

## ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОТДАЧА НА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ВЫЕМКАМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Ю.Ф.Гортышов, И.А.Попов, Д.В.Рыжков, А.В.Щелчков

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им.А.Н.Туполева – КАИ, г.Казань, Россия*

### **Актуальность и современное состояние исследований. Постановка задач.**

При создании высокоэффективных теплообменных устройств, реализующих вынужденное течение теплоносителей, наиболее перспективным способом интенсификации теплообмена является поверхностная интенсификация, в том числе с помощью систем сферических, цилиндрических и траншейных выемок.

Из анализа обзора литературы установлено, что при создании высокоэффективных теплообменных устройств, реализующих вынужденное течение теплоносителей, наиболее перспективным способом интенсификации теплообмена является поверхностная интенсификация, в том числе с помощью систем сферических, цилиндрических и траншейных выемок.

При обзоре исследований картины течения, гидросопротивления и теплоотдачи в каналах с одиночными выемками сферической формы и их системами выделены работы Р. Снидекера, С. Дональдсона, Г.И. Кикнадзе, А.В. Щукина, В.Н. Афанасьева, Я.П. Чудновского, А.А. Халатова, А.А. Александрова, В.С. Кесарева, А.П. Козлова, А.И. Леонтьева, А.В. Воскобойника, М.А. Готовского, М.Я. Беленького, Э.П. Волчкова, В.И. Терехова, С.А. Исаева, Ю.Ф. Гортышова, Ю.А. Кузма-Кичты, К.Л. Муны–бина, Ф. Чоу, Э.Д. Сергиевского, Ф. Лиграни, С. Муна, Дж. Махмуда и многих др. Анализ литературы показал, что практически отсутствуют рекомендации по определению границ режимов обтекания интенсификаторов для дальнейшего обоснованного выбора расчетных зависимостей для определения коэффициентов гидросопротивления и теплоотдачи.

Результаты исследования теплоотдачи и гидродинамики при обтекании цилиндрических выемок изложены в работах К. Вигхарда, Е.М. Спэрроу, А.А. Халатова, С. Муна, М. Хивады, В.И. Терехова, Ф. Гренарда, Ф. Лиграни и др. Несмотря на накопленный объемный материал по исследованию осредненных и локальных характеристик гидродинамики и теплообмена в каналах с такими выемками, в литературе практически отсутствуют инженерные рекомендации по определению режимов обтекания и методики расчетного прогнозирования коэффициентов гидросопротивления и теплоотдачи в каналах с данными видами интенсификаторов теплообмена.

Трехмерные траншейные выемки различной формы рассматривались в экспериментальных и расчетных работах А.А. Халатова, С.А. Исаева, В.И. Терехова, Дж. Парка, Э.Д. Сергиевского, А.А. Титова, А.В. Воскобойника и др. В работах С.А. Исаева и др. показана перспективность использования сферических траншейных выемок. Однако исследования носят преимущественно численный характер, и в них практически отсутствуют данные о границах режимов обтекания интенсификаторов и обобщающие зависимости для расчета локальной и осредненной теплоотдачи. Поэтому для решения проблем интенсификации теплообмена необходимы комплексные расчетно-теоретические и экспериментальные исследования теплообмена и трения в каналах с интенсификаторами.

В соответствии с этим сформулированы цель и основные задачи исследования.

Цель работы: выявить и обосновать механизмы интенсификации теплоотдачи в каналах и на поверхностях с выемками различной формы, разработать рекомендации по определению режимов обтекания и расчету гидросопротивления и теплоотдачи, необходимые для разработки теплогидравлически эффективного теплообменного оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Установить границы режимов течения в каналах с интенсификаторами теплообмена в виде сферических, цилиндрических и траншейных выемок.
2. Выявить и математически описать влияние основных режимных параметров и геометрии интенсификаторов на теплоотдачу и гидросопротивление в каналах с цилиндрическими выемками.
3. На основе экспериментальных данных дать основы физических моделей течения и теплообмена в каналах с цилиндрическими и траншейными выемками.
4. Провести сравнительный анализ интенсификаторов теплоотдачи по их теплогидравлической эффективности; выявить наиболее перспективные интенсификаторы и дать рекомендации по их оптимальным параметрам и рациональным режимам эксплуатации.

### Экспериментальная установка и методики исследований

Объектом исследований во всех опытах являлись одиночные элементы и рельефы поверхностных интенсификаторов в виде систем сферических, цилиндрических или траншейных выемок (рис. 1). В опытах исследовались сферические и цилиндрические выемки с диаметром отсиска  $d$  на поверхности от 10 до 30 мм, глубиной  $h$  от 1,6 до 8 мм, что обеспечивало относительную глубину выемок  $h/d=0,1-0,5$ . Траншейные выемки имели диаметр отсиска от 3 до 16 мм, глубину от 0,3 до 8 мм, что обеспечивало  $h/d=0,1-0,5$ , а также длину  $l/d=1$  и угол натекания потока на выемку  $\varphi=0-90^\circ$ .

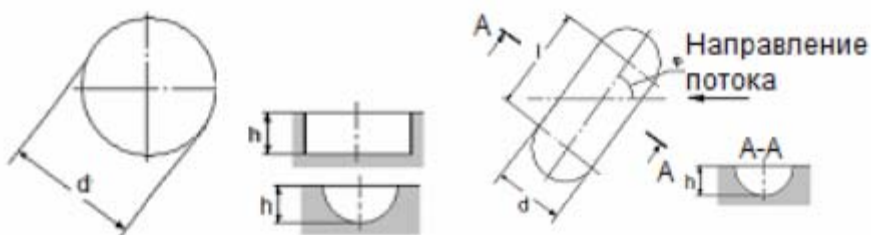


Рис. 1. Схемы элементов исследованных поверхностных интенсификаторов теплоотдачи в виде сферических, цилиндрических или траншейных выемок

В работе использовались три стенда: для исследования картин течения, исследования локальной теплоотдачи при обтекании пластин с интенсификаторами теплоотдачи и исследования гидросопротивления и теплоотдачи в каналах с интенсификаторами.

Визуализация режимов обтекания выемок производилась при использовании воды в качестве рабочей жидкости. Для проведения опытов по визуализации режимов обтекания выемок использовался экспериментальный стенд, состоящий из накопительного бака, циркуляционного насоса, системы рабочих участков с одиночными и системами выемок, системы измерений параметров потока и системы визуализации потоков. Рабочие участки в виде прямоугольных каналов с входными устройствами изготавливались из оргстекла для проведения визуализации. На нижней стенке участков наносились выемки различных размеров, конфигураций и количества, перед которыми для визуализации обтекания выемок с помощью дозирующего устройства производился подвод красящего вещества (тушь или чернила) через одно или систему отверстий. Визуализация проводилась с использованием цифровой видеокамеры Sony-DSR-TRV110E с 24-х кратным увеличением и цифровой фотокамеры Sony-DSC-F505V с режимом макросъемки с 10-кратным увеличением.

Обработка результатов визуализации проводилась с использованием программных продуктов Virtual Dub 1.6.0 и Microsoft Windows Movie Maker 5.1 версии 2.1.4026.1.

Исследования локальной теплоотдачи при обтекании пластин с интенсификаторами теплоотдачи проводились на экспериментальном стенде в виде воздушной аэродинамической трубы с размещенной в ее тракте исследуемой пластиной. Аэродинамическая труба, работающая по принципу всасывания, представляет собой канал квадратного сечения со стенками из органического стекла для возможности визуализации. Равномерное распределение скорости во входном сечении аэродинамической трубы достигалось за счет входного устройства. В ходе экспериментов изменялись скорость воздушного потока, нагрев пластины, а также тип и параметры наносимых на пластину интенсификаторов. Исследуемая пластина устанавливалась на основу из теплоизоляционного материала и прижималась к электронагревателю в виде нихромовой пластины. Электронагреватель и исследуемые пластины располагались по обе стороны основы, что практически исключало тепловые потери. Скорость потока определялось при помощи трубки Пито-Прандтля, закрепленной в координатном устройстве. Для измерения температуры потока и исследуемой поверхности использовались хромель-копелевые термопары. Для исследования локальной теплоотдачи на интенсифицированных поверхностях методом инфракрасной термографии в корпусе аэродинамической трубы было выполнено технологическое отверстие, позволяющее герметично установить объектив тепловизора NEC TH7700. Обработка полученных данных производилась с помощью стандартного программного обеспечения NEC Image Processor ver.4.7. build.4.7.26. Для обеспечения высокого качества тепловизионной съемки на поверхность наносилось покрытие с заданной степенью черноты (шпаклевка), при этом при измерении температур показания тепловизора сравнивались с показаниями термопар в реперных точках. Оптическая система тепловизора обеспечивала заданный угол получения изображения. Данная методика обеспечивала погрешность определения плотности теплового потока  $\pm 20\%$ . На основе измерений плотности теплового потока по параметрам электрического тока на нагревателе, температуры потока и локальной и осредненной температуры по поверхности с помощью программного обеспечения NEC Image Processor определялись локальные и осредненные по интенсифицированной поверхности коэффициенты теплоотдачи. Тестовые опыты на гладкой пластине при ламинарном и турбулентном режиме обтекания потока воздухом пластины показали расхождение экспериментальных и теоретических расчетных значений коэффициентов теплоотдачи (8–15) %.

На описанном стенде также производилась визуализация обтекания воздухом поверхностей с одиночными или системами поверхностных интенсификаторов с помощью саже-керосиновой и саже-масляной визуализации.

Для исследования гидродинамики и теплоотдачи в каналах с поверхностными интенсификаторами при вынужденной конвекции газа использовался экспериментальный стенд, состоящий из системы подачи воздуха, системы измерений и рабочего участка. Основными элементами системы подачи воздуха являются входное устройство, объемный компрессор, фильтр-маслоуловитель, перепускной клапан, расходомерная шайба, ресивер. В работе исследовались только турбулентные течения в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re_D = \rho w D / \mu = (9-27) \cdot 10^3$  ( $D$  – эквивалентный диаметр канала). Газодинамический тракт рабочего участка представлял собой теплоизолированный канал прямоугольного сечения шириной 96 и длиной 190 мм. Высота канала менялась сменными вставками высотой 2-12 мм, что обеспечивало изменение относительной длины канала в пределах  $L/D=8,9-48,7$ . На одной из поверхностей стенок канала размером 96x190 мм методом фрезерования наносились рельефы из выемок. Данная стенка во время опытов нагревалась за счет встроенного электронагревателя сопротивления. Температура поверхности измерялась с помощью 24 термопар, расположенных по длине пластине в областях между выемками и в

них, что позволяло более точно определять осредненную температуру интенсифицированной поверхности с учетом неравномерности распределения температур на ней. В опытах также фиксировались средние температуры и статические давления теплоносителя на входе и выходе из рабочего участка и расход теплоносителя через рабочий участок. Коэффициент теплоотдачи в канале определялся калориметрическим методом по определяемому тепловому потоку через расход и температуры теплоносителя (которые проверялись через измеряемые параметры электрического тока на нагревателе с учетом определяемых в тестовых опытах потерь через стенки канала), разнице измеренных средней температуры стенки и средней температуры теплоносителя в канале и площади теплообмена с учетом ее развития за счет нанесения выемок. Коэффициент гидросопротивления определялся по перепаду давления на участке, длине и гидравлическому диаметру канала, среднemasсовой скорости потока в канале и его плотности. Оценка ожидаемой погрешности показала, что принятая методика и используемое метрологическое оборудование должно обеспечить погрешность измерений коэффициентов теплоотдачи до  $\pm 15\%$ , а коэффициента гидросопротивления – до  $\pm 8\%$ . Тестовые опыты, проведенные на стенде для гладкого канала при  $L/D=8,9-48,7$  показали согласование экспериментальных и расчетных данных по гидросопротивлению и теплоотдаче с учетом влияния длины начального участка (отклонение экспериментальных и расчетных данных не более  $\pm 15\%$ ).

### Визуализация течений. Карты режимов.

Визуализация течений проводилась при течении воды в плоских каналах различной высоты с односторонним расположением как одиночных выемок, так и систем сферических (рис. 2), цилиндрических (рис. 3) и траншейных (рис. 4) выемок при температуре теплоносителей  $15-20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Re_D=15-20\ 000$  и параметрах интенсификаторов и канала  $h/d=0,1-0,5$ ;  $h/H=0,06-2,0$ ;  $H/d=0,21-1,42$  ( $H$  – высота канала). Угол расположения траншейных выемок относительно набегающего потока варьировался в пределах  $0-90^\circ$ .

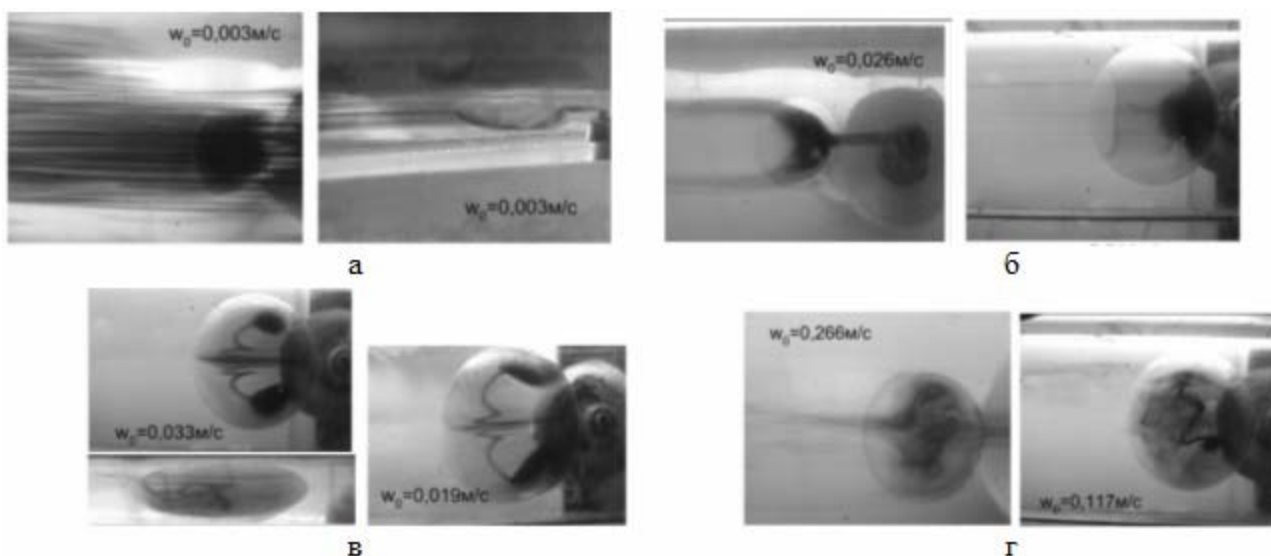


Рис. 2. Режимы обтекания сферических выемок в канале. Направление потока слева направо: а-ламинарное безотрывное обтекание; б-ламинарное отрывное обтекание с присоединением ко дну выемки; в-ламинарное отрывное обтекание без присоединения ко дну выемки; г-турбулентное отрывное обтекание без присоединения ко дну выемки

Ламинарный режим характеризовался четкими, неразмытыми и прямыми линиями течения основного потока в канале. Ламинарно-турбулентный переход фиксировался как

начало полного размывтия траектории движения вводимого красящего вещества (тушь, чернила). Результаты визуализации выявили следующие режимы обтекания сферических выемок: 1) ламинарное безотрывное обтекание; 2) ламинарное отрывное обтекание выемки с присоединением потока ко дну выемки; 3) ламинарное течение без присоединения потока ко дну выемки; 4) турбулентное течение с присоединением потока в выемке; 5) турбулентное отрывное обтекание выемки без присоединения потока ко дну выемки (классификация режимов принята согласно работам А.И. Леонтьева, В.В. Олимпиева и др.).

Отличительной особенностью обтекания цилиндрических выемок от сферических являлось возможность формирования одно-, двух-, трех- и четырехячеистых вихревых структур в выемке при ламинарном течении без присоединения потока ко дну выемки по сравнению с характерным для сферических выемок развитием одно- и двухячеистых вихревых структур при этом режиме, а также формированием вторичных зон рециркуляции в более острых углах на дне выемки.

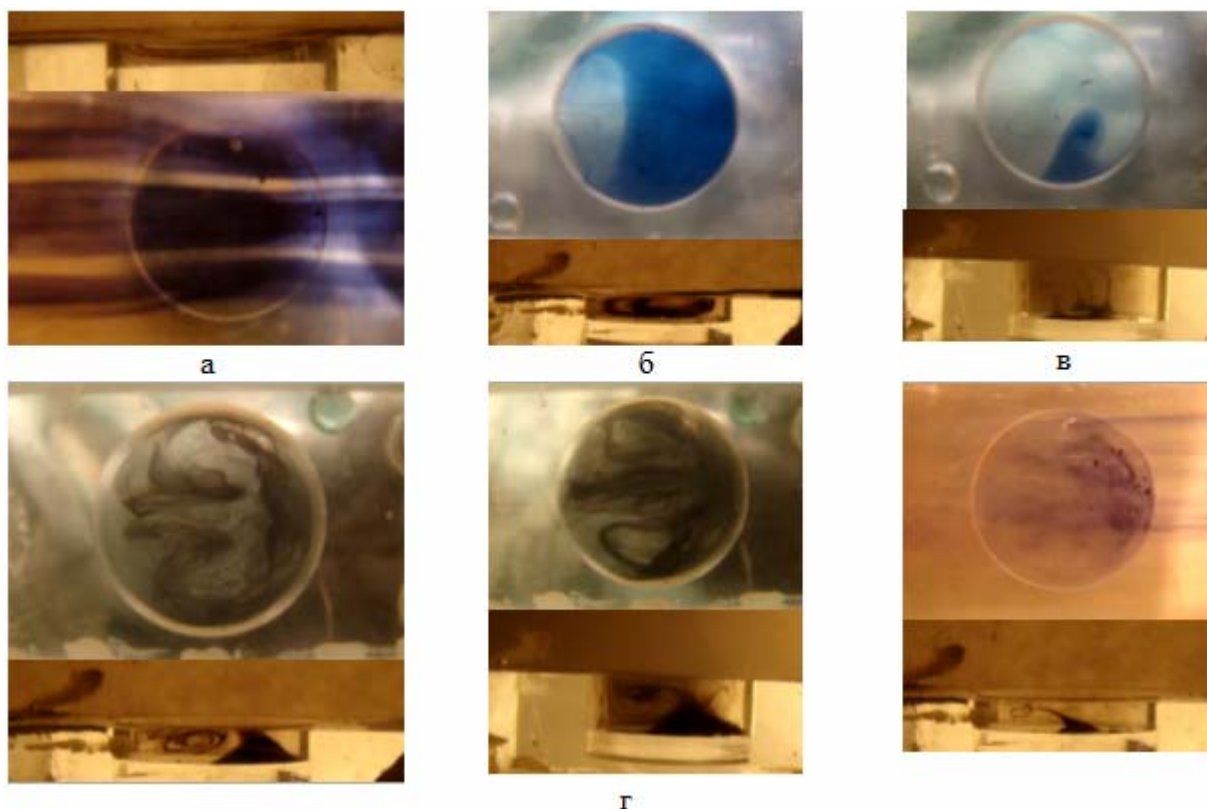
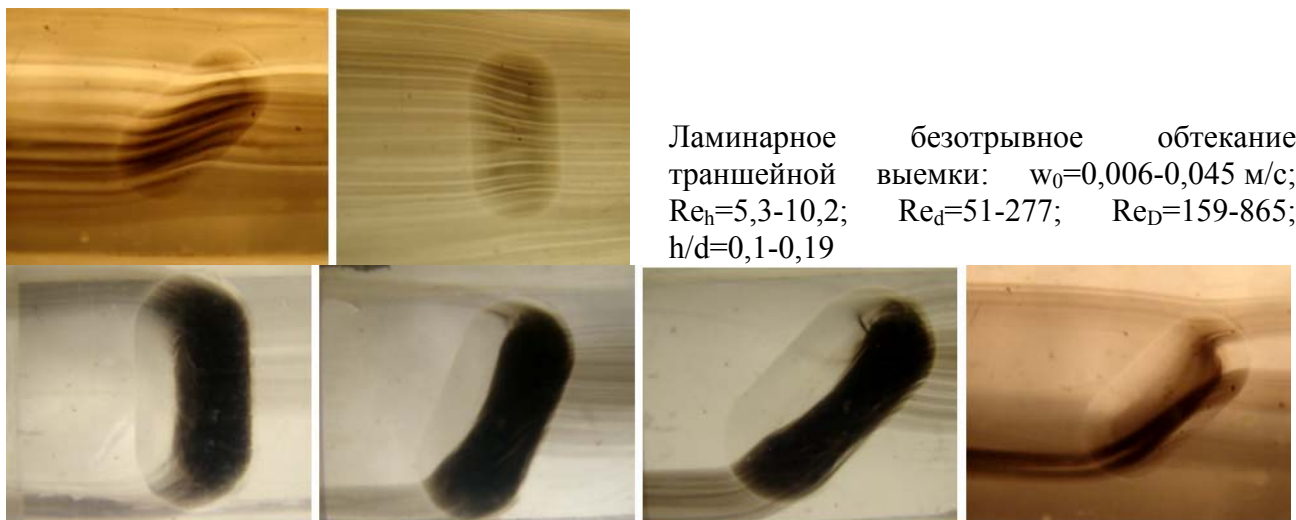


Рис. 3. Режимы обтекания цилиндрических выемок в канале. Направление потока справа налево: а-ламинарное безотрывное обтекание; б-ламинарное отрывное обтекание выемки с присоединением ко дну; в-ламинарное и турбулентное отрывное обтекание выемки без присоединения ко дну выемки; г-турбулентное отрывное обтекание одиночной выемки без присоединения ко дну выемки

Для траншейных выемок выявлена зависимость наличия одно- и двухячеистых вихревых структур в выемке при отрывном обтекании выемок без присоединения ко дну выемки и области формирования центрального и торцевых парных вихревых за выемкой от угла ориентирования выемки к потоку и скорости потока.

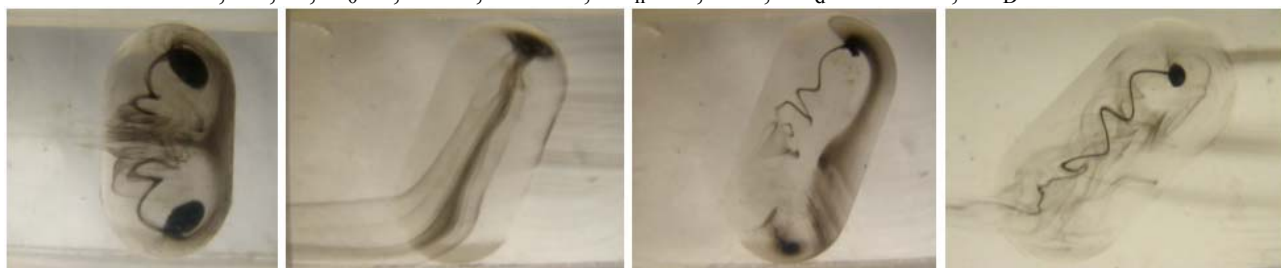
Эксперименты по визуализации обтекания сферических выемок также проведены в аэродинамической трубе на воздухе в области скоростей от 20 до 60 м/с при использовании сферических выемок с  $h/d=0,09-0,5$ . В ходе опытов дополнительно получены сведения о развитии «переключательного» режима обтекания выемок, связанного с переключениями

эпицентров вихревых структур в выемках при  $h/d=0,2-0,5$  и  $Re_h=32\ 000-63\ 000$ . Данные картины течения были подтверждены также результатами численных исследований, приведенными в диссертации. Выявлены частота переключений и ее неравномерность в системах выемок.



Ламинарное безотрывное обтекание траншейной выемки:  $w_0=0,006-0,045$  м/с;  $Re_h=5,3-10,2$ ;  $Re_d=51-277$ ;  $Re_D=159-865$ ;  $h/d=0,1-0,19$

Ламинарное отрывное обтекание траншейной выемки с присоединением ко дну выемки:  $h/d=0,1-0,32$ ,  $w_0=0,006-0,109$  м/с;  $Re_h=19,9-46$ ;  $Re_d=243-520$ ;  $Re_D=85-1\ 624$

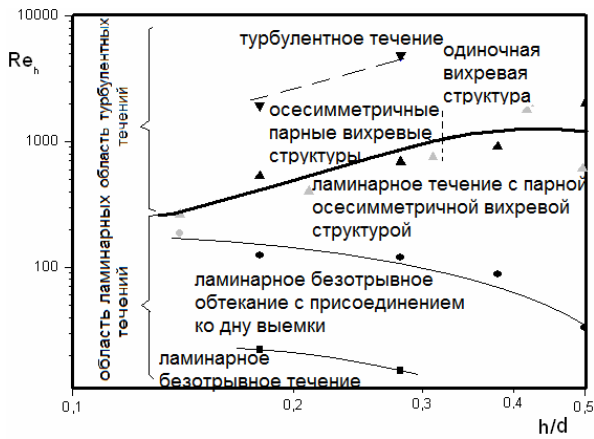


Ламинарное и турбулентное отрывное обтекание траншейной выемки с присоединением ко дну выемки:  $h/d=0,2-0,5$

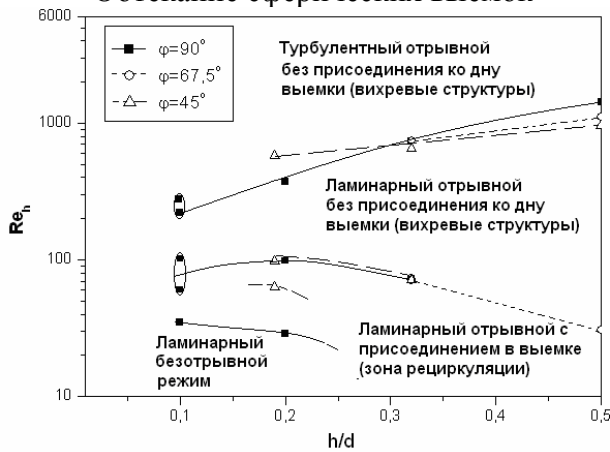
Рис. 4. Режимы обтекания траншейных выемок в канале. Направление потока справа налево

Результаты визуализации позволили определить механизмы интенсификации теплоотдачи при нанесении рельефов выемок различной формы: более ранний ламинарно-турбулентный переход в каналах, периодическое обновление пограничного слоя за выемками и турбулизация потока за выемками происходит за счет воздействия периодического (переключательного) выброса массы из выемок в пристенный слой в виде центрального и торцевых парных вихрей.

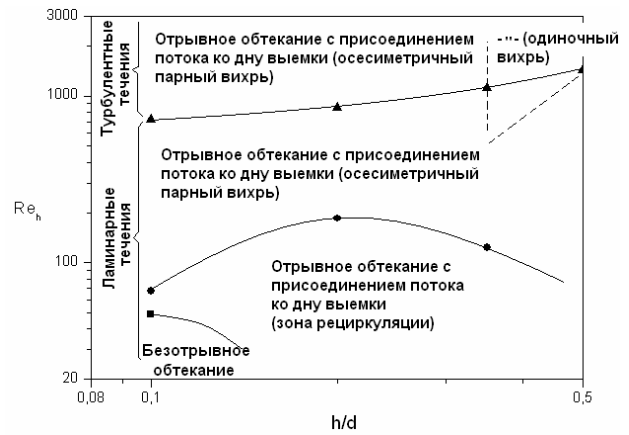
На основе результатов визуализации разработаны карты режимов для сферических, цилиндрических и траншейных выемок (рис. 5). Для цилиндрических и траншейных выемок карты режимов разработаны впервые. Для сферических выемок проведено уточнение полученной ранее Ю.Ф. Гортышовым и И.А. Поповым карты режимов для воздуха путем учета данных для воды. Карты режимов приведены в координатах  $Re_h-h/d$  и  $Re_D-h/d$ . Все режимы для различных выемок соответствуют ранее показанным моделям обтекания. Анализ карт режимов показывает их подобие по значениям переходных чисел Рейнольдса. Из карт режимов также видно, что увеличение относительной глубины выемки  $h/d$  приводит к более раннему ламинарно-турбулентному переходу. Разработанные карты позволяют прогнозировать режим обтекания, на основе которого производится выбор расчетных формул для гидросопротивления и теплоотдачи.



Обтекание сферических выемок



Обтекание траншейных выемок



Обтекание цилиндрических выемок

Рис. 5. Карты режимов обтекания одиночных и систем сферических, цилиндрических и траншейных выемок в каналах

Результаты визуализации сферических, цилиндрических и траншейных выемок показали подобие физических моделей обтекания выемок. Поэтому для описания механизмов течения в выемках могут использоваться физические модели обтекания сферических выемок, изложенные в работе А.И. Леонтьева с соавторами и показанные на рис. 6. Отличительной особенностью физических моделей для цилиндрических и траншейных выемок является наличие вторичных рециркуляционных зон. Таким образом, для цилиндрических и траншейных выемок пригодны расчетные модели, предложенные в работах А.И. Леонтьева и др.

### Результаты экспериментального исследования гидросопротивления и теплообмена

Исследования распределения локальных коэффициентов теплоотдачи при обтекании пластины с нанесенными рельефами производились на экспериментальном стенде в виде воздушной аэродинамической трубы методом инфракрасной съемки (рис. 7).

Исследования производились на одиночных и системах выемок сферической, цилиндрической и траншейной формы в диапазоне течений, соответствующих турбулентному отрывному обтеканию выемок без присоединения ко дну выемки ( $Re_h=20\ 000-65\ 000$ ). Исследовались выемки относительной глубиной  $h/d=0,09-0,5$  при их шахматном и коридорном расположении. Для траншейных выемок изменялся угол натекания воздушного потока от  $45^\circ$  до  $90^\circ$ . В ходе экспериментов обоснованы механизмы интенсификации теплоотдачи и показано их подобие для всех исследуемых типов интенсификаторов теплоотдачи как элементов дискретной шероховатости. Для всех

исследованных форм наблюдалось повышение температуры в выемках (понижение коэффициентов теплоотдачи), причем наблюдался рост температуры от задней кромки к передней, что соответствует развитию внутреннего пограничного слоя в рециркуляционном течении по дну выемки (рис. 7). За выемкой наблюдалось значительное понижение температуры в зоне повышенной теплоотдачи из-за обновления пограничного слоя и турбулизирующего воздействия вихревых структур, образующихся за выемкой. Установлено, что влияние выемки на поток сохраняется на расстоянии порядка  $2d$  от выемки вниз по течению. В поперечном направлении зона влияния выемки достигает  $0,5d$ . Описанная картина тепловизионных наблюдений полностью соответствует изложенной в главе 3 физической модели турбулентного отрывного обтекания выемок без присоединения потока к их дну.

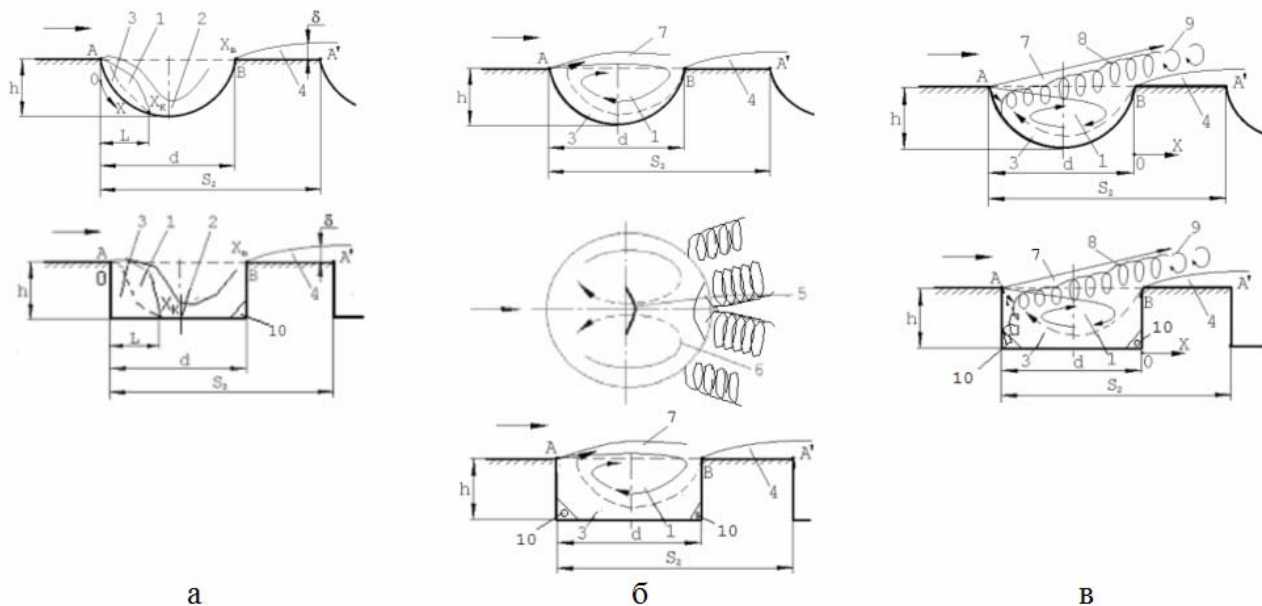


Рис. 6. Физические модели обтекания поверхностей со сферическими, цилиндрическими и траншейными выемками: а-обтекание поверхности с выемками ламинарным потоком с присоединением на дне выемки; б-обтекание поверхности с выемками ламинарным потоком без присоединения на дне выемки; в-обтекание поверхности с выемками турбулентным потоком без присоединения потока на дне выемки; 1 – рециркуляционное течение; 2 – внутренний ламинарный пограничный слой; 3–внутренний ламинарный пограничный слой в зоне рециркуляции; 4 – внутренний пограничный слой; 5 – вихревая ячейка; 6 – внутренний парный вихрь; 7 – слой смешения; 8 – смерчеобразный вихрь; 9 – вихрь Кармана; 10 – вторичная зона рециркуляции

В ходе тепловизионных исследований также произведена оценка средних коэффициентов теплоотдачи на исследованных поверхностях с рельефами сферических, цилиндрических и траншейных выемок. Для пластин со сферическими выемками в шахматном расположении при  $h/d=0,3$ ,  $\bar{f} = 0,67$  ( $\bar{f}$  – относительная площадь поверхности, занимаемая выемками) установлено повышение коэффициентов теплоотдачи до  $\alpha/\alpha_{гл}=3,77$  раза при различных скоростях обтекания ( $Re_x=(1,5-6) \cdot 10^5$ ). Полученные значения численно соответствуют ранее полученным данным для каналов (работы Ю.Ф. Гортышова и И.А. Попова). В ходе тепловизионных исследований теплоотдачи на пластинах с цилиндрическими выемками при турбулентном режиме обтекания выявлена интенсификация теплоотдачи на уровне  $\alpha/\alpha_{гл}=1,5$  раза при изменении в диапазоне  $h/d=0,5$ ,  $\bar{f} = 0,65$ , ( $Re_x=(1,5-6) \cdot 10^5$ ) (рис. 8 а). Наибольший прирост средних коэффициентов теплоотдачи



соответствовал пластинам с  $h/d=0,5$ . Для систем траншейных выемок исследование теплоотдачи показало, что интенсификация средней теплоотдачи составляет до 1,8 раза при  $h/d=0,35$ ,  $\bar{f} = 0,6$ ,  $Re_x=(1,5-6)\cdot 10^5$  (рис. 8 б), коэффициенты теплоотдачи максимальны при шахматном расположении выемок с наклоном траншей в одном направлении, максимальная интенсификация наблюдается при использовании выемок с  $h/d=0,5$ . При изменении угла наклона выемки к потоку в диапазоне от 45 до 90 ° наблюдается экстремум при  $\varphi=67,5^\circ$ . Это экспериментально подтверждает полученные в расчетных работах С.А. Исаева и др. данные об оптимальном угле наклона траншейных выемок, близком к  $\varphi=74^\circ$ .

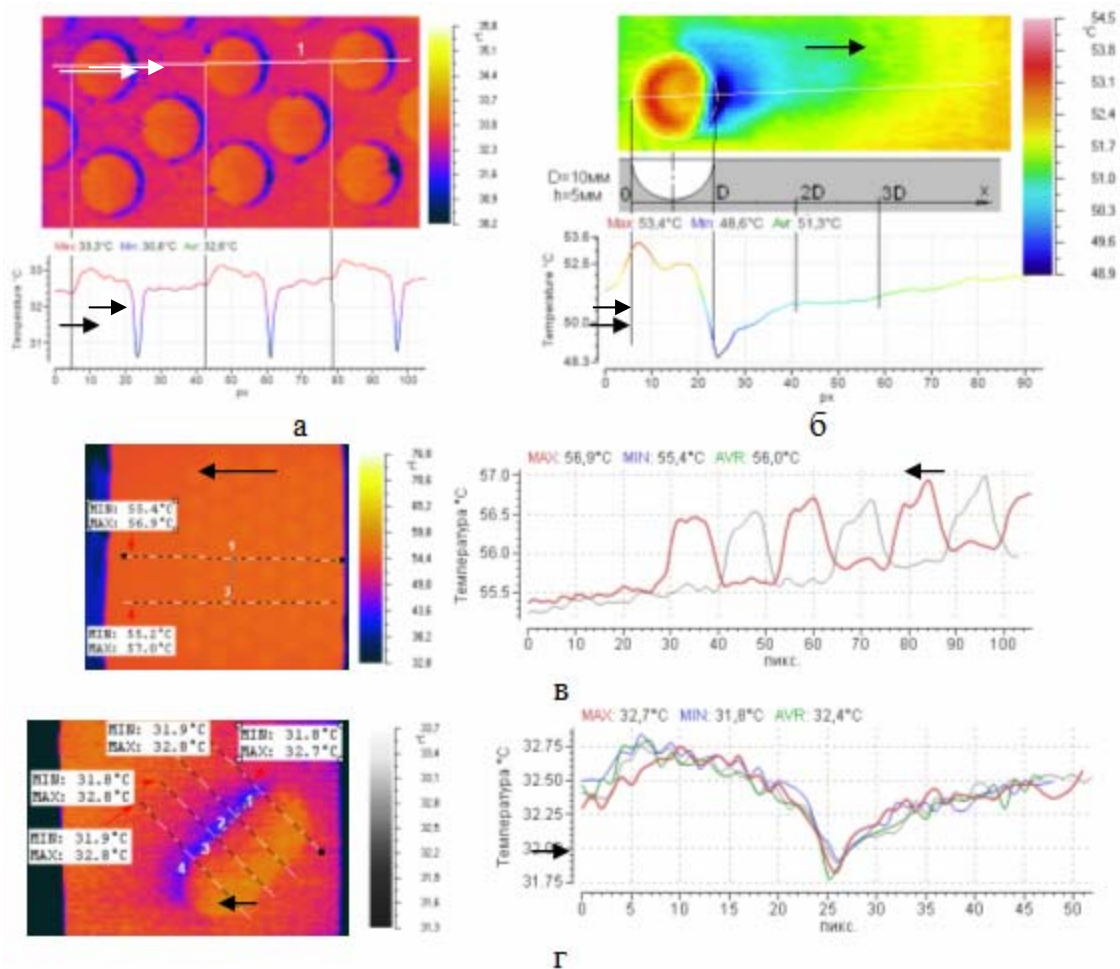


Рис. 7. Примеры распределения температур на поверхности пластин со сферическими (а –  $h/d=0,3$ ,  $q_w=2780$  Вт/м<sup>2</sup>,  $w=27,33$  м/с; б –  $h/d=0,5$ ,  $w_0=17,82$  м/с,  $q=3\ 667$  Вт/м<sup>2</sup>), цилиндрическими (в –  $h/d=0,5$ ,  $w=15,24$  м/с) и траншейными (г –  $h/d=0,3$ ,  $l=d$ ,  $\varphi=45^\circ$ ,  $w=49,19$  м/с) выемками, полученные тепловизионной съемкой

В работе проведено экспериментальное исследование коэффициента гидросопротивления (рис. 9) и средних коэффициентов теплоотдачи (рис. 10) в щелевых каналах с соотношением высоты к ширине канала от 0,02 до 0,125 при одностороннем нанесении цилиндрических выемок в шахматном порядке. Диаметр выемок составлял  $d=16$  мм, глубина выемок составляла  $h=1,6; 3,2; 5,6; 8,0$  мм, что обеспечивало относительную глубину выемок  $h/d=0,1; 0,2; 0,35; 0,5$ . Увеличение поверхности составляло 7,7; 15,5; 27,2; 38,8 % в соответствии с относительной глубиной выемок. Площадь исходной гладкой поверхности составляла 198x96 мм, плотность расположения выемок 0,52. Исследовались каналы с относительной длиной  $L/D\approx 50$ .

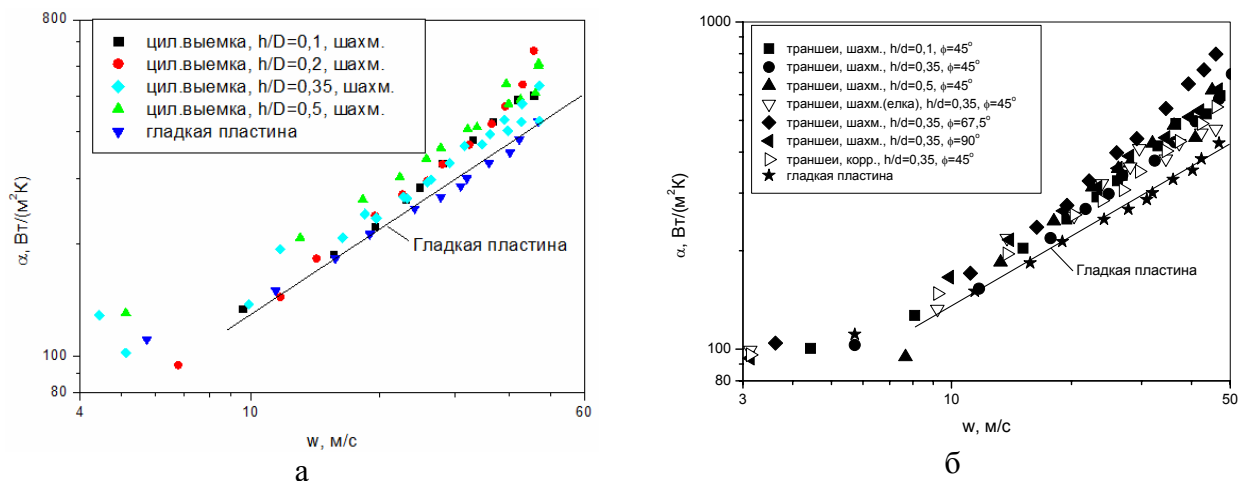


Рис. 8. Данные по средней теплоотдаче на пластине с цилиндрическими (а) и траншейными (б) выемками: точки – эксперимент, линия – расчет для турбулентного режима обтекания гладкой пластины

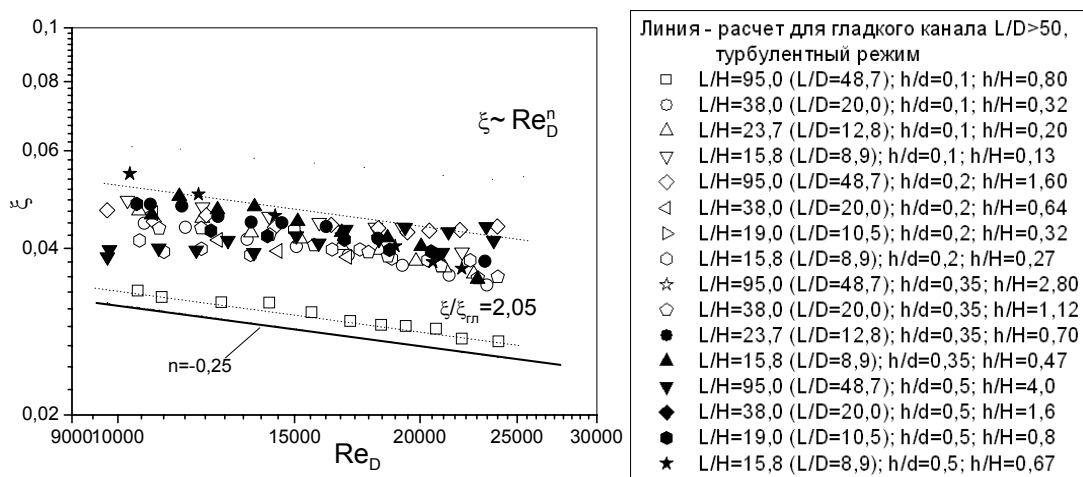


Рис. 9. Экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению в каналах с цилиндрическими выемками

Коэффициент гидросопротивления определялся по измерениям статического давления на входе и выходе из канала, скорости потока, длине канала и его гидравлическому диаметру. Отборники давления устанавливались в области течений, где влияние вихревых и обратных течений, генерируемых выемками, практически исключено. Исследования проведены в диапазоне чисел  $Re_D = 9\ 000 - 27\ 000$ , при которых согласно разработанной карте режимов при  $h/d = 0,1 - 0,5$  в каналах с цилиндрическими выемками гарантированно реализуется турбулентный режим течения без присоединения потока ко дну выемки.

Данный режим течения наиболее интересен для практических приложений. Повышение гидросопротивления  $\xi/\xi_{гл}$  в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса  $Re_D$  при нанесении выемок относительной глубины  $h/d = 0,1; 0,2; 0,35$  и  $0,5$  ( $h/D = 0,4; 0,8; 1,4$  и  $2$ ) составило  $7,4; 49; 50$  и  $53\ \%$ , соответственно. Обобщение экспериментальных данных производилось по модели  $\xi = f(Re_D, h/D)$ . Анализ влияния  $h/D$  при  $h/d = 0,2 - 0,5$  на коэффициент гидросопротивления в каналах с  $L/D = 48,7$  показал практически автомодельность (в пределах точности эксперимента) коэффициента гидросопротивления от  $h/D$ , поэтому обобщение производилось отдельно для каналов с  $h/d = 0,2 - 0,5$  и для каналов с  $h/d = 0,1 - 0,2$ . Получены зависимости для коэффициентов гидросопротивления в виде:

$$\text{ - для } h/d=0,2-0,5, h/D=0,8-2 \quad \xi = \frac{0,468}{Re_D^{0,25}} \quad (1)$$

$$\text{ - для } h/d=0,1-0,2 \text{ и } h/D=0,4-0,8 \quad \xi = \frac{0,525}{Re_D^{0,25}} (h/D)^{0,48} \quad (2)$$

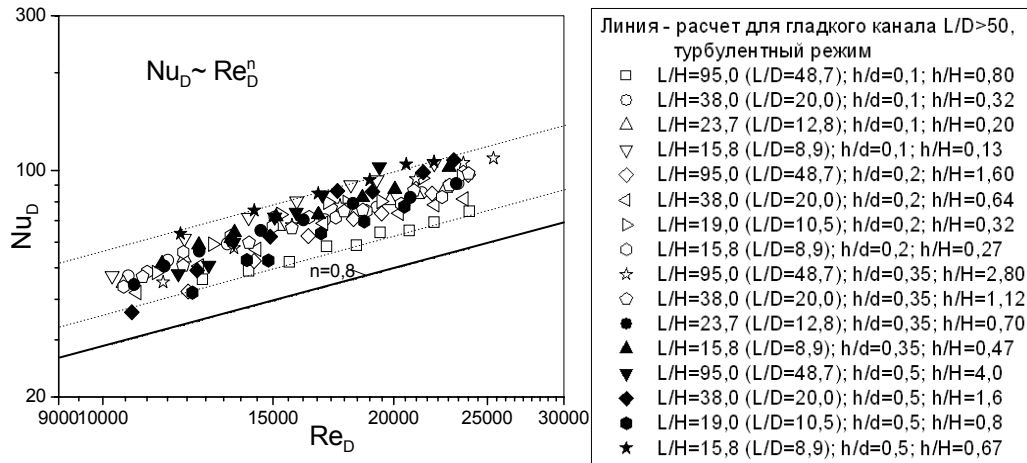


Рис. 10. Экспериментальные данные по среднему коэффициенту теплоотдачи в каналах с цилиндрическими выемками

Зависимости (1) и (2) справедливы в диапазоне  $Re_D=9\ 000-25\ 000$ ,  $L/D=48,7$ , и описывают все точки с погрешностью  $\pm 11\%$  и  $\pm 9\%$  соответственно при доверительной вероятности 0,95.

Анализ влияния на увеличение коэффициента гидросопротивления  $\xi/\xi_{гр}$  в относительно коротком канале с цилиндрическими выемками относительных конструктивных параметров канала (относительной длины  $L/D$ ) и относительной глубины шероховатости ( $h/d$ ,  $h/D$ ) показал (рис. 11), что с уменьшением  $L/D$  значение  $\xi_{гр}$  возрастает; с уменьшением  $L/D$  значение  $\xi$  возрастает при  $h/D=0,1-0,2$  и становится практически постоянным при  $h/D=0,2-0,5$ ; при постоянных  $L/D$  в диапазоне 10,5-48,7 с увеличением  $h/D$  ( $h/d$ ) относительные гидравлические потери  $\xi/\xi_{гр}$  в основном возрастают, при этом с ростом  $h/D$  ( $h/d$ ) интенсивность роста  $\xi/\xi_{гр}$  замедляется, а при  $L/D=8,9$  с ростом  $h/D$  ( $h/d$ ) значение  $\xi/\xi_{гр}$  практически постоянно; с уменьшением  $L/D$  уровень значений  $\xi/\xi_{гр}$  уменьшается.

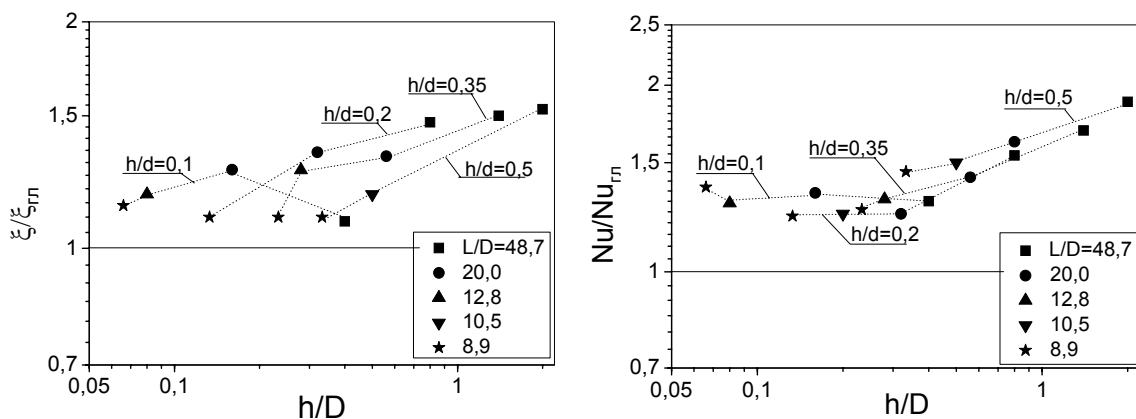


Рис. 11. Влияние на увеличение коэффициентов гидросопротивления и средней теплоотдачи в канале с цилиндрическими выемками относительных конструктивных параметров канала (относительной длины  $L/D$ ) и относительной глубины шероховатости ( $h/d$ ,  $h/D$ ) при ( $Re_D=20\ 000$ )

Исследование теплоотдачи производилось с определением теплового потока калориметрическим методом, площади теплообмена с учетом развития за счет нанесения выемок, средних температур поверхности теплообмена и теплоносителя.

Исследования средних коэффициентов теплоотдачи в каналах с односторонним нанесением цилиндрических выемок при  $L/D=48,7$  и обобщение экспериментальных данных по средней теплоотдаче производилось по моделям  $Nu_D=f(Re_D, Pr, h/D, T_f/T_w)$ , которые позволили получить расчетную зависимость для среднего коэффициента теплоотдачи в виде:

$$Nu_D = 0,033 Re_D^{0,8} Pr^{0,43} (h/D)^{0,2}. \quad (3)$$

Зависимость (3) описывает экспериментальные точки в диапазоне  $Re_D=12\ 500-25\ 000$ ,  $h/d=0,1-0,5$ ;  $h/D=0,4-2,0$  с отклонением  $\pm 15\%$  при доверительной вероятности 0,95.

Исследования теплоотдачи в относительно коротких каналах с  $L/D=8,9-48,7$  (рис. 11) позволили отметить, что при  $L/D=48,7$  с увеличением  $h/D$  ( $h/d$ ) интенсификация теплоотдачи  $Nu/Nu_{г\text{л}}$  возрастает. При постоянных  $L/D$  в диапазоне  $L/D=8,9-20,0$  при переходе с  $h/d=0,1$  до 0,2 наблюдается незначительное уменьшение  $Nu/Nu_{г\text{л}}$  и затем с ростом  $h/d$  с 0,2 до 0,5 – постоянный рост  $Nu/Nu_{г\text{л}}$ . При уменьшении  $L/D$  наблюдается уменьшение уровня  $Nu/Nu_{г\text{л}}$  при  $h/d=0,5$ ; 0,35 и частично 0,2 (при уменьшении  $L/D$  с 48,7 до 20,0), при  $h/d=0,1$  и частично 0,2 (при уменьшении  $L/D$  с 20,0 до 8,9) уровень  $Nu/Nu_{г\text{л}}$  практически постоянен.

Теплогидравлическая эффективность каналов с цилиндрическими выемками оценивалась с использованием критерия  $\bar{E}' = [(Nu/Nu_{г\text{л}})/(\xi/\xi_{г\text{л}})]$ . Установлено, что максимальное значение критерия  $\bar{E}'$  свойственно цилиндрическим выемкам с  $h/d=0,1$ . В этом случае теплогидравлическая эффективность  $[(Nu/Nu_{г\text{л}})/(\xi/\xi_{г\text{л}})]=1,2-1,3$  во всем диапазоне изменения чисел  $Re_D=9\ 000-27\ 000$  (при этом повышение коэффициентов теплоотдачи может достигать 25-74 %). Полученные значения теплогидравлической эффективности цилиндрических выемок сопоставимы с максимальной теплогидравлической эффективностью поперечных кольцевых выступов и сферических выемок, сравнительный анализ по которым представлен в работах А.И. Леонтьева и В.В. Олимпиева.

Согласно рекомендациям В.К. Мигая, размеры поверхностных интенсификаторов при турбулентном режиме течения должны быть сопоставимы с толщиной вязкостного подслоя и переходной области турбулентного пограничного слоя, суммарная толщина которых в гладком канале оценивается параметром  $h^+=(h/D)Re_D \sqrt{\xi/8} \approx 30$ . В выполненном исследовании, при  $h/d=0,1$  и  $h/D=0,08$  значение  $h^+$  составляло 65-143 при  $Re_D=11\ 000-27\ 000$ , а при  $h/D=0,1$  и  $h/D=0,4$  –  $h^+=283$  при  $Re_D=11\ 000$  и  $h^+=622$  при  $Re_D=27\ 000$ . В своих работах Г.А. Дрейцер считает, что при турбулентном течении газов целесообразно искусственно турбулизовать пристенный слой толщиной порядка  $h^+=50-200$ , т.е. реализованные в работе значения  $h^+$  близки к оптимальным.

### Основные выводы

1. Впервые разработаны карты режимов обтекания траншейных и цилиндрических выемок и их систем. Для сферических выемок ранее полученная карта режимов для воздуха дополнена данными для воды.

2. Уточнены физические модели обтекания сферических, цилиндрических и траншейных выемок. Установлено подобие процессов их обтекания.

3. Впервые получены обобщающие зависимости для расчета теплоотдачи и гидравлического сопротивления каналов с цилиндрическими выемками с  $h/d=0,1-0,5$  и  $\bar{f}=52\%$  при турбулентном отрывном режиме течения в диапазоне чисел  $Re_D=9\ 500-27\ 000$ .

Максимальный рост теплоотдачи в таких каналах при  $\bar{f}=52\%$  и  $L/D=48,7$  составил  $25\%$  при  $h/d=0,1$  и до  $75\%$  при  $h/D=0,5$  при сопоставимом росте гидросопротивления.

4. Определены коэффициенты локальной и средней теплоотдачи на поверхностях с одиночными и «шахматными» и «коридорными» рельефами из траншейных выемок при относительных глубинах выемок  $h/d=0,1-0,5$  и различных углах поворота выемок по отношению к набегающему потоку  $\varphi=0, 22, 45, 67, 90^\circ$ . Определено влияние угла наклона траншейных выемок к набегающему потоку на теплоотдачу. Установлено, что максимальная интенсификация теплоотдачи (на  $60\%$  по сравнению с гладкой поверхностью) соответствует  $\varphi=67,5^\circ$  при использовании «шахматного» рельефа выемок. На основе тепловизионных исследований обоснованы механизмы интенсификации теплоотдачи при использовании траншейных выемок.

5. Обоснованы оптимальные условия использования исследованных интенсификаторов теплоотдачи. Установлено, что наибольшая теплогидравлическая эффективность цилиндрических выемок при турбулентном режиме их обтекания в диапазоне чисел  $Re_D=12\,500-27\,000$  составляет  $\bar{E}'_{\max}=1,2-1,3$  и соответствует значениям  $h/D=0,1$  во всем исследованном диапазоне  $L/D=8,9-48,7$ .