ИЗВЕСТИЯ РАН. МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА, 2022, № 5, с. 13–24

УДК 532.517:4

ГЕНЕЗИС АНОМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В НАКЛОННЫХ КАНАВКАХ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

© 2022 г. С. А. Исаев[a,b]

[a] Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

[b] Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.04.2022 г.
После доработки 10.05.2022 г.
Принята к публикации 10.05.2022 г.

Обзор эволюции научного направления по вихревой интенсификации теплообмена на структурированных лунками энергоэффективных поверхностях представляется. Обсуждается открытое явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках со сферическими законцовками, связанное с интерференцией взаимодействующего с наветренным склоном входящего в канавку струйного потока и самоорганизующегося торнадоподобного вихря. Особое внимание уделяется экспериментальному подтверждению обнаруженных численно экстраординарных перепадов статического давления внутри входной части канавки и ускорения пристеночного потока над входом до скоростей, в полтора раза превышающих максимальную скорость в плоскопараллельном канале.

Ключевые слова: интенсификация отрывного и вторичного течения, торнадоподобные вихри, наклонные канавки

DOI: 10.31857/S0568528122050085

Создание структурированных энергоэффективных поверхностей представляет важную инженерную и фундаментальную научную проблему. Пассивные методы интенсификации теплообмена при нанесении на поверхности рельефов из упорядоченных элементов шероховатости позволяют значительно увеличить теплоотдачу от стенки при прокачке теплоносителя в мультимасштабных системах охлаждения. При этом гидравлические потери, определяемые перепадами полного давления, могут расти со значительным опережающим темпом. Яркий пример такого успешного метода, нашедшего широкое применение в авиационной промышленности, – накатка валиков в трубах и каналах, предложенная в открытии Г. Дрейцера и его коллектива из Московского авиационного института [1, 2]. Однако в технических системах подчас ресурсы полного давления сильно ограничены, что затрудняет применение упорядоченных выступов для интенсификации теплообмена. Альтернативой являются луночные технологии, в том числе основанные на нанесении упорядоченных траншей [3, 4], позволяющие кардинально снизить гидравлические потери и повысить теплогидравлическую эффективность, сохраняя высокий уровень теплоотдачи в микро- и макро размерных устройствах.

Долгое время технология нанесения покрытий ограничивала конструирование энергоэффективных поверхностей. Обработка металлов резанием (фрезерование), штамповка, литье стимулировали выбор простых форм лунок, а именно сферических, конических и цилиндрических. Эмпирический инженерный подход к построению структурированных поверхностей преобладал над фундаментальными научными исследованиями по изучению физических механизмов интенсификации теплообмена. Однако спектр приложений зарождающихся луночных технологий был довольно широким. Это прежде всего теплообменники (пластинчатые и трубчатые), тракты двигательных и энергетических установок (ГТУ, атомные станции и др.), в том числе системы охлаждения турбинных лопаток, воздушные конденсаторы, а в последнее десятилетие микроканалы в устройствах микроэлектроники [5–8]. Постепенно упорядоченная дискретная шероховатость на пластинах, стенках каналов и труб стала объектом внимания исследователей фундаментальных механизмов интенсификации теплообмена [9–20]. Следует отметить, что по-

явление аддитивных технологий кардинально изменило ситуацию с реализацией нанесения покрытий, позволив воссоздавать запрограммированные компьютером поверхностные рельефы. Тем не менее и в них еще пока не вполне решены проблемы создания изделий из огнестойких материалов и качества получаемых поверхностей.

Перспективная научная тематика вихревой интенсификации теплообмена на луночных рельефах сформировала международные научные школы Г. Кикнадзе [21, 22], А. Леонтьева [23, 24], Ф. Лиграни [25–30], Р. Банкера [31, 32], Б. Вайнганда [33, 34], Б. Кхо [35, 36], А. Халатова [37, 38]. Также выделились национальные научные коллективы в Корее и Китае [37–46]. Хотелось бы отметить экспериментальные [47–55] и расчетные [56, 57] работы. Подавляющее большинство перечисленных исследований посвящено интенсификации теплообмена на плоских пластинах и стенках каналов с уединенными и пакетными сферическими лунками. К ним следует добавить работы коллектива С. Исаева [58–114], посвященные в основном численным исследованиям отрывных течений и теплообмена в уединенных сферических лунках на плоской пластине и стенке узкого канала. Акцент в них, как и в работах Кикнадзе, делался на анализ самоорганизующихся струйно-вихревых структур в лунках, на определение влияния на них геометрических и режимных параметров, в особенности глубины лунки, радиуса скругления кромки и числа Рейнольдса. В работах, посвященным ансамблям лунок, в основном рассматривались традиционные ямки – лунки, сферические, конические, эллиптические небольшого удлинения, каплевидные. Ансамбли лунок подобно расположению труб в теплообменниках компоновались как коридорные и шахматные. Во втором случае, следуя Кикнадзе, центры соседних лунок составляют равносторонний треугольник, а по предложению Лиграни в центре квадрата между соседними лунками размещается еще одна лунка. Характерная особенность рассматриваемых луночных ансамблей – высокие плотности облунения поверхностей, доходящие до 70–80%. Она связана с образованием в лунках довольно слабых возвратных течений и крайней низкой теплоотдаче в отрывных зонах, занимающих их значительную часть. Повышение теплоотдачи на облуненных поверхностях наблюдается на наветренных склонах лунок и в промежутках между лунками. Во многих исследованиях внимание обращается на генерацию асимметричных вихревых структур и интенсификацию вторичного и отрывного течения за счет формирования рельефа внутри лунок. Значительный интерес проявлен к разработке математических моделей и технологий численного моделирования [74], методов диагностики вихревых потоков и теплообмена, включая градиентную теплометрию [75, 76].

Особый интерес проявлен к исследованиям интенсификации теплообмена на структурированных пластинах и стенках каналов с нетрадиционными поверхностными вихрегенераторами – наклонными овально-траншейными лунками (ОТЛ) (рис. 1) [77]. Первоначальная идея, примененная при проектировании асимметричных лунок, заключалась в интенсификации пристеночного течения при генерации наклонных вихревых структур, что было продемонстрировано при выдуве наклонной струи в сносящий поток [78]. Сначала рассматривались асимметричные лунки, составленные из половинок сферической и эллиптической лунок [59, 60], но интенсивность отрывного и вторичного течения в них оказалась невелика. В [79] предложена форма наклонной по отношению к набегающему потоку овальной лунки, составленной из двух половинок сферической лунки и соединяющей их цилиндрической вставки. Показана генерация в них устойчивых спиралевидных вихревых структур в отличие от образования периодических вихрей в глубоких сферических лунках [80–85]. Тепловая и теплогидравлическая эффективность овальных лунок на пластине и на стенке узкого канала оказалась существенно выше, чем их сферических аналогов. В проведенных исследованиях начального периода длины вставок были небольшими (не более 0.5–1 диаметра исходной сферической лунки). Помимо уединенных лунок рассматривались коридорные и шахматные ансамбли таких лунок на нагреваемой стенке узкого канала.

Прорыв в исследованиях интенсификации теплообмена при обтекании наклонных овальных лунок произошел, когда было выполнено условие постоянства площади пятна уединенной лунки на стенке узкого канала в процессе ее удлинения [86–89]. Фактически овальная лунка при большом удлинении преобразуется в канавку с полусферическими законцовками.

Анализ растекания теплоносителя по внутренней поверхности наклонной овальной лунки с большим относительным удлинением порядка 3–5, названной овально-траншейной лункой, показал, что начиная с некоторого удлинения лунка становится проточной, т.е. зона отрывного течения локализуется во входной (или головной) части наклонной ОТЛ. С увеличением относительной длины гидравлические потери на прямоугольном участке с лункой сначала возросли до максимума, а затем снизились до величины, близкой к гидравлическим потерям выбранного участка канала с эквивалентной по площади сферической лункой одинаковой глубины с ОТЛ.

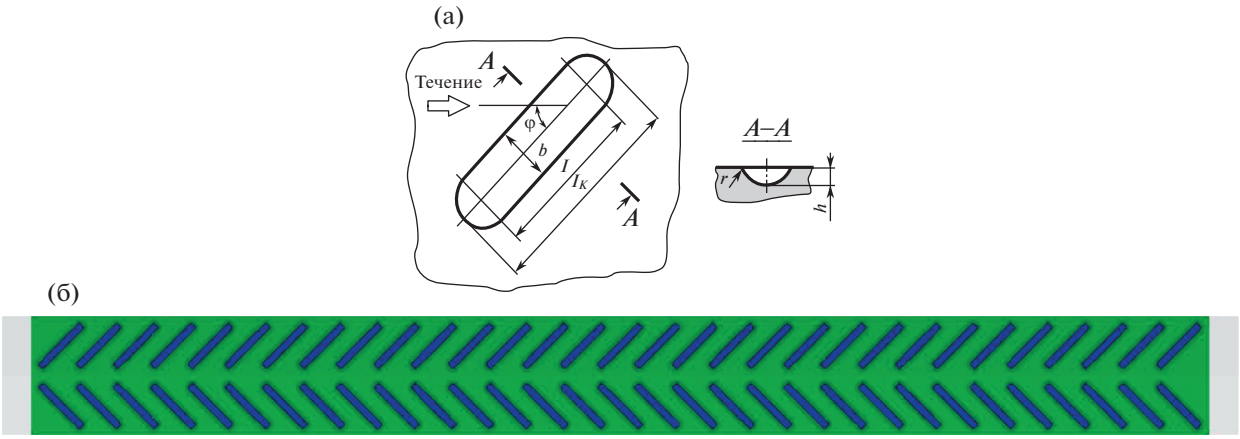

Рис. 1. Уединенные (а) и двухрядные (б) наклонные овально-траншейные лунки (ОТЛ) на плоской стенке.

Теплоотдача на участке стенки канала с ОТЛ оказалась значительно выше, чем в случае сферического аналога. При обтекании турбулентным потоком воды уединенной ОТЛ глубиной 0.39 и углом наклона 45° в узком канале высотой 1 и шириной 7.5 максимальная скорость вторичного течения в лунке приблизилась к 80% от среднемассовой скорости, а минимум относительного отрицательного трения и максимум относительной теплоотдачи в зоне возвратного течения лунки составили –1.5 и 2 соответственно.

Явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена во входной части наклонной ОТЛ [90–96], а также ускорение в ядре канального потока открыто численно для ламинарного и турбулентного стабилизированного течения воздуха в узких каналах с однорядными пакетами наклонных ОТЛ [97–99]. Явление связано с интерференцией входящего в лунку внешнего потока, растекающегося по ее наветренному склону, и сгенерированного во входном сферическом сегменте торнадоподобного вихря (рис. 2). В результате возник большой перепад полного давления между зонами торможения и разрежения, сопоставимый с перепадом давления в критических точках при обтекании шара или кругового цилиндра. В проведенных расчетах числа Рейнольдса, определенные по среднемассовой скорости и высоте канала, заданы равными 10^3 и 10^4. Обычно угол наклона ОТЛ выбирался равным 45°. В случае турбулентного воздушного потока для разреженного пакета ОТЛ с одной лункой длиной 7.05, шириной 1.05 и глубиной 0.3 в центре периодического участка канала длиной 6 и шириной 7 на нагретой внутренней поверхности абсолютная величина минимального относительного трения увеличивается четырехкратно, а максимальная относительная теплоотдача возрастает пятикратно по отношению к соответствующим величинам в плоскопараллельном канале. Максимальная абсолютная величина скорости вторичного (поперечного) течения оказывается одного порядка с максимальной скоростью потока в плоскопараллельном канале. Для однорядных ОТЛ шириной 1, длиной 4.5 и глубиной свыше 0.25 в периодическом модуле узкого микроканала шириной 6, длиной 4 с одной наклоненной под углом 45° ОТЛ открыто явление ускорения ламинарного потока с полуторакратным ростом максимальной скорости в ядре потока в области над входом в наклонную ОТЛ по сравнению с максимальной скоростью в плоскопараллельном канале.

Уплотнение лунок в однорядном рельефе на периодической секции на нагретой стенке удлинением 8 в узком (9 к 1) плоскопараллельном канале рассматривается на примере размещения наклонных ОТЛ длиной 7.05, шириной 1.05 и глубиной 0.25 с радиусом скругления кромок 0.21 (рис. 3, 4) [92–95]. Расстояние между центрами лунок меняется от 2 до 8. Эффект ускорения турбулентного потока с увеличением максимальной скорости в ядре в 1.39 раза получен при плотном пакете наклоненных под углом 65° ОТЛ с шагом между лунками 2. В этом случае четырехкратно увеличивается максимальная абсолютной величина относительной проекции трения на направление срединного сечения ОТЛ (рис. 5, 6) и 6.5-кратно растет максимальная относительная теплоотдача (по отношению к параметрам в плоскопараллельном канале). Максимальная абсолютная величина скорости вторичного (поперечного) течения примерно на 10% превосходит величину максимальной скорости потока в плоскопараллельном канале, а такая же величина скорости рециркуляционного течения почти втрое превышает аналогичную скорость возвратного течения в сферической лунке, доходя до 0.89 от среднемассовой скорости в канале. Уплотне-

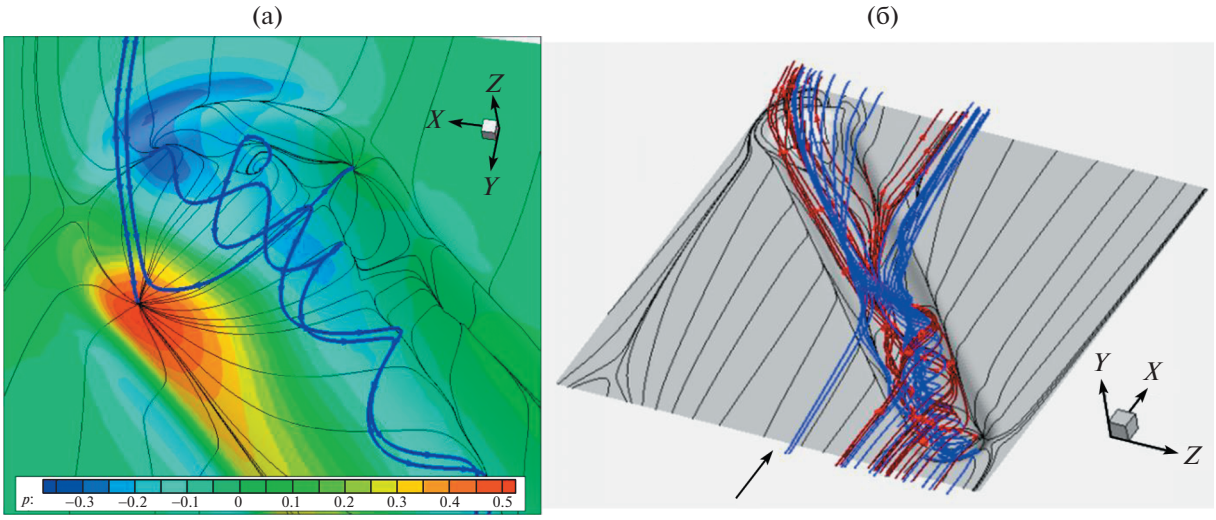

Рис. 2. Интерференция взаимодействующего с наветренным склоном входящей в наклонную ОТЛ струи и самоорганизующегося торнадоподобного потока (а), а также компьютерная визуализация закрученного потока в ОТЛ на участке стабилизированного течения в узком канале (б) [90].

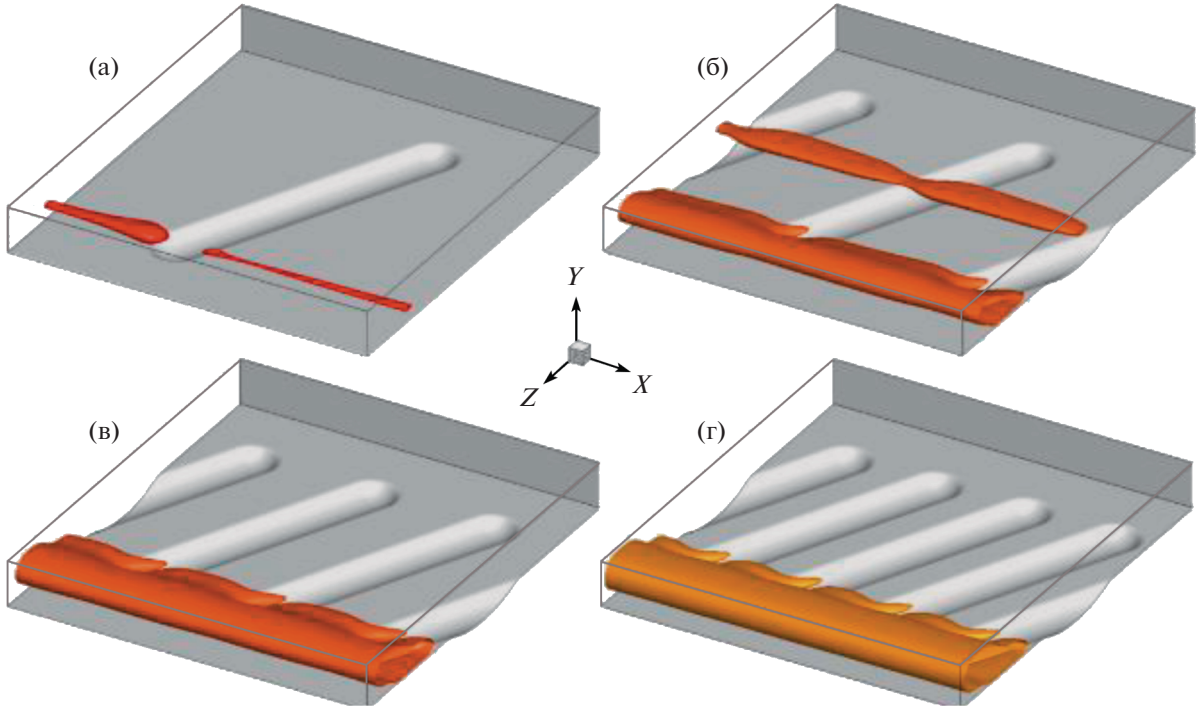

Рис. 3. Сравнение изополей продольной составляющей скорости u, равной 1.3, в периодической секции канала с наклонными ОТЛ ($\varphi = 65°$) на нижней стенке (верхняя стенка снята) при $H = 8$ (а); 4 (б); 2.667 (в); 2 (г).

ние лунок сопровождается увеличением перепада полного давления (свыше 1.2) между областями высокого положительного и низкого отрицательного давления. Оказывается, что наклон ОТЛ в диапазоне 0–60° в разреженном коридорном пакете на гидродинамическом стабилизированном участке узкого канала оказывает кардинальное воздействие на аномальную интенсификацию отрывного и закрученного потоков в лунке, приводя к 3–4-кратному снижению относительного отрицательного трения в диапазоне изменения углов от 40° до 60°, увеличению наибольшей скорости возвратного и вторичного течения до 0.8 и 1.18 по отношению к среднемассовой скорости

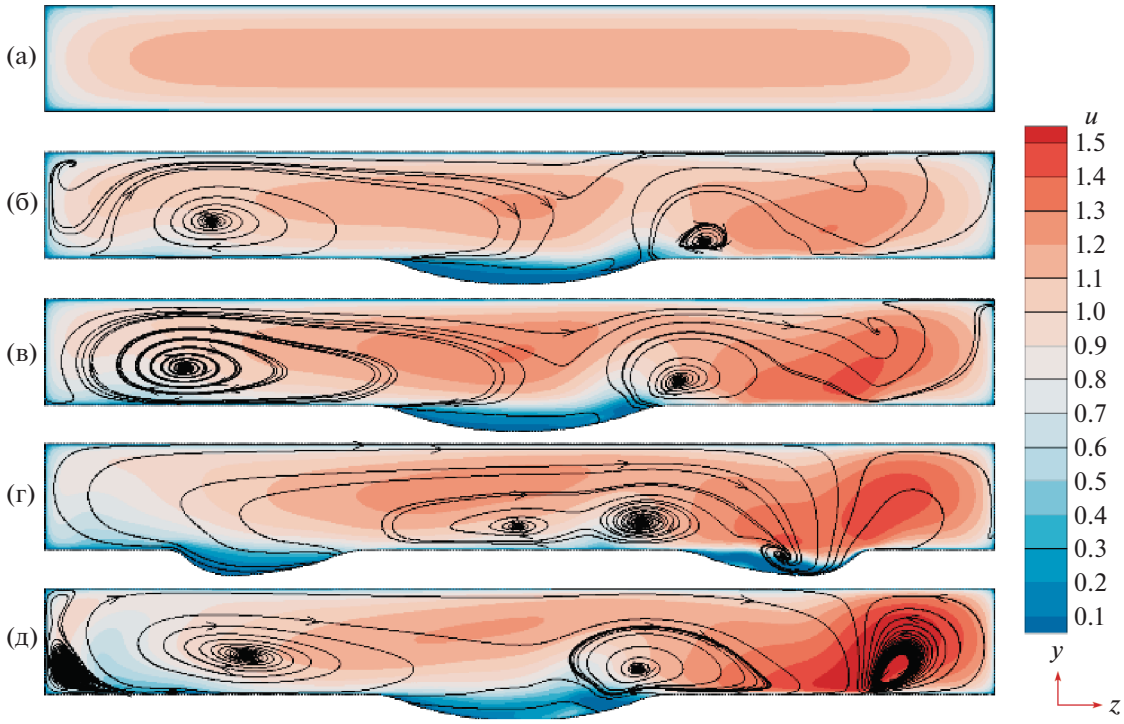

Рис. 4. Сравнение полей продольной составляющей скорости u в срединном сечении периодической секции гладкого (а) и облуненного каналов при $H = 8$ (б); 4 (в); 2.667 (г); 2 (д) с нанесенными структурами вторичных токов.

потока в канале [100–103]. В то же время до углов наклона, не превышающих 20°, аномальной интенсификации гидродинамических и теплообменных процессов в лунках не возникает.

Интенсификация теплообмена в межреберном канале воздушного конденсатора с помощью коридорного пакета наклоненных под углом 45° ОТЛ моделируется численно при Re = 1000. При рассмотрении узкого канала высотой 1, длиной 80 и шириной 4 предпочтителен вариант с 31-й однорядной овально-траншейной лункой, имеющей глубину 0.25 (рост гидравлических потерь не превышает 46% при почти двукратном увеличении теплоотдачи по сравнению с плоскопараллельным каналом). При турбулентном режиме течения воздуха в межреберном канале с 31 ОТЛ при Re = 6000 глубина лунок меняется от 0 до 0.2. Относительные гидравлические потери не превышают 70% при возрастании в 2.4 раза относительной теплоотдачи в облуненном канале в сравнении с плоскопараллельным аналогом [104–107].

В [108] интенсификация теплообмена рассчитывается при турбулентном обтекании воздухом плоской пластины с однорядным пакетом из 16 ОТЛ с наклоном 60° на продольной секции длиной 40, шириной 4 при постановке условий симметрии на боковых границах секции пластины и при шаге лунок 2.4. ОТЛ имеет ширину 1, длину 4.5, глубину 0.2 и радиус округления 0.3. Толщина пограничного слоя на входе в секцию 0.175. Аномальная интенсификация отрывного течения и теплообмена в наклонных ОТЛ подтверждается. Экстремальные относительные величины отрицательного трения и числа Нуссельта $(f/f_{pl})_{\min} = -3$, $(\mathrm{Nu}/\mathrm{Nu}_{pl})_{\max} = 4$. Относительная теплоотдача увеличивается в 1.43 раза в по сравнению с гладкой пластиной, а коэффициент лобового сопротивления растет в 2.08 раза. Однако теплогидравлическая эффективность составляет 1.12.

Обнаруженная численно аномальная интенсификация отрывного течения и теплообмена в наклонных ОТЛ на пластине и на стенке узкого канала, а также ускорение потока в узком канале с двумя $\vee$ и $\wedge$ – образными рядами ОТЛ экспериментально подтверждены на стендах НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Казанского научного центра РАН и Казанского национального исследовательского технического университета – Казанского авиационного института. Измеренные перепады статического давления в одиночном ОТЛ при Re = 6.7×10^4 и 16.7×10^4 (рис. 7), профили скорости ускоряющегося ламинарного (Re = 1000) и турбулентного (Re = 4300) потоков в узком канале с двумя рядами из 26 ОТЛ каждый (рис. 8), оценка суммарных чисел Нус-

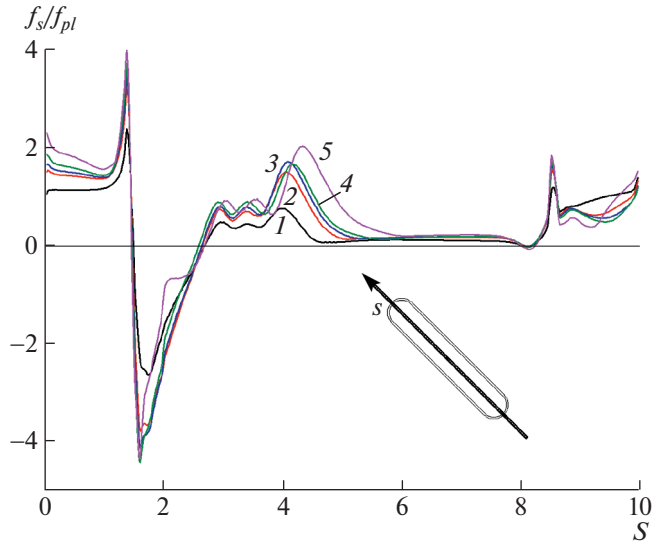

Рис. 5. Распределения составляющих относительного трения *fs* в продольном срединном сечении наклонной ОТЛ при φ = 65° для различных *H*. *1* – *H* = 8; *2* – 4; *3* – 3.3; *4* – 2.667; *5* – 2.

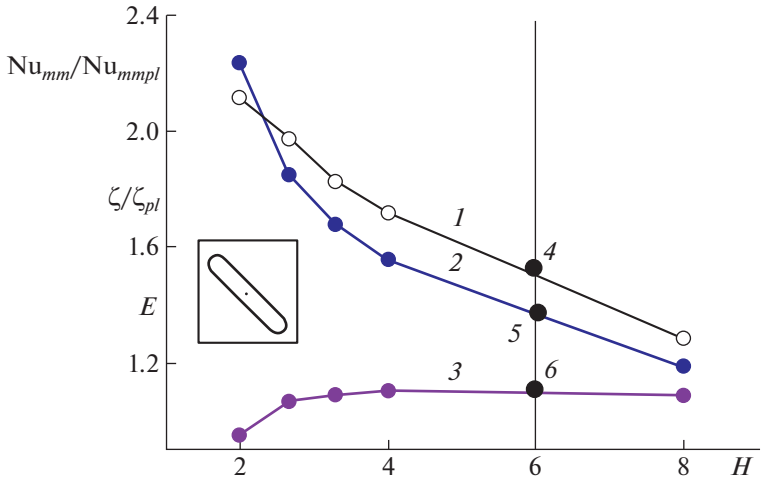

Рис. 6. Зависимость относительной суммарной теплоотдачи Nu_{mm}/Nu_{mmpl} участка периодической секции облуненного канала (*1*, *4*), относительных гидравлических потерь ζ/ζ_{pl} (*2*, *5*) и теплогидравлической эффективности (*E*), определенной как $(Nu_{mm}/Nu_{mmpl})/(\zeta/\zeta_{pl})$ (*3*, *6*) от расстояния между центрами лунок *H*. *4–6* – данные экспериментов И.А. Попова [112].

сельта на стенке канала с однорядными ОТЛ хорошо согласуются с численными прогнозами в рамках подхода RANS [109].

Анализ турбулентного обтекания ОТЛ на пластине и на стенке канала показывает, что в диапазоне углов наклона от 25° до 85° наблюдается большой перепад давления между зонами торможения на наветренном склоне и разрежения в месте, где образуется торнадоподобный вихрь [110].

Измерения поля скорости в узком канале с двумя рядами наклонных ОТД при углах наклона ±45° и ±135° показывают, что в ядре потока формируется сдвиговый поток с максимальной скоростью перед входом в лунку, причем ее величина превышает максимальную скорость в плоскопараллельном канале [111].

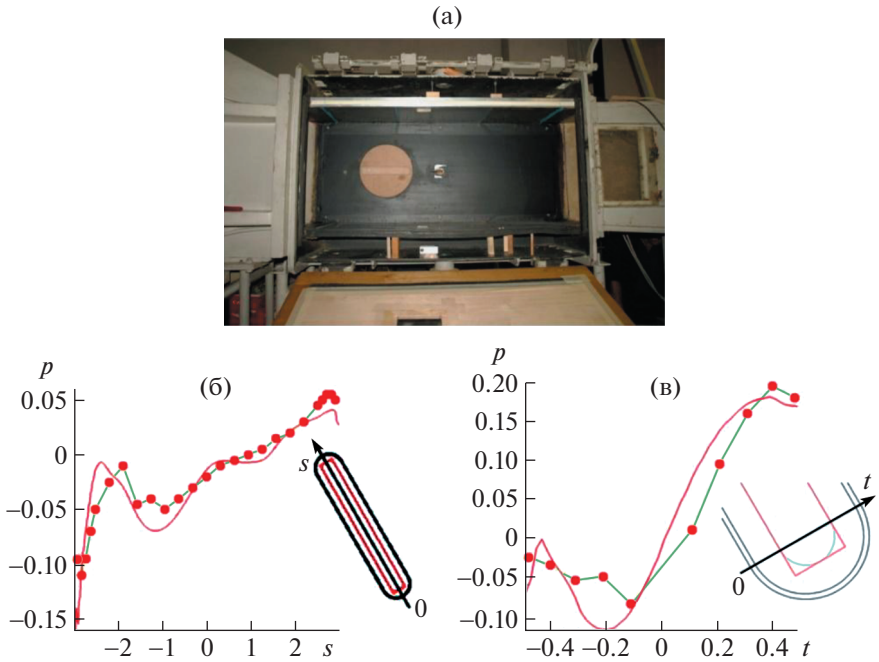

Рис. 7. Фотография экспериментальной установки в НИИ механики МГУ с наклонной ОТЛ на пластине при варьировании φ от 0 до 90° (а), сравнение расчетных (линии) и экспериментальных (точки) распределения статического давления в срединном продольном (б) и характерном поперечном (в) сечениях ОТЛ [109].

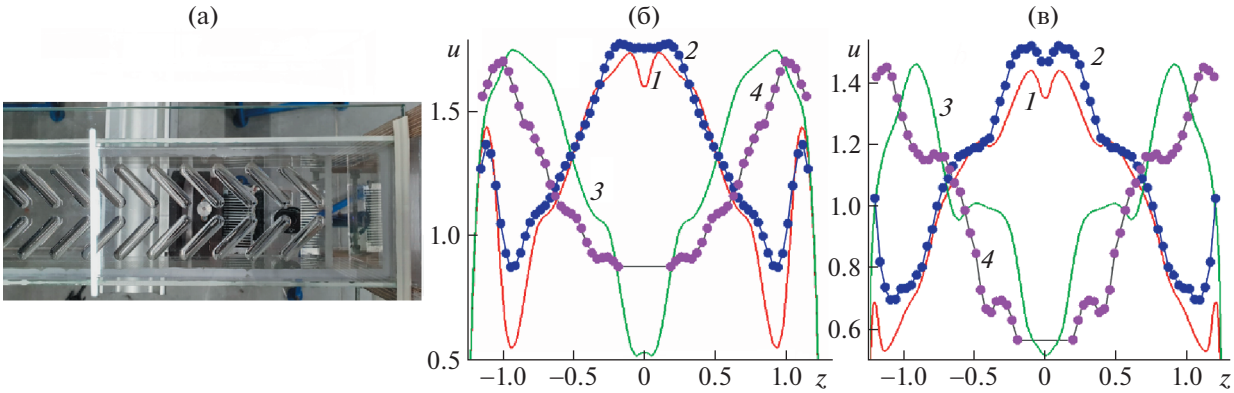

Рис. 8. Фотография экспериментальной установки облуненного узкого канала с плотным расположением наклонных ОТЛ (а) и сравнение расчетных (*1*, *3*) и экспериментальных (*2*, *4*) поперечных профилей продольной составляющих скорости $u(z)$ при ламинарном (б – Re = 10^3) и турбулентном (в – Re = 4000) режимах течения [111]. *1*, *2* – φ = ±45°; *y* = 0.4; *3*, *4* –(±135°); 0.23.

φ – угол наклона ОТЛ, *H* – расстояние между центрами ОТЛ в однорядном пакете, *u* – продольная составляющая скорости потока, *fs* – составляющая вектора трения по координате s в срединном продольном сечении ОТЛ, f_{pl} – трение на плоской стенке.

В [112, 113] представлен обзор по моделированию интенсификации теплообмена с использованием поверхностных вихрегенераторов в виде овальных лунок. Особое внимание обращено на наклонные дуговые лунки, которые позволяют снизить гидродинамические потери в облуненных каналах при незначительном уменьшении теплоотдачи по сравнению с наклонными ОТЛ.

В [114] предложенная энергоэффективная плоская поверхность образуется при нанесении однорядных зигзагообразных поперек потока (VVVVVV) канавок в плотной компоновке. Рассматривается конвективный теплообмен при турбулентном обтекании продольного фрагмента пластины длиной 40 и шириной 4 с пакетом из 14 однорядных наклонных \ – образных канавок с заданием условий симметрии на боковых границах. Ширина канавок 1, глубина 0.25, радиус

скругления кромки 0.2, углы наклона 30°, 45°, 50° и 60°, шаг 2.4, число Рейнольдса 10^4, толщина входного пограничного слоя 0.175. Подтверждены открытое в наклонных овально-траншейных лунках явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в зигзагообразных канавках и ускорение пристеночного потока.

В целом представлены новые энергоэффективные структурированные поверхности, хорошо сочетающиеся с перспективными аддитивными технологиями.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту 22-19-00056.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kalinin E.K., Dreitser G.A., Kopp I.Z., Myakotchin A.S.* Efficient surfaces for heat exchangers: fundamental and design. Begell house, 2002. 392 p.
2. *Dreitser G.A.* Problems in developing highly efficient tubular heat exchangers // Therm. Eng. 2006. V. 53. № 4. P. 279–287.
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. 630 p.
4. *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. 259. P. 1491–1547.
5. *Нагога Г.П.* Эффективные способы охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин. М.: Изд-во МАИ, 1996. 100 с.
6. *Ануров Ю.М.* Эффективные методы интенсификации теплообмена в системах охлаждения лопаточных аппаратов высокотемпературных газовых турбин // Автореф. докт. дис. СПб: Компания “Энергомаш (ЮК) Лимитед”, 2005. 36 с.
7. *Халатов А.А.* Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). Киев: Институт технической теплотехники НАН Украины. 2005. 76 с.
8. *Халатов А.А., Борисов И.И., Шевцов С.В.* Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Киев: Ин-т технической теплотехники НАН Украины. 2005. 500 с.
9. Научные основы технологий XXI века / Под ред. Леонтьева А.И., Пилюгина Н.Н., Полежаева Ю.В., Поляева В.М. М.: УНПЦ “Энергомаш”, 2000. 136 с.
10. *Кузма-Кичта Ю.А.* Методы интенсификации теплообмена. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 112 с.
11. *Щукин А.В., Козлов А.П., Агачев Р.С., Чудновский Я.П.* Интенсификация теплообмена сферическими выемками при воздействии возмущающих факторов / Под ред. акад. В.Е. Алемасова. Казань: Из-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. 143 с.
12. *Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И.* Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. 398 с.
13. *Попов И.А.* Гидродинамика и теплообмен внешних и внутренних свободноконвективных вертикальных течений с интенсификацией. Интенсификация теплообмена / Под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2007. 326 с.
14. *Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И.* Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: монография / Под общей ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 531 с.
15. *Попов И.А., Махянов Х.М., Гуреев В.М.* Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Интенсификация теплообмена: монография / Под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.
16. *Соколов Н.П., Полищук В.Г., Андреев К.Д., Рассохин В.А., Забелин Н.А.* Теплообмен и гидравлика в каналах с облуненными поверхностями. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 288 с.
17. Пристенная интенсификация теплообмена при сложных граничных условиях / А.В. Щукин, А.В. Ильинков. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. 252 с.
18. *Готовский М.А., Деменок С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М.* Теплоотдача и сопротивление каналов с олуненными поверхностями: монография. СПб.: Страта, 2016. 206 с.
19. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 10. Перспективные схемы пленочного охлаждения / А.А. Халатов, И.И. Борисов, Ю.А. Дашевский, С.Б. Резник. Киев, Изд-во “Политехника”, 2016. 238 с.
20. *Леонтьев А.И., Алексеенко С.В., Волчков Э.П. и др.* Вихревые технологии для энергетики / Под общей ред. акад. А.И. Леонтьева. М.: Изд. дом МЭИ, 2017. 350 с.
21. *Кикнадзе Г.И., Гачечиладзе И.А., Олейник В.Г.* Поверхность обтекания для формирования динамических структур в пограничных и пристенных слоях потоков сплошных сред. Патент № 2020304 РФ. С1 F15D1/02, F15D1/12. Россия – № 5034292/29; Опубл. 30.09.1994.

22. *Кикнадзе Г.И., Гачечиладзе И.А., Алексеев В.В.* Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация тепломассообмена, сопровождающая это явление. М.: Издательство МЭИ, 2005. 84 с.
23. *Afanasyev V.N., Chudnovsky Y.P., Leontiev A.I., Roganov P.S.* Turbulent of friction and heat transfer characteristics of spherical cavities on a plate // Exp. Therm. and Fluid Science. 1993. V. 7. P. 1–8.
24. *Leontiev A.I., Kiselev N.A., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M., Zditovets A.G., Burtsev S.A.* Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces coated with dimples of different shape // Int. Journal of Thermal Sciences. 2017. V. 118. P. 152–167.
25. *Ligrani P.M., Oliveira M.M., Blaskovich T.* Comparison of heat transfer augmentation techniques // AIAA J. 2003. V. 41. № 3. P. 337–362.
26. *Ligrani P.M., Harrison J.L., Mahmmod G.I., Hill M.L.* Flow structure due to dimple depressions on a channel surface // Phys. Fluids. 2001. V. 13. № 11. P. 3442–3451.
27. *Mahmood M.L., Ligrani P.M.* Heat transfer in a dimpled channel: combined influences of aspect ration, temperature ration, Reynolds number and flow structure // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2002. V. 45. P. 2011–2020.
28. *Won S., Ligrani P.* Numerical predictions of flow structure and local Nusselt number rations along and above dimpled surfaces with different dimple depths in a channel // Numerical Heat Transfer. 2004. V. 46 (A). P. 549–570.
29. *Burgess N.K., Ligrani P.M.* Effects of dimple depth on channel Nusselt numbers and friction factors // Trans. ASME. J. Heat Transfer. 2005. V. 127. P. 839–847.
30. *Xie G., Liu J., Ligrani P.M., Zhang W.* Numerical predictions of heat transfer and flow structure in a square cross-section channel with various non-spherical indentation dimples // Numerical Heat Transfer. 2013. V. 64 (A). P. 187–215.
31. *Bunker R., Belen'kii M.Ya., Gotovsky M.A., Fokin B.S., Isaev S.A.* Experimental and computational investigation of the hydrodynamics and heat transfer in a flat channel of variable width for smooth and intensified surfaces // Heat Transfer Research. 2004. V. 35. № 1–2. P. 34–43.
32. *Dees J.E., Bogard D.G., Bunker R.S.* Heat transfer augmentation downstream of rows of various dimple geometries on the suction side of a gas turbine airfoil // J. Turbomach. 2010. V. 132. № 3. P. 031010.
33. *Rao Y., Feng Y., Li B., Weigand B.* Experimental and numerical study of heat transfer and flow // Journal of Heat Transfer. 2015. V. 137. P. 031901.1-10.
34. *Zhang P., Rao Y., Li Y., Weigand B.* Heat transfer and turbulent flow structure in channels with miniature V-shaped rib-dimple hybrid structures on one wall // Journal of Heat Transfer. 2019. V. 141. P. 071903.1-12.
35. *Chen Y., Chew Y., Khoo B.* Enhancement of heat transfer in turbulent channel flow over dimpled surface // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 8100–8121.
36. *Tay C.M., Chew Y.T., Khoo B.C., Zhao J.B.* Development of flow structures over dimples // Experimental Thermal and Fluid Science. 2014. V. 52. P. 278–287.
37. *Syred N., Khalatov A., Kozlov A., Shchukin A., Agachev R.* Effect of surface curvature on heat transfer and hydrodynamics within a single hemispherical dimple // ASME Journal of Turbomachinery. 2001. V. 123. P. 609–613.
38. *Kovalenko G.V., Terekhov V.I., Khalatov A.A.* Flow regimes in a single dimple on the channel surface // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2010. V. 51. P. 839–848.
39. *Lan J., Xie J., Zhang D.* Effect of leading edge boundary layer thickness on dimple flow structure and separation control // Journal of Mechanical Science and Technology. 2011. V. 25. № 12. P. 3243–3251.
40. *Choi E.Y., Choi Y.D., Lee W.S., Chung J.T., Kwak J.S.* Heat transfer augmentation using a rib-dimple compound cooling technique // Applied Thermal Eng. 2013. V. 51. P. 435–441.
41. *Qu H., Shen Z., Xie Y.* Numerical investigation of flow and heat transfer in a dimpled channel among transitional Reynolds numbers // Mathematical Problems in Engineering. 2013. ID 989237. P. 1–10.
42. *Rao Y., Li B., Feng Y.* Heat transfer of turbulent flow over surfaces with spherical dimples and teardrop dimples // Experimental Thermal and Fluid Science. 2015. V. 61. P. 201–209.
43. *Zhou W., Rao Y., Hu H.* An experimental investigation on the characteristics of turbulent boundary layer flows over a dimpled surface // Journal of Fluids Engineering. 2016. V. 138. P. 021204.1-13.
44. *Li M., Khan T.S., Al-Hajri E., Ayub Z.H.* Single phase heat transfer and pressure drop analysis of a dimpled enhanced tube // Applied Thermal Engineering. 2016. V. 101. P. 38–46.
45. *Li P., Zhang D., Xie Y., Xie G.* Flow structure and heat transfer of non-Newtonian fluids in microchannel heat sinks with dimples and protrusions // Applied Thermal Engineering. 2016. V. 94. P. 50–58.
46. *Huang Z., Li Z.-Y., Yu G.-L., Tao W.-Q.* Numerical investigations on fully-developed mixed turbulent convection in dimpled parabolic trough receiver tubes // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 114. P. 1287–1299.
47. *Terekhov V., Kalinina S., Mshvidobadze Yu.* Heat transfer coefficient and aerodynamic resistance on a surface with a single dimple // Enhanced Heat Transfer. 1997. V. 4. P. 131–145.
48. *Chyu M.K., Yu Y., Ding H.* Heat transfer enhancement in rectangular channels with concavities // Enhanced Heat Transfer. 1999. V. 6. P. 429–439.

49. *Hwang S.D., Kwon H.G., Cho H.H.* Heat transfer with dimple/protrusion arrays in a rectangular duct with a low Reynolds number range // Int. J. Heat Fluid Flow. 2008. V. 29. P. 916–926.
50. *Mitsudharmadi H., Tay C.M.J., Tsai H.M.* Effect of rounded edged dimple arrays on the boundary layer development // The Visualization Society of Japan J. Visualization. 2009. V. 12. № 1. P. 17–25.
51. *Slabaugh C.D., Tran L.V., Kapat J.S.* Heat transfer in a rectangular channel with dimples applied to one wall // J. Propulsion and Power. 2011. V. 27. № 6. P. 1303–1314.
52. *Ranaware A.A., Patel I.H.* Experimental analysis of heat transfer enhancement over dimpled surface on one side of plate // Int. Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering. 2017. V. 4. № 9. P. 1–5.
53. *Turnow J., Kornev N., Zhdanov V., Hassel E.* Flow structures and heat transfer on dimples in a staggered arrangement // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2012. V. 35. P. 168–175.
54. *Vorayos N., Katkhaw N., Kiatsiriroat T., Nuntaphan A.* Heat transfer behavior of flat plate having spherical dimpled surfaces // Case Stud. Therm. Eng. 2016. V. 8. P. 370.1–7.
55. *Katkhaw N., Vorayos N., Kiatsiriroat T., Khunatorn Y., Bunturat D., Nuntaphan A.* Heat transfer behavior of flat plate having 45 ellipsoidal dimpled surfaces // Case Stud. Therm. Eng. 2014. V. 2. P. 67–74.
56. *Nazari S., Zamani M., Moshizi S.A.* Comparative study on the influence of depth, number and arrangement of dimples on the flow and heat transfer characteristics at turbulent flow regimes // Heat and Mass Transfer. 2018. V. 54. P. 2743–2760.
57. *Fazli M., Raisee M.* Computation of flow and heat transfer through channels with periodic dimple/protrusion walls using low-Reynolds number turbulence models // Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. 2019. V. 29. № 3. P. 1178–1207.
58. *Isaev S.A., Kharchenko V.B., Chudnovskii Ja.P.* Calculation of a three-dimensional flow of a viscous incompressible liquid in the neighborhood of a shallow well on a flat surface // J. Eng. Physics and Thermophys. 1994. V. 67. № 5–6. P. 1013–1017.
59. *Isaev S.A., Leont'ev A.I., Baranov P.A.* Identification of self-organized vortexlike structures in numerically simulated turbulent flow of a viscous incompressible liquid streaming around a well on a plane // Tech. phys. Letters. 2000. V. 26. № 1. P. 15–18.
60. *Isaev S.A., Leont'ev A.I., Baranov P.A., Usachov A.E.* Bifurcation of vortex turbulent flow and intensification of heat transfer in a hole // Doklady Phys. 2000. V. 45. № 8. P. 389–391.
61. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Metov Kh.T., Kharchenko V.B.* Modeling of the influence of viscosity on the tornado heat exchange in turbulent flow around a small hole on the plane // J. Eng. Physics and Thermophys. 2002. V. 75. № 4. P. 890–898.
62. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Baranov P.A., Pyshnyi I.A., Usachov A.E.* Numerical analysis of the vortex intensification in a heat transfer in a channel with a set of deep spherical dimples on one of the walls // Dokl. Phys. 2002. V. 47. № 10. P. 755–757.
63. *Baranov P.A., Isaev S.A., Leontiev A.I., Mityakov A.V., Mityakov V.Yu., Sapozhnikov S.Z.* Experimental and numerical modeling of vortex heat transfer in turbulent flow past spherical dimple on a plane // Thermophys. and aeromechanics. 2002. V. 9. № 4. P. 497–508.
64. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Kudryavtsev N.A., Pyshnyi I.A.* The effect of rearrangement of the vortex structure on heat transfer under condition of increasing depth of a spherical dimple on the wall of a narrow channel // High Temp. 2003. V.41. № 2. P. 229–232.
65. *Isaev S.A., Leont'ev A.I., Baranov P.A., Pyshnyi I.A.* Numerical analysis of the influence of the depth of a spherical hole on a plane wall on turbulent heat transfer // J. Eng. Physics and Thermophys. 2003. V. 76. № 1. P. 61–69.
66. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Kiknadze G.I., Kudryavtsev N.A., Gachchiladze I.A.* Comparative analysis of the vortex heat exchange in turbulent flows around a spherical hole and two-dimensional trench on plane wall // J. Eng. Physics and Thermophys. 2005. V. 78. № 4. P. 749–761.
67. *Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Sapozhnikov S.Z., Isaev S.A.* Local heat fluxes on the surfaces of dimples. Ditches and cavities // Therm. Eng. 2007. V. 54. № 3. P. 200–203.
68. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Zhdanov V.L., Kornev N.V., Hassel E.* Whirlwind-like enhancement of heat transfer on dimpled reliefs // Heat Transfer Research. 2008. V. 39. № 1. P. 79–90.
69. *Isaev S.A., Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Mozhaiskii S.A., Usachov A.E.* Numerical analysis of the influence of the physical viscosity on the vortex heat transfer in laminar and turbulent flows around a heated plate with a shallow spherical hole // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2009. V. 82. № 5. P. 847–857.
70. *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. 178–197.
71. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Shchelchkov A.V., Gul'tsova M.E.* Reconstruction of the vortex-jet structure of the separation turbulent flow in a spherical dimple on the wall of a narrow channel with increase in the depth of the dimple and intensification of the secondary flow in it // J. Eng. Physics and Thermophys. 2015. V. 88. № 5. P. 1304–1308.

72. *Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Baranov P.A., Gulcova M.E.* Numerical simulation of the turbulent air flow in the narrow channel with a heated wall and a spherical dimple placed on it for vortex heat transfer enhancement depending on the dimple depth // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2016. V. 94. P. 426–448.
73. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Baranov P.A., Popov I.A., Shchelchkov A.V., Gabdrakhmanov I.P.* Numerical simulation of the intensification of the heat exchange in a plane-parallel channel with a cylindrical shallow dimple on the heated wall // J. Eng. Physics and Thermophys. 2016. V. 89. № 5. P. 1186–1201.
74. *Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е.* Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Pub., 2013. 316 с.
75. *Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.* Градиентные датчики теплового потока. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2003. 168 с.
76. *Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.* Основы градиентной теплометрии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 203 с.
77. *Исаев С.А., Баранов П.А., Гортышов Ю.Ф., Леонтьев А.И., Попов И.А., Щелчков А.В., Миронов А.А., Скрыпник А.Н.* Теплообменная поверхность. Патент РФ. RU 2684303 C1, МПК F28F 3/04 (2006.01). Заявка 2018121892, 13.06.2018 опубликована 05.04.2019. Бюл. № 10.
78. *Henry F.S., Pearcey H.H.* Numerical model of boundary layer control using air-jet generated vortices // AIAA J. 1994. V. 32. № 12. P. 2415–2425.
79. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Mityakov A.V., Pyshnyi I.A., Usachov A.E.* Intensification of tornado turbulent heat exchange in asymmetric holes on a plane wall // J. Eng. Physics and Thermophysics. 2003. V. 76. № 2. P. 266–270.
80. *Isaev S.A., Leont'ev A.I., Baranov P.A.* Simulation tornado-like enhancement of heat transfer for low-velocity motion of air in a rectangular channel with cavities. Part 1: Selection and justification of calculation methods // Therm. Eng. 2007. V. 54. № 3. P. 193–199.
81. *Isaev S.A., Leont'ev A.I., Baranov P.A.* Simulation tornado-like enhancement of heat transfer for low-velocity motion of air in a rectangular channel with cavities. Part 2: Results of parametric studies // Therm. Eng. 2007. V. 54. № 8. P. 655–663.
82. *Isaev S.A., Leontiev A.I.* Problems of simulating tornado-like heat transfer turbulent flow past a dimpled relief on a narrow channel wall // J. Eng. Physics and Thermophys. 2010. V. 83. № 4. P. 783–793.
83. *Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E.* Vortex mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples // Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung. 2011. V. 47. № 3. P. 301–311.
84. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Kornev N.V., Hassel E., Chudnovskii Ja.P.* Heat transfer intensification for laminar and turbulent flows in a narrow channel with one-row oval dimples // High Temp. 2015. V. 53. № 3. P. 375–386.
85. *Воропаев Г.А., Воскобойник А.В., Воскобойник В.А., Исаев С.А.* Визуализация ламинарного обтекания овальной лунки // Прикладная гидромеханика. 2009. Т. 11. № 4. С. 31–46.
86. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Gul'tsova M.E., Popov I.A.* Transformation and intensification of tornado-like flow in a narrow channel during elongation of an oval dimple with constant area // Tech. Phys. Lett. 2015. V. 41. № 6. P. 606–609.
87. *Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A.* Tornado-like heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2017. V. 109. P. 40–62.
88. *Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Popov I.* Vortex heat transfer enhancement in narrow channels with a single oval-trench dimple oriented at different angles to the flow // J. Enhanced Heat Transfer. 2018. V. 25. № 6. P. 579–604.
89. *Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Nikushchenko D., Popov I., Sudakov A.* Simulation of vortex heat transfer enhancement in the turbulent water flow in the narrow plane-parallel channel with an inclined oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Energies. 2019. V. 12. P. 1296-1–24.
90. *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.
91. *Isaev S.A., Gritckevich M.S., Leontiev A.I., Popov I.A., Sudakov A.G.* Anomalous intensification of a turbulent separated flow in inclined, single-row, oval-trench dimples on the wall of a narrow channel // High Temp. 2019. V. 57. № 5. P. 771–774.
92. *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. P. 118737.1–13.
93. *Isaev S.A., Gritskevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V.* Turbulent flow acceleration and abnormal intensification of separated flow in the channel with a dense arrangement of inclined single-row oval-trench dimples // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. V. 26. № 5. P. 697–702.
94. *Isaev S.A.* Thermal-hydrodynamic design of energy-efficient surfaces with inclined oval-trench vortex generators // J. Phys. Conf. Series. 2019. V. 1359. P. 012002.

95. *Isaev S.A., Leont'ev A.I., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G., Usachov A.E.* Intensification of the detached flow in a single row of inclined oval trench dimples on the wall of a narrow channel // J. Eng. Physics and Thermophysics. 2021. V. 94. № 1. P. 151–159.

96. *Isaev S.A., Chulyunin A.Yu., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G., Usachov A.E.* Analysis of the anomalous intensification of a separate flow and heat transfer in a stabilized section of a narrow channel with single-row, inclined, oval-trench dimples with the use of various grids and turbulence models // High Temp. 2021. V. 59. № 1. P. 106–114.

97. *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 // Tech. Phys. Letters. 2018. V. 44. № 5. P. 398–400.

98. *Isaev S.A., Leont'ev A.I., Mil'man 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 Thermophysics. 2018. V. 91. № 4. P. 963–974.

99. *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.

100. *Isaev S.A., Mazo A.B., Nikushchenko D.V., Popov I.A., Sudakov A.G.* The influence of the angle of inclination of single-row oval-trench dimples in the stabilized hydrodynamic section of a narrow channel on the anomalous intensification of the separated turbulent flow // Tech. Phys. Letters. 2020. V. 46. № 11. P. 1064–1067.

101. *Isaev S.A., Son E.E., Leontiev A.I., Popov I.A., Nikushchenko D.V.* Heat transfer enhancement by surface vortex generators. New basic mechanisms and industrial technologies // The Third Conference "Problems of Thermal Physics and Power Engineering". J. Phys. Conf. Series. 2020. V. 1683. P. 022084.

102. *Isaev S., Lebiga V., Sudakov A., Nikushchenko D., Miau J.J., Chung K.M., Zinovyev V.* Structures control with the use of the throttling effect, vortex cells and surface generators – inclined oval-trench dimples // AIP Conf. Proc. 2021. V. 2351. P. 020002.

103. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Nikushchenko D.V., Son E.E.* Abnormal separated flow intensification and heat transfer enhancement in single-row inclined oval-trench dimples on the narrow channel wall // J. Phys. Conf. Series. 2021. V. 1891. P. 012024.

104. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G.* The effect of anomalous intensification of the separated flow and vortex heat transfer in an inclined oval-trench dimple and the construction of energy-efficient well-structured surfaces // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2211. P. 020003.

105. *Isaev S., Leontiev A., Milman O., Nikushchenko D., Egorova A.* Energy-efficient surface of air capacitors with inclined single-row oval-trench dimples and protrusions // J. Phys. Conf. Series. 2020. V. 1565. P. 012001.

106. *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 // Изв. РАН. Энергетика. 2020. № 4. С. 3–10.

107. *Isaev S.A., Popov I.A., Mikheev N.I., Guvernyuk S.V., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G.* Promising dimple technologies of vortex heat and mass transfer enhancement in energy and microelectronics // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1675. P. 012004.

108. *Isaev S.A., Son E.E., Leontiev A.I., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G.* Effective heat transfer surfaces of tubes and plates with spiral vortex generators – inclined oval-trench dimples // J. Phys. Conf. Series. 2020. V. 1677. P. 012013.

109. *Isaev S.A., Guvernyuk 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 // J. Phys. Conf. Series. 2021. V. 2039. P. 012009.

110. *Зубин М.А., Зубков А.Ф.* Структура отрывного обтекания цилиндрической каверны на стенке плоского канала // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2022. № 1. С. 81–89.

111. *Isaev S.A., Popov I.A., Mikheev N.I., Guvernyuk 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. Series. 2021. V. 2057. P. 012002.

112. *Mironov A., Isaev S., Skrypnik A., Popov I.* Numerical and physical simulation of heat transfer enhancement using oval dimple vortex generators – Review and recommendations // Energies. 2020. V. 13. P. 5243.

113. *Миронов А.А., Исаев С.А., Скрыпник А.Н., Попов И.А., Гортышов Ю.Ф.* Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овально-траншейными вихрегенераторами // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 9. С. 386–402.

114. *Isaev S.A., Leontiev A.I., Nikushchenko D.V., Kong D., Chung K.M., Sudakov A.G.* Vortex heat transfer enhancement by energy-efficient structured plates with zigzag grooves for micro- and macro-scale energy and electronic devices // TPEAC 2021. Journal of Phys.: Conf. Ser. 2022. V. 2150. P. 012004.