей величины 1.3 до 1.1.

Распределения проинтегрированных по поперечным и продольным полосам относительных чисел Нуссельта Num/Num_{pl} характеризуют удельную тепловую эффективность структурированных энергоэффективных поверхностей узкого канала (рис. 8в–г). По длине канала она нарастает от канавки к канавке по мере удаления от входа в канал. Минимумы Num/Num_{pl} приходятся на проекции подветренных склонов канавок, а максимумы – на наветренные склоны и промежутки между канавками. Осцилляции $Num/Num_{pl}(x)$ возрастают по длине канала для чисел Рейнольдса от 1000 до 2000. При $Re=2500$ после 21 канавки наблюдается стабилизация максимумов Num/Num_{pl} на уровне 6.8, а при $Re=3500$ – на уровне 7.7. При $Re=5500$ после достижения к 21 канавке максимума Num/Num_{pl} на уровне 10.5 следует снижение его до 8.5 в конце канала. Распределения Num/Num_{pl} по поперечной координате z характеризуются двумя максимумами в окрестностях боковых стенок канала, величины которых существенно возрастают с увеличением Re . Так $(Num/Num_{pl})_{\max}$ растет почти вдвое при изменении Re от 1000 до 2500, превосходя 6. При $Re=5500$ $(Num/Num_{pl})_{\max}$ достигает 7.7. Минимальная удельная тепловая эффективность наблюдается в середине канала, причем с ростом Re до 5500 она выходит на уровень 2.3. Сравнение распределений Num/Num_{pl} в окрестности 22 канавки при различных числах Рейнольдса проводится вдоль координаты x^* , измеренной от центра 21 канавки, и поперечной координаты z (рис. 8д, е). При $Re=1000$ максимум осредненной по поперечной координате относительной теплоотдаче с величиной порядка 2.5 располагается вблизи координаты центра 22 канавки. С ростом Re $(Num/Num_{pl})_{\max}$ заметно увеличивается – до 6 при $Re=2500$ и 8 при $Re=5500$, а также смещается к полосе, проходящей через точку L 22 канавки. Осредненные по длине участка 22 канавки относительные тепловые нагрузки поперек канала на рис. 8е демонстрируют более высокие, чем на рис. 8г, уровни. Так, $(Num/Num_{pl})_{\max}$ при $Re=1000$ приближается к 5, а при $Re=2500$ и 5500 достигает 10 и 12.5 соответственно. Также следует отметить смещение максимума к плоскости симметрии (к поперечной координате точки L) по мере роста Re .

Ускорение воздушного потока в канале с двумя рядами из 26 канавок, расположенных на нагретой стенке под углами наклона входных частей канавок $\pm 45^\circ$, рассматривается при числах Рейнольдса от 1000 до 5500 (рис. 9а–е). Анализируются профили скорости $U(z)$ на высоте $y=0.43$ от стенки в поперечных сечениях через центры 1, 5, 10, 15, 20 и 25 канавки. При всех Re в срединном сечении первой канавки профиль $U(z)$ в ядре потока мало отличается от равномерного, хотя следует отметить, что величина U по мере увеличения Re заметно снижается. Если при $Re=1000$ скорость в ядре примерно равняется 1.25, то к 5500 она уменьшается до 1.1. Профили скорости в пристеночной зоне при $Re=1000$ стабилизируются, начиная с сечения 15 канавки. Формируется течение у боковой стенки с максимумом скорости, приближающимся к 1.45, и минимумом порядка 0.6. Как уже отмечалось, максимум скорости пристеночного потока реализуется в продольном канале между боковой стенкой и канавками, а минимум скорости – над концевыми участками канавок. С 10 по 15 канавку в центральной продольной области канала близкий к равномерному поток ускоряется в зоне с поперечным размером 4, достигая величины скорости порядка 1.55. Развитие течения за 15 канавкой характеризуется возникновением растущих максимумов скорости U над местами сопряжения входных сферических сегментов с траншейными участками. Для 25 канавки величина максимумов скорости приближается к 1.75. При этом в плоскости симметрии наблюдается локальный минимум, величина которого не меняется с 15 канавки и равна примерно 1.53.

При умеренных числах Рейнольдса в промежутке 1000–2000 (рис. 9а–в) максимумы скорости вблизи боковых стенок сохраняются на уровне 1.4, а с $Re=2500$ постепенно убывают до величин порядка 1. Пристеночные профили $U(z)$ в продольных полосах канала около боковых стенок, в том числе над концевыми

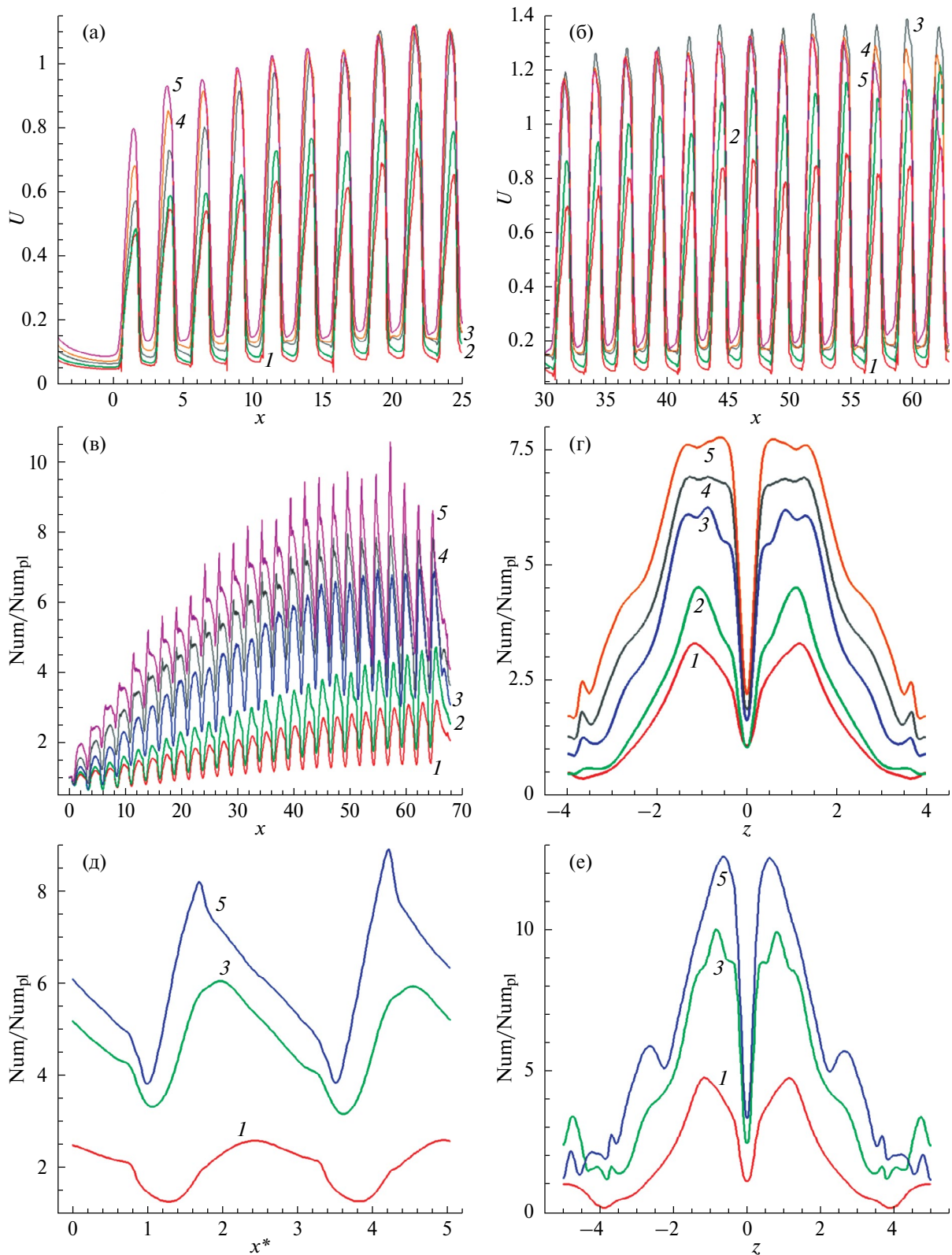


Рис. 8. Влияние числа Рейнольдса Re на корреляцию локального ускорения потока $U(x)$ на расстоянии $y=0.005$ в продольном сечении канала $z=-0.764$ (а, б) и распределения осредненных по поперечным полосам относительных чисел Нуссельта Num/Num_{pl} вдоль (в, д) и поперек (г, е) канала (в, г) и участка 22 канавки (д, е): 1 – $Re=1000$; 2 – 1500; 3 – 2500; 4 – 3500; 5 – 5500.

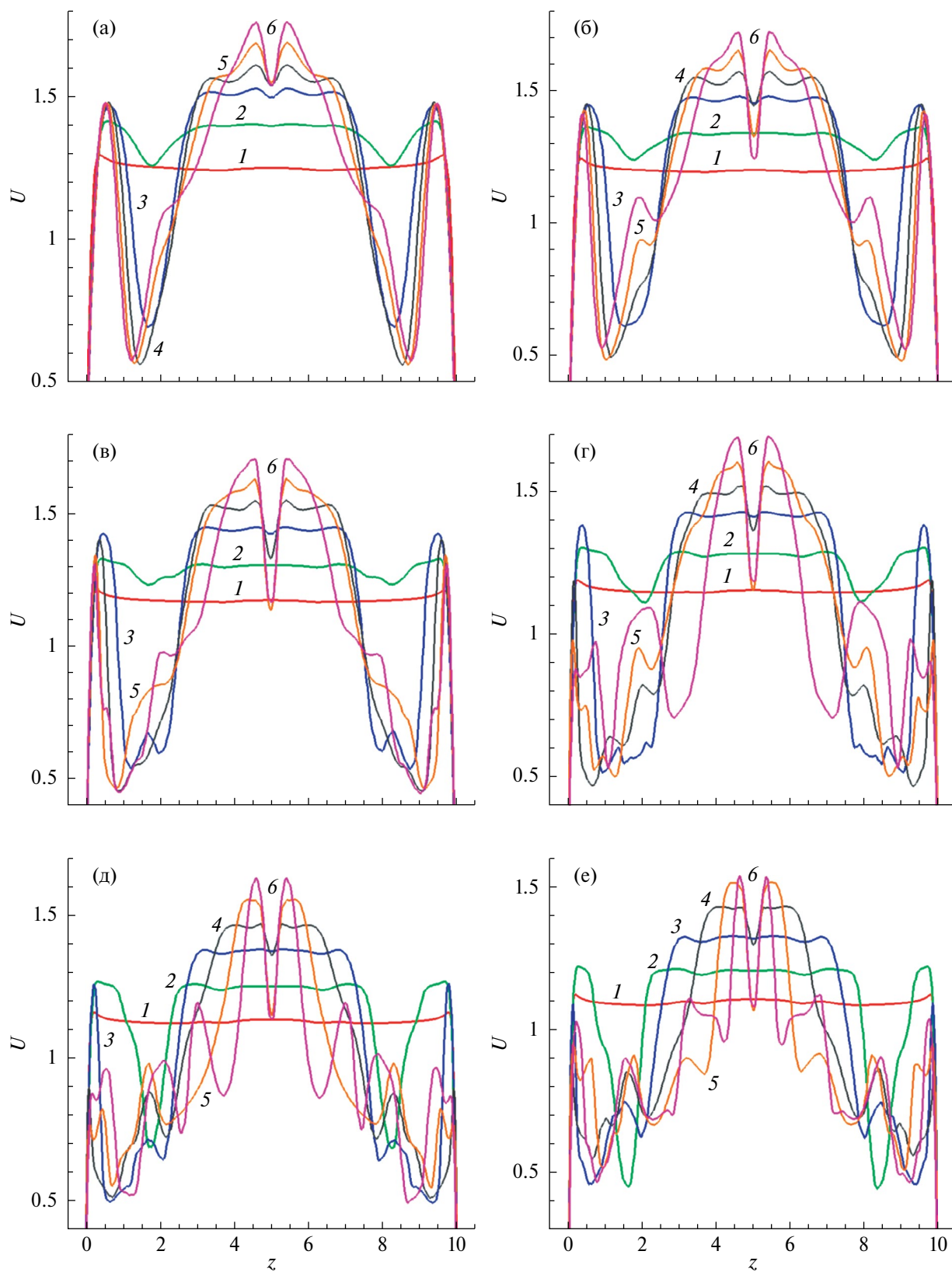


Рис. 9. Влияние числа Рейнольдса на эволюцию профилей $U(z)$ в срединных поперечных сечениях 1–1, 5–2, 10–3, 15–4, 20–5 и 25–6 канавок в канале при фиксированной координате $y=0.43$: а) – $Re=1000$; б) – 1500; в) – 2000; г) – 2500; д) – 3500; е) – 5500.

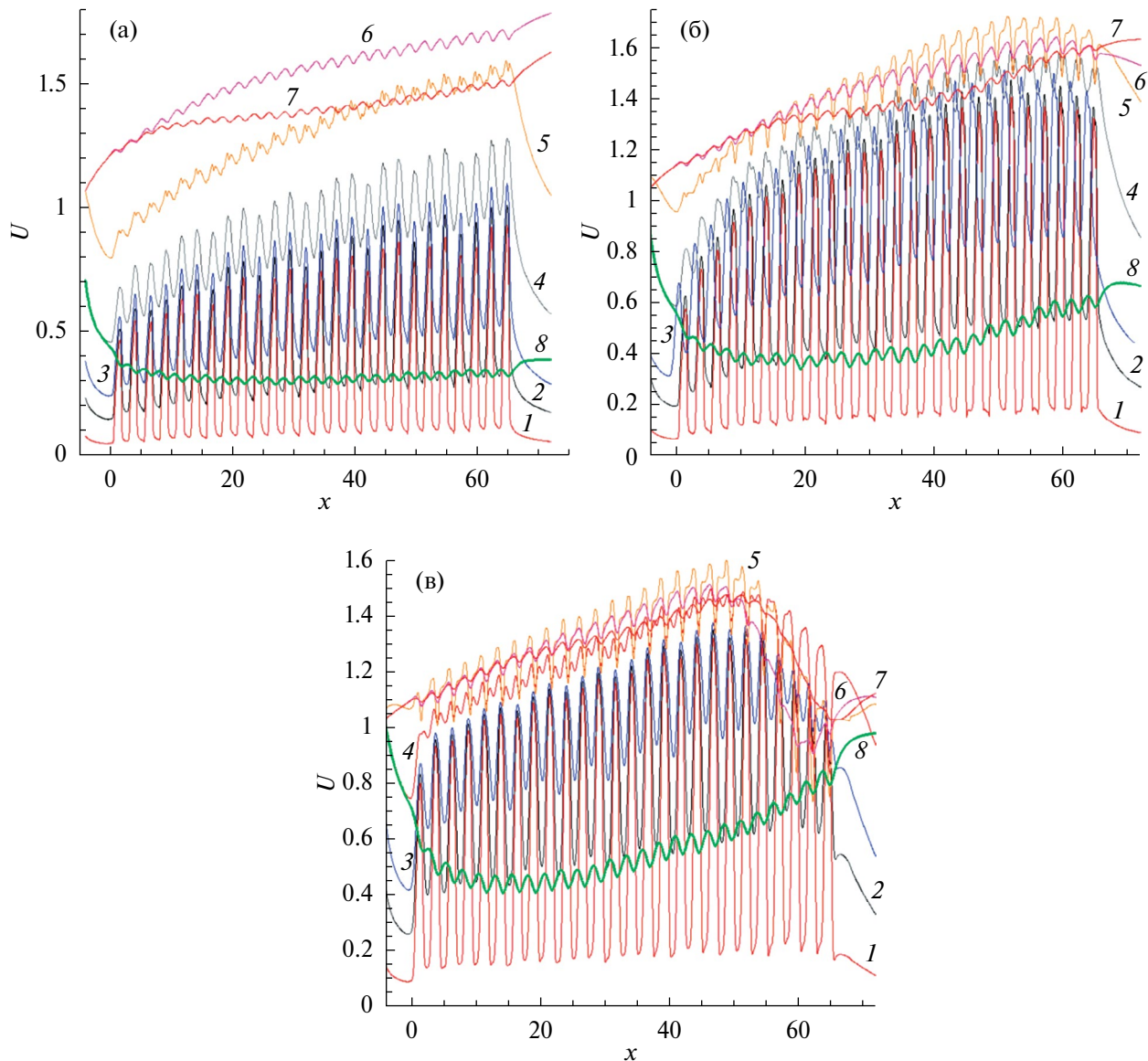


Рис. 10. Иллюстрирующие локальное ускорение потока в ядре по мере отхода от входного сечения распределения скорости $U(x)$ в продольном сечении канала, проходящем через центры сечений стыковки сферических сегментов и цилиндрических траншей L , при различных y от 0.005 до 0.95 для $Re=1000$ (а), 2500 (б), 5500 (в): 1 – $y=0.005$; 2 – 0.015; 3 – 0.025; 4 – 0.05; 5 – 0.1; 6 – 0.4; 7 – 0.6; 8 – 0.95.

участками наклонных канавок имеют достаточно сложный волнистый характер. В центральной продольной области канала до 10 канавки $U(z)$ формируется равномерное ядро потока, причем протяженность плато по мере роста Re сокращается. С 15 канавки в плоскости симметрии образуется минимум, уменьшающийся по мере удаления от входа. Минимум U достигает 1.1 при $Re=5500$. Максимумы скорости в центральной зоне с ростом Re монотонно снижаются с величины порядка 1.7 для $Re=1500-2000$ до 1.5 для $Re=5500$.

Зависимости $U(x)$ на разных удалениях от нижней стенки канала в продольном сечении при $z = -0.764$ для $Re=1000$ (рис. 10а) имеют осциллирующий характер с нарастающими быстрым темпом в начале структурированного участка экстремальными величинами по мере удаления наклонных канавок от входа и уменьшением амплитуды колебаний с ростом y , особенно быстрым при $y > 0.05$. При $y=0.005$ амплитуда колебаний U возрастает от 0.4 до 0.82 от первой до 26 канавки, а при $y=0.05$ она составляет от 0.15

до 0.25. При y свыше 0.1 амплитуды значительно снижаются и не слишком изменяются вдоль канала, находясь в диапазоне 0.03–0.05.

Следует отметить, что минимумы U соответствуют плоским участкам между последовательно расположенными канавками, а максимумы U наблюдаются над серединами канавок. Наибольшая интенсификация течения в ядре потока по сравнению со скоростью на входе происходит при $y=0.43$ — $U_{\max}$ достигает величин порядка 1.7. При y свыше 0.4 $U_{\max}$ постепенно снижается, приближаясь к 0.33 при $y=0.95$.

С ростом Re до 2500 (рис. 10б) происходит значительное увеличение амплитуды колебаний U и локальных максимумов U над канавками на расстояниях y от 0.005 до 0.1, причем при $y=0.1$ $U_{\max}$ достигает величины 1.7. Локальные максимумы $U(x)$ при $y=0.4$ оказываются несколько меньше, чем для $Re=1000$. Также интересно отметить подъем $U(x)$ при $y=0.95$ по мере развития течения во второй половине канала.

И, наконец, для $Re=5500$ (рис. 10в) наблюдается существенная трансформация течения во второй половине канала, связанная с довольно резким уменьшением локальных максимумов U . Наибольшие величины $U_{\max}$ отмечаются при $y=0.1$, причем на выходе из канала они падают почти до 1 с 1.6 в середине канала. При $y=0.95$ $U(y)$ заметно подрастает во второй половине канала, приближаясь к 1.

Влияние числа Рейнольдса на динамику распределений относительных тепловых нагрузок $Num/Num_{pl}(s)$ и $Num/Num_{pl}(t)$, осредненных по поперечным полосам вдоль и поперек прямоугольных участков, которые ограничены контурами 1, 5, 10, 15, 20 и 25 канавок на стенке канала, анализируется на рис. 11. Здесь s и t — координаты, связанные со срединным сечением наклонной канавки и поперечным сечением перехода от входного сферического сегмента к траншейной вставке. При $Re=1000$ в первой канавке Num/Num_{pl} вдоль s оказывается заметно ниже 1 (рис. 11а, б). Лишь в узкой зоне на наветренном склоне $Num/Num_{pl}(t)$ превосходит 1 с максимумом порядка 2.5 на кромке. Однако начиная с 5 канавки максимальные $Num/Num_{pl}(s)$ во входной части канавок превышают 1, доходя до 4 в 25 канавке. $Num/Num_{pl}(t)$ в достигает 8.5, но в подветренной части канавки не превосходит 1. С ростом числа Рейнольдса до 2500 в первой канавке $Num/Num_{pl}(s)$ немного превосходит единицу во входной части, но в концевой части теплообмен оказывается угнетенным (рис. 11в, г). Тем не менее, в 5 канавке максимум $Num/Num_{pl}(s)$ достигает уровня, характерного для 25 канавки при $Re=1000$, а к концу канала $(Num/Num_{pl}(s))_{\max}$ приближается к 11. Поперек первой канавки в подветренной зоне $Num/Num_{pl}(t)$ меньше 1. Однако к 25 канавке в этой зоне возникает локальный максимум на уровне 4, а на наветренном склоне к острой кромке $Num/Num_{pl}(t)$ подрастает до 16.5. Для числа Рейнольдса 5500 наибольшие относительные тепловые нагрузки наблюдаются в 20 канавке, в которой максимум $Num/Num_{pl}(s)$ достигает 14.5. В 25 канавке максимум снижается до 13 (рис. 11д, е). В 15 и 20 канавках $Num/Num_{pl}(t)$ достигает 19 на наветренной кромке.

Подобно [32], где анализируется интенсификация турбулентного теплообмена в канале с однорядным плотным пакетом наклонных канавок, здесь рассматривается усиление ламинарного отрывного течения в наклонных канавках по мере удаления от входа в канал и влияние на него числа Рейнольдса (рис. 12). Эволюция профилей декартовых составляющих скорости U , V , W в центрах стыков входных сферических сегментов и траншейных частей 1 (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 (5) и 25 (6) канавок при $Re=1000$, 2500 и 5500 демонстрирует ускорение потока по мере приближения к концу канала и интенсификацию отрывного течения на входных участках канавок. При числе Рейнольдса 1000 ламинарное отрывное течение не отличается высокой интенсивностью. Так, максимальная скорость вторичного потока в 25 канавке составляет 20% от скорости на входе в канал (рис. 12в). $U(y)$ при этом приближается к максимальной скорости порядка 1.8 в пристеночном слое на высоте $y=0.2$ (рис. 12а). Интересно отметить, что внутри канавок возникает усиливающийся к концу канала восходящий поток, а в пристеночном слое около структурированной стенки усиливается нисходящий поток (рис. 12б). С ростом Re значительно возрастают максимальные абсолютные величины скорости вторичного закрученного потока. Так, при умеренном $Re=2500$ $-W_{\min}$ приближается к 0.6 в 25 канавке, а при высоком $Re=5500$ она достигает 0.75 (рис. 12е, и). Максимальные абсолютные величины скорости возвратных токов $-U_{\min}$ при $Re=2500$ оказываются порядка 0.5 в 25 канавке, а при $Re=5500$ приближаются к 0.55 (рис. 12г, ж). Максимумы $U(y)$ для всех канавок с ростом Re приближаются к структурированной стенке, т.е. пристеночный слой над входными участками канавок утончается. По мере отхода от входа в канал течение в его ядре интенсифицируется, причем имеет место заметное выравнивание профилей $U(y)$. С ростом Re максимумы U снижаются, в частности до 1.5 при $Re=5500$ (рис. 12г). С возрастанием Re восходящий поток внутри канавок ослабевает, а при $Re=5500$ и вовсе исчезает. Интенсивность нисходящего потока увеличивается, достигая минимальной величины -0.2 в 15 канавке при $Re=2500$ и -0.3 при $Re=5500$ (рис. 12д, з).

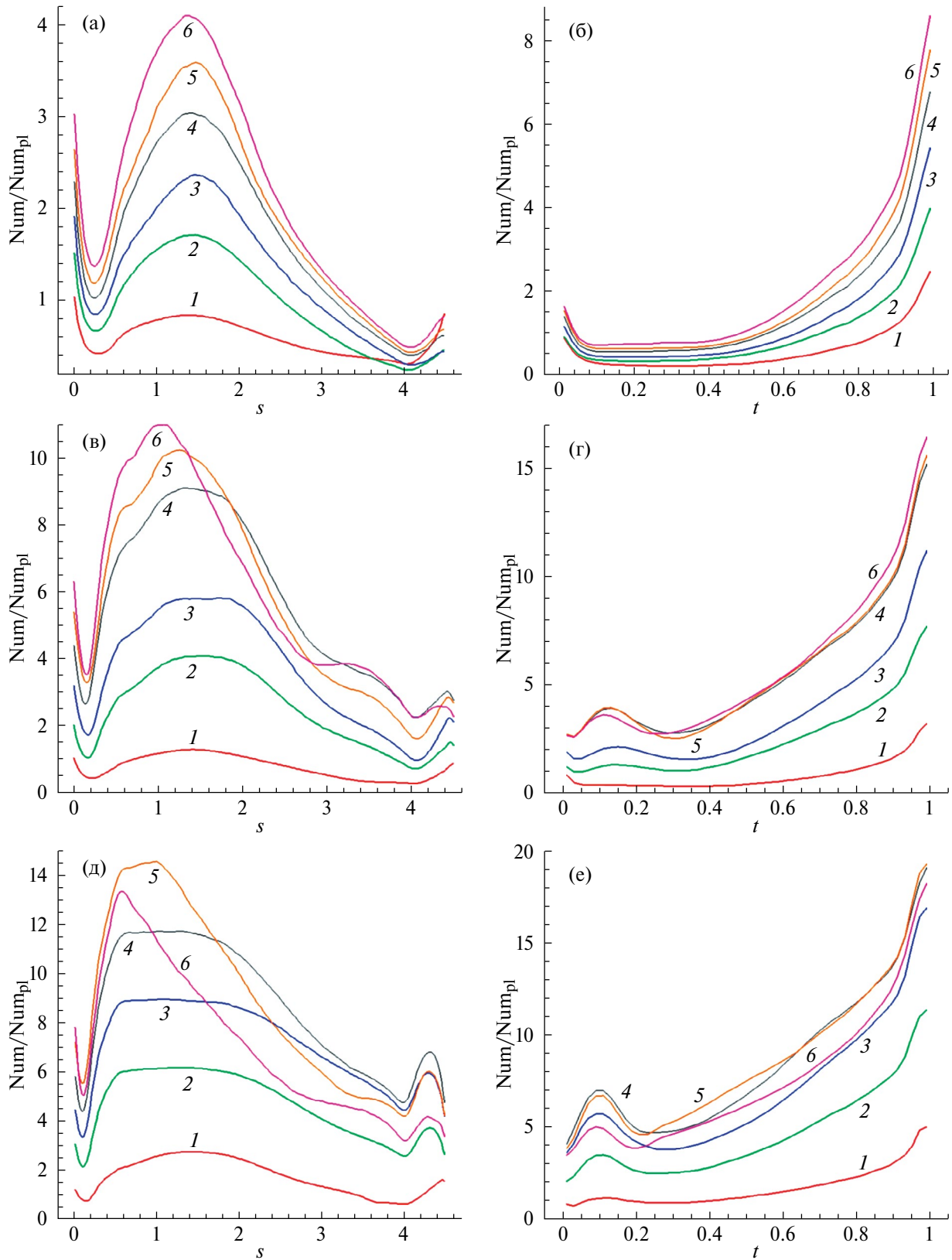


Рис. 11. Сравнение осредненных по поперечным полосам чисел Нуссельта Num/Num_{pl} вдоль (а, в, д) и поперек (б, г, е) участков, ограниченных контурами 1 (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 (5) и 25 (6) канавок, при числах Рейнольдса 1000 (а, б), 2500 (в, г), 5500 (д, е).

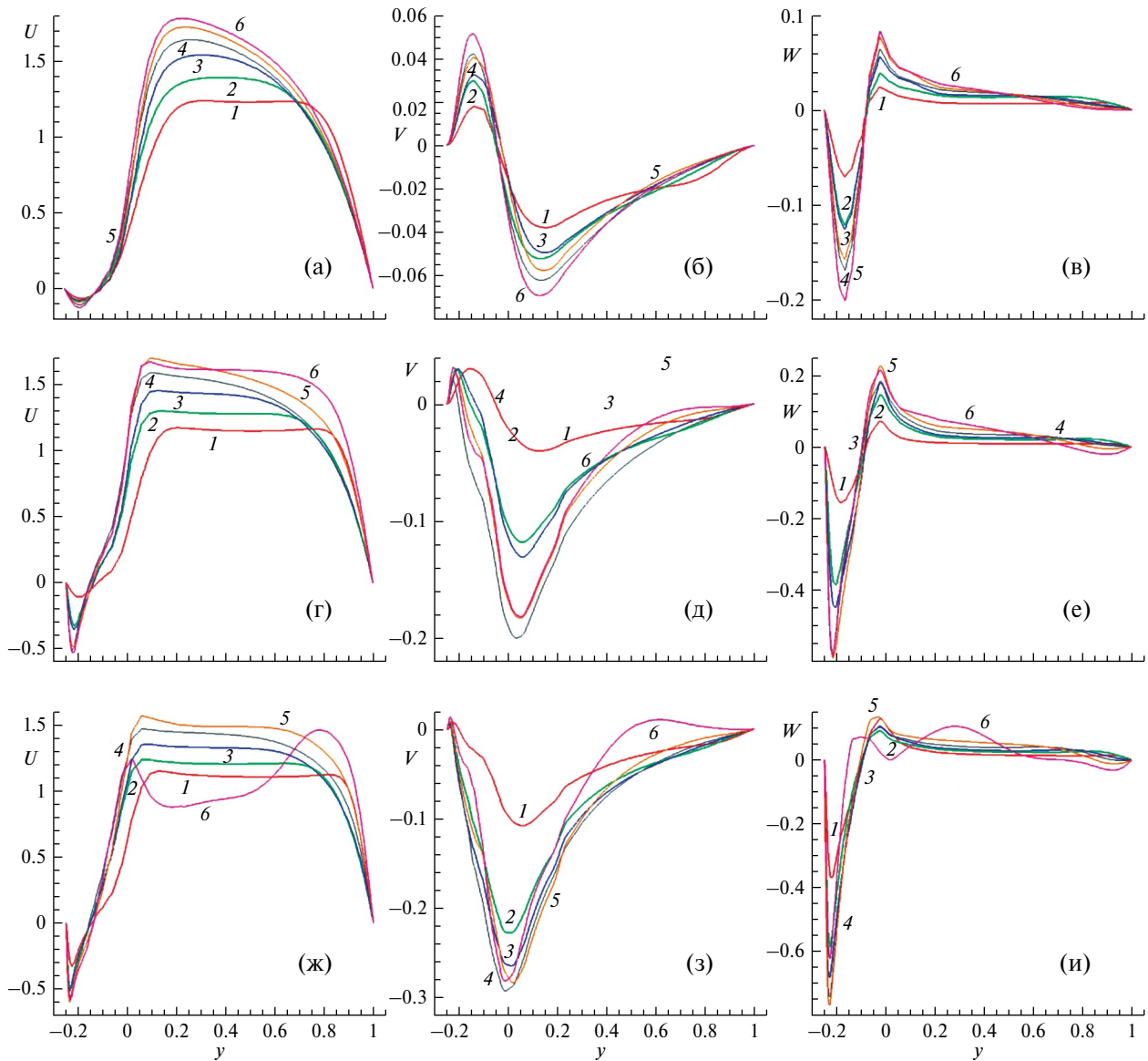


Рис. 12. Сравнение профилей декартовых составляющих скорости U (а, г, ж), V (б, д, з), W (в, е, и) в центрах стыков входных сферических сегментов и траншейных частей 1 (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 (5) и 25 (6) канавок при числах Рейнольдса 1000 (а, б, в), 2500 (г, д, е), 5500 (ж, з, и).

Влияние числа Рейнольдса в диапазоне от 1000 до 5500 на эволюцию локальных характеристик течения и теплообмена внутри канавок рассматривается на примере 22 канавки (рис. 13). Сравниваются распределения относительного трения f/f_{pl} , перепада статического давления $P-P_{pl}$ и относительного числа Нуссельта Nu/Nu_{pl} вдоль срединного сечения канавки по координате s , измеренной от входной кромки (рис. 13а, в, д). Также указанные характеристики сравниваются в сечении перехода от входного сферического сегмента и траншейного участка вдоль координаты t , измеренной от подветренной кромки. Следует указать, что перепад давления $P-P_{pl}$ нормализуется, т.е. при $t=0.2$ все кривые проходят через нуль. Течение и теплообмен при $Re=1000$ малоинтенсивные, особенно в сравнении с более высокими числами Рейнольдса. При умеренном числе Рейнольдса 2500 минимальное относительное трение в срединном сечении достигает -4 , а в поперечном переходном сечении приближается к -10 . При высоком числе Рейнольдса эта характеристика падает до -22 в срединном и до -16 в поперечном сечении. Минимальное отрицательное давление на входной кромке канавки снижается по мере роста Re , в поперечном

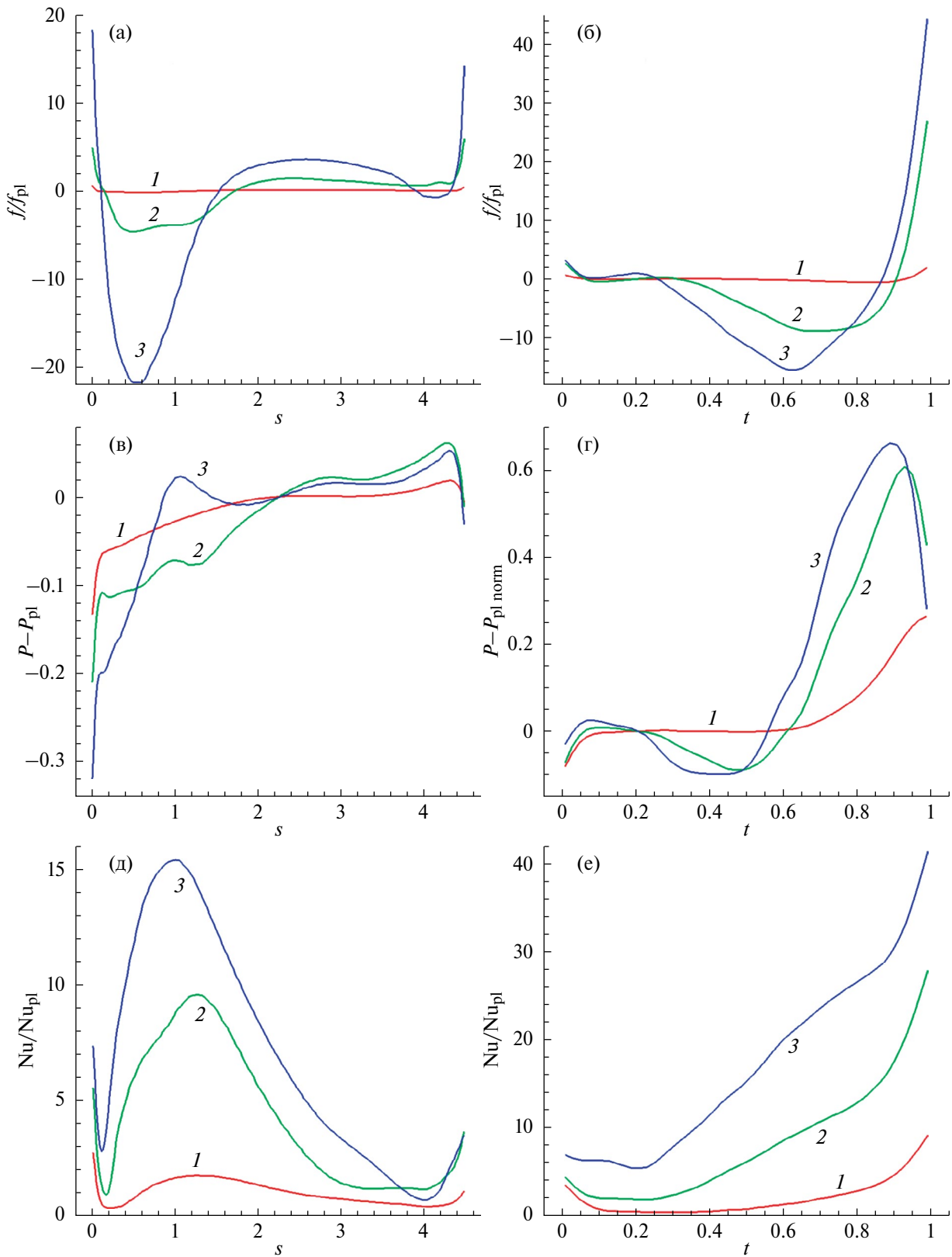


Рис. 13. Сравнение распределений f/f_{pl} (а, б), $P-P_{pl}$ (в, г) и Nu/Nu_{pl} (д, е) в срединном продольном сечении (а, в, д) и характерном сечении стыковки входного сферического сегмента и траншейной части 22 канавки (б, г, е) при различных числах Re: 1 – Re=1000; 2 – 2500; 3 – 5500.

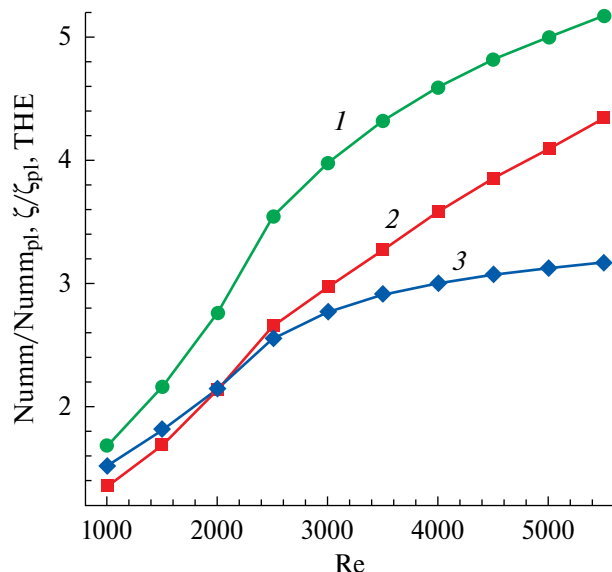


Рис. 14. Влияние числа Рейнольдса на $\text{Numm}/\text{Numm}_{\text{pl}} - 1$, $\zeta/\zeta_{\text{pl}} - 2$, $\text{THE} = (\text{Numm}/\text{Numm}_{\text{pl}})/(\zeta/\zeta_{\text{pl}})^{1/3} - 3$.

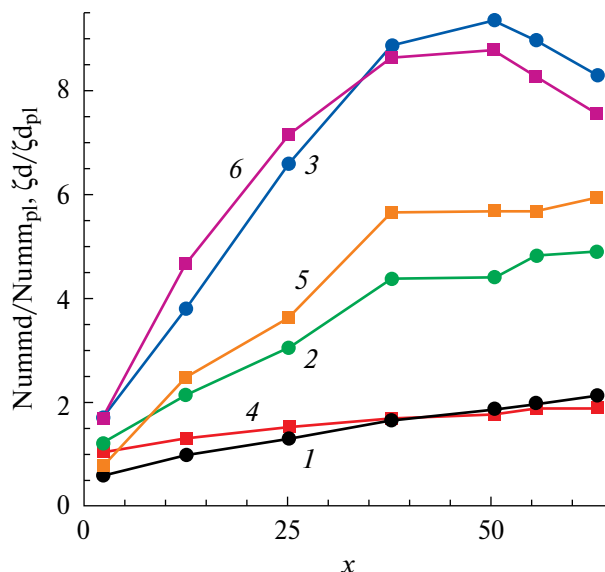


Рис. 15. Влияние Re на относительную теплоотдачу от участков, ограниченных контурами 1, 5, 10, 15, 20, 25 канавок, $\text{Nummd}/\text{Nummd}_{\text{pl}}$ (1, 2, 3) и гидравлические сопротивления секций канала, соответствующим их границам, $\zeta_d/\zeta_{d_{\text{pl}}}$ (4, 5, 6).

переходном сечении формируется экстраординарный перепад давления с максимумом 0.6 и минимумом -0.1 при $\text{Re}=2500$. Максимальная величина $\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{pl}}$ в срединном сечении на входном участке канавки увеличивается с 9.5 при $\text{Re}=2500$ до примерно 15 при $\text{Re}=5500$. При этом на наветренной кромке $\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{pl}}$ приближается к 30 при $\text{Re}=2500$ и превосходит 40 при $\text{Re}=5500$. Обращает на себя внимание в последнем случае довольно высокий уровень $\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{pl}} = 6$ на подветренной стороне канавки.

Проинтегрированные по поверхности структурированного участка канала $\text{Numm}/\text{Numm}_{\text{pl}}$ определяют тепловую эффективность энергоэффективной стенки, а относительные коэффициенты гидравлических потерь ζ/ζ_{pl} , рассчитанные по методике [30], связаны с перепадом полного давления (рис. 14). Обе прогнозируемые характеристики отличаются возрастанием по закону, близкому к квадратичному, с ростом Re в диапазоне до $\text{Re}=2500$ и по линейному закону для Re свыше 2500. Наблюдается преобладающий рост $\text{Numm}/\text{Numm}_{\text{pl}}(\text{Re})$ по сравнению с $\zeta/\zeta_{\text{pl}}(\text{Re})$. 3.5-кратное увеличение $\text{Numm}/\text{Numm}_{\text{pl}}$ для $\text{Re}=2500$ сопровождается 2.6 кратным повышением ζ/ζ_{pl} . Для $\text{Re}=5500$ $\text{Numm}/\text{Numm}_{\text{pl}}$ достигает наибольшего значения 5.2 при $\zeta/\zeta_{\text{pl}} = 4.3$. Теплогидравлическая эффективность определяется зависимостью $\text{THE} = (\text{Numm}/\text{Numm}_{\text{pl}})/(\zeta/\zeta_{\text{pl}})^{1/3}$, и практически при всех Re она превосходит 1, достигая 3 при $\text{Re}=5500$. Однако следует отметить, что при $\text{Re}=1000$ она оказывается меньше 1 из-за значительного гидравлического сопротивления.

Интересно проанализировать влияние Re на изменение относительных тепловых нагрузок на внутренние поверхности канавок по мере их удаления от входа в канал (рис. 15). Нагрузки рассчитываются по прямоугольным участкам, ограниченными контурами 1, 5, 10, 15, 20 и 25 канавок. В целом, по мере удаления канавки от входа теплоотдача от внутренней поверхности возрастает, причем она растет тем интенсивнее, чем выше число Рейнольдса. Максимальная тепловая эффективность при $\text{Re}=2500$ наблюдается в 25 канавке и приближается к 5, а при $\text{Re}=5500$ она превышает 9 в 15 канавке. Относительные гидравлические потери незначительно отличаются от тепловой эффективности при $\text{Re}=1000$ и 5500.

Интенсификация отрывного ламинарного течения в канале со структурированной стенкой с ростом Re иллюстрируется поведением экстремальных величин декартовых составляющих скорости возвратных токов в верховьях канавок ($-U_{\text{min}}$), восходящих V_{max} потоков во входных частях канавок, вторичных закрученных потоков W_{max} , формирующихся внутри канавок (рис. 16). Абсолютная скорость возвратных токов ($-U_{\text{min}}$) монотонно увеличивается от 0.2 до 0.67 с ростом Re от 1000 до 5500. Максимальная скорость вторичного течения в канавках W_{max} довольно быстро возрастает от 0.75 до 1.25 в промежутке

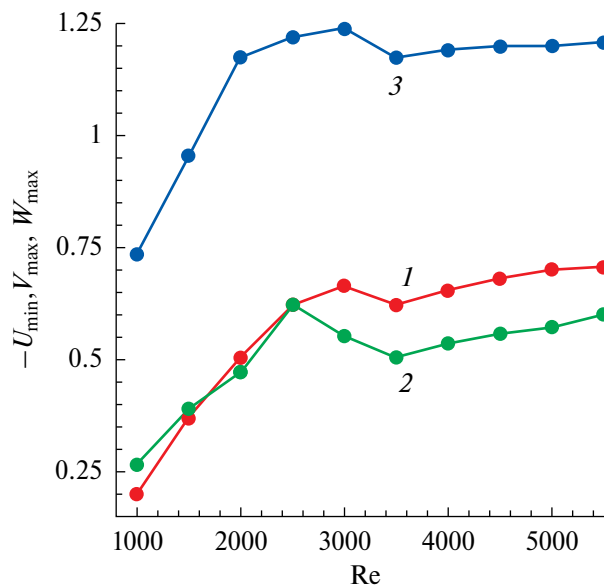


Рис. 16. Влияние числа Рейнольдса на экстремальные величины продольной ($-U_{\min}$) (1), вертикальной $V_{\max}$ — 2 и поперечной $W_{\max}$ — 3 компоненты скорости.

Re от 1000 до 3000. С дальнейшим ростом Re $W_{\max}$ несколько снижается и остается на уровне 1.2. Максимальная скорость восходящих потоков $V_{\max}$ в канавках растет практически одинаково с ($-U_{\min}$) для Re от 1000 до 2500 и достигает 0.6. С дальнейшим увеличением Re $V_{\max}$ изменяется незначительно и сохраняется на уровне 0.55.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально обосновано явление локального ускорения ламинарного потока с максимумом продольной скорости в сдвиговом течении порядка 1.8 над входными частями канавок. Измеренные методом SIV-профили $U(z)$ в трех точках 22-й наклонной канавки в узком канале с 26 двухрядными канавками с расположением $\backslash /$ на стенке хорошо согласуются с численными прогнозами на основе решения уравнений Навье—Стокса при Re=1000. Установлена связь локального ускорения потока в ядре канала с аномальной интенсификацией отрывного ламинарного течения в двухрядных канавках с ростом числа Рейнольдса от 1000 до 2500. При Re=2000 в продольном сечении входных частей удаленных от входа канавок f/f_{pl} снижается до -5.5 , а при Re=2500 $U_{\max}$ в сдвиговых слоях над канавками (на высоте $y=0.005$) достигает 1.45. Относительная теплоотдача от структурированного участка канала при Re=5500 достигает 5.2 при 4.3 кратном росте относительных гидравлических потерь.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Milman O., Ananiev P. Dry coolers and air-condensing units (Review) // Thermal Eng. 2016. V.63. P. 157–167.
2. Gao J., Hu Z., Yang Q., Liang X., Wu H. Fluid flow and heat transfer in microchannel heat sinks: modelling review and recent progress // Thermal Science and Engineering Progress. 2022. V.29. p.101203.

3. *Dzyubenko B., Kuzma-Kichta Yu., Leontiev A., Fedik I., Kholpanov L.* Intensification of heat and mass transfer on macro-, micro-, and nanoscales. Begell House, 2016. 630p
4. *Kalinin E.K., Dreitser G.A., Kopp I.Z., Myakotchin A.S.* Efficient surfaces for heat exchangers: fundamental and design. Begell house. 2002. 392p.
5. *Rashidi S., Hormozi F., Sunden B., Mahian O.* Energy saving in thermal energy systems using dimpled surface technology – A review on mechanisms and applications // *Appl. Energy*. 2019. V.250. P. 1491–1547.
6. *Wei X.J., Joshi Y.K., Ligrani P.M.* Numerical simulation of laminar flow and heat transfer inside a microchannel with one dimpled surface // *Journal of Electronic Packaging*. 2007. V. 129. № 1. P. 63–70.
7. *Xu M., Lu H., Gong L., Chai J.C., Duan X.* Parametric numerical study of the flow and heat transfer in microchannel with dimples // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016. V.76. P. 348–357.
8. *Park D.S.* Experimental and numerical study of laminar forced convection heat transfer for a dimpled heat sink // Thesis of Master of Science. Texas A&M University. 2007. 60 p.
9. *Bi C., Tang G.H., Tao W.Q.* Heat transfer enhancement in mini-channel heat sinks with dimples and cylindrical grooves // *Applied Thermal Engineering*. 2013. V.55. p.121–132.
10. *Lu G., Zhai X.* Analysis on heat transfer and pressure drop of a microchannel heat sink with dimples and vortex generators // *International journal of thermal sciences*. 2019. V.145. p.105986.
11. *Isaev S.A., Leonardi E., Timchenko V., Usachov A.E.* Vortical investigation of heat transfer in microchannels with oval dimples // *Heat Transfer Research*. 2010. V. 41. № 4. p. 413–424.
12. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Готовский М.А., Усачов А.Е., Жукова Ю.В.* Анализ повышения теплогидравлической эффективности при движении трансформаторного масла в миниканале с однорядным пакетом сферических и овальных лунок на нагретой стенке // *Теплофизика высоких температур*. 2013. Т. 51. № 6. С. 884–890.
13. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Gotovskii M.A., Usachov A.E., Zhukova Yu.V.* Analysis of thermohydraulic efficiency increase during transformer oil flow in a minichannel with a single-row package of spherical and oval dimples at a heated wall // *High Temperature*. 2013. V. 51. No. 6. P. 804–809.
14. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Корнев Н.В., Хассель Э., Чудновский Я.П.* Интенсификация теплообмена при ламинарном и турбулентном течении в узком канале с однорядными овальными лунками // *Теплофизика высоких температур*. 2015. Т. 53. № 3. С. 390–402.
15. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Kornev N.V., Hassel E., and Chudnovskii Ja.P.* Heat transfer intensification for laminar and turbulent flows in a narrow channel with one-row oval dimples // *High Temperature*. 2015. V.53. № .3 P. 375–386.
16. *Исаев С.А.* Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях // *ИЗВ.РАН. Механика жидкости и газа*. 2022. № 5. С. 13–24.
17. *Isaev S.A.* Genesis of anomalous intensification of separation flow and heat transfer in inclined grooves on structured surfaces // *Fluid Dynamics*. 2022. V. 57. № .5. P. 558–570.
18. *Isaev S., Gritkevich 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. VI. 163 (Part.A). P. 202–207.
19. *Исаев С.А., Баранов П.А., Леонтьев А.И., Попов И.А.* Интенсификация ламинарного течения в узком микроканале с однорядными наклонными овально-траншейными лунками // *Письма в ЖТФ*. 2018. Т. 44. Вып. 9. С. 73–80.
20. *Isaev S.A., Baranov P.A., Leontiev A.I., Popov I.A.* Intensification of a laminar flow in a narrow microchannel with single-row inclined oval-trench dimples // *Technical Physics Letters*. 2018. V. 44. № 5. P. 398–400.
21. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Судakov А.Г., Усачов А.Е., Гульцова М.Е.* Интенсификация теплообмена при ламинарном вихревом течении воздуха в узком канале с однорядными наклонными овальными лунками // *Инж.-физ. журн.* 2018. Т. 91. № 4. С. 1022–1034.
22. *Isaev S.A., Leont'ev A.I., Mil'tan O.O., Sudakov A.G., Usachov A.E., Gul'tsova M.E.* Intensification of heat exchange in laminar vortex air flow in a narrow channel with a row of inclined oval trenches // *J. Eng. Physics and Thermophys.* 2018. V. 91. № 4. P. 963–974.
23. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G.* Influence of the depth of single row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2019. V. 134. P. 338–358.
24. *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В., Попов И.А.* Энергоэффективные поверхности с многорядными наклонными овально-траншейными лунками для воздушных конденсаторов // *Энергетика*. 2020. № 4. С. 3–10.

25. Мухеев Н.И., Душин Н.С. Метод измерения динамики векторных полей скорости турбулентного потока по видеосъемке дымовой визуализации // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 6. С. 114–122.
26. Mikheev N.I., Dushin N.S. A method for measuring the dynamics of velocity vector fields in a turbulent flow using smoke image-visualization video // Instruments and Experimental Techniques. 2016. V. 59. № 6. P. 882–889.
27. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 316с.
28. Isaev S.A., Baranov P.A., Usachov A.E. Multiblock computational technologies in the VP2/3 package on aerothermodynamics (LAP LAMBERT Academic Publishing: Saarbrücken, Germany, 2013).
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. Pascau A., Garcia N. Consistency of SIMPLEC scheme in collocated grids // Proc. V European Conf. on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD2010. Lisbon, Portugal, 2010. 12p.
33. Saad Y. Iterative methods for sparse linear systems. 2nd ed., Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 2003. 567p.
34. Demidov D. AMGCL: C++ library for solving large sparse linear systems with algebraic multigrid method. <http://amgcl.readthedocs.org/>.
35. Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е. Анализ погрешностей многоблочных вычислительных технологий при расчете циркуляционного течения в квадратной каверне с подвижной крышкой для $Re=1000$ // Инж.-физ. журнал. 2013. Т. 86. № 5. С. 1064–1079.
36. Isaev S.A., Sudakov A.G., Baranov P.A., Zhukova Yu.V., Usachov A.E. Analysis of errors of multiblock computational technologies by the example of calculating a circulation flow in a square cavity with a moving cover at $Re = 1000$ // J. Eng. Physics and Thermophysics. 2013. V. 86, Issue 5. P. 1134–1150.
37. Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., Hassel E. Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on the turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel // Int. J. Heat Mass Transfer. 2010. V.53. № 1–3. P. 178.
38. Herwig H., Kock F. Direct and indirect methods of calculating entropy generation rates in turbulent convective heat transfer problems // Heat Mass Transfer. 2007. V. 43. P. 207–215.
39. Isaev S.A., Mil'man O.O., Klyus A.A., Nikushchenko D.V., Khmara D.S., Yunakov L.P. Anomalous heat transfer enhancement in separated flow over a zigzag-shaped dense package of inclined grooves in a channel wall at different temperature boundary conditions // Fluid Dynamics. 2024. V. 59. № 2. P. 238–259.

Interrelation between the Local Acceleration of Laminar Flow in a Channel and the Anomalous Heat Transfer Enhancement in Inclined Two-Row Grooves

S. A. Isaev^{a, b}, O. O. Mil'man^c, N. I. Mikheev^d, D. V. Nikushchenko^a,
N. S. Dushin^d, A. A. Klyus^b, and E. A. Osiyuk^b

^a *St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, 190121 Russia*

^b *St. Petersburg State University of Civil Aviation, St. Petersburg, 196210 Russia*

^c *Scientific and Production Implementation Company "Turbokon", Kaluga, 248010, Russia*

^d *Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, 420111 Russia*

*e-mail: isaev3612@yandex.ru

The anomalous enhancement of laminar separation flow and heat transfer (AELSFHT) is studied in a channel with two rows of 26 densely packed grooves inclined at angles of $\pm 45^\circ$ in the case of uniform flow at the entry and the Reynolds number Re varying from 1000 to 5500. The local flow acceleration is validated, when the greatest flow velocity becomes of the order of 1.8 in dimensionless units and the wall layer becomes thinner above the spherical entry segments. In this case, the longitudinal velocity increases to a value of 1.4 at a distance $y = 0.005$ from the wall for $Re = 2500$. The interrelation between the local acceleration at the channel center and the AELSFHT is established, the minimum value of the negative acceleration amounting to -25 at $Re = 5500$ and the relative heat removal from the structured region of the channel reaching up to 5.2.

Keywords: anomalous enhancement, inclined grooves, narrow channel, laminar flow, separation flow, vortex heat transfer, air.