

На правах рукописи

КИСЕЛЁВ Николай Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ
ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОВЕРХНОСТЕЙ С РЕГУЛЯРНЫМ РЕЛЬЕФОМ**

Специальность 01.04.14 -
Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Леонтьев Александр Иванович**
академик РАН, профессор,
доктор технических наук

Научный консультант: **Бурцев Сергей Алексеевич**
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Дедов Алексей Викторович**
член-корреспондент РАН, доктор
технических наук, заведующий кафедрой
Общей физики и ядерного синтеза НИУ
«МЭИ»

Митяков Андрей Владимирович
доктор технических наук, профессор
кафедры теоретические основы
теплотехники Санкт-Петербургского
Политехнического университета Петра
Великого

Ведущая организация: **ОАО «Энергетический институт
имени Г.М. Кржижановского» (ОАО
«ЭНИН»)**

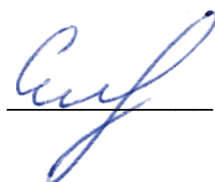
Защита состоится «14» июня 2017 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д. 1, ф-т «Энергомашиностроение» ауд. 202э.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.08
кандидат технических наук, доцент

 Егоров К.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Поиск путей интенсификации теплообмена привлекал, привлекает и будет привлекать пристальное внимание инженеров, научных сотрудников и всех, кто тем или иным образом связан с теплоэнергетикой. От эффективности передачи энергии в теплообменном оборудовании во многом зависят значения технико-экономических показателей всей энергоустановки в целом. Следовательно, в настоящее время использование эффективных способов интенсификации теплообмена является одним из главных и наиболее доступных путей совершенствования и повышения эффективности и экономичности энергетического оборудования, что подтверждается всё возрастающим количеством публикаций, посвященных данному вопросу.

Одним из наиболее распространенных способов интенсификации конвективного теплообмена является нанесение регулярного рельефа на теплопередающие поверхности. Для сравнения рельефов разного типа между собой, либо с модельной гладкой поверхностью, используют различные параметры теплогидравлической эффективности — соотношения между коэффициентами теплоотдачи и сопротивления единицы площади исследуемой (критерием Стентона St и коэффициентом сопротивления c_x) и гладкой (St_0 и c_{x0} соответственно) поверхностей. Коэффициент сопротивления c_x определяет потери полного давления в канале, а критерий Стентона St определяет количество теплоты, которое передается потоку в канале. В качестве теплогидравлической эффективности большинство авторов используют один или оба из следующих критериев:

- отношение интенсификации теплообмена St/St_0 к увеличению сопротивления c_x/c_{x0} . В данном случае используется выражение $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$, или фактор аналогии Рейнольдса (FAR). Этот критерий характеризует уменьшение площади поперечного сечения теплообменного аппарата;

- отношение прироста теплообмена к приросту мощности на прокачку теплоносителя при течении в канале, т.е. $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})^{1/3}$. Этот критерий характеризует уменьшение объема матрицы теплообменного аппарата.

В дальнейшем, в качестве теплогидравлической эффективности будет рассматриваться отношение $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$.

Существуют разные типы интенсифицирующих поверхностей. Однако использование большинства известных интенсификаторов (ребер, штырьков, закрученных лент и пр.) обычно приводит к существенному росту сопротивления. Тем интереснее результаты, полученные на теплообменных поверхностях с вихревыми интенсификаторами (лунками), так как в данном случае росту теплообмена соответствует практически равноценный рост сопротивления. Благодаря такому поведению, к поверхностям с вихревыми интенсификаторами проявляется повышенный интерес. Очевидно, что механизмы, вызывающие изменение теплогидравлической эффективности поверхности, существенно зависят как от рельефа поверхности, так и от параметров набегающего потока, поэтому для корректного сравнения исследуемых поверхностей их необходимо рассматривать в одинаковых

условиях. Таким образом, перед исследователем стоят следующие основные задачи: предельно точное определение коэффициентов теплоотдачи и сопротивления исследуемого рельефа в широком диапазоне параметров потока и поиск рельефа, обеспечивающего максимальное значение теплогидравлической эффективности.

В литературе существует множество работ, посвященных экспериментальному и численному исследованию вихреобразующих поверхностей. Однако до сих пор остается открытым вопрос об оптимальной (с точки зрения теплогидравлической эффективности) форме, компоновке и взаимному влиянию лунок в каналах. Несмотря на большое количество данных по вихревой интенсификации, остаются вопросы к способам определения искомых величин в опубликованных экспериментальных работах (в том числе теплогидравлических характеристик наиболее эффективных облуненных поверхностей). Стоит отметить, что в современных исследованиях (в связи с развитием экспериментального оборудования, уточнением методов проведения эксперимента и численных расчетов) вихреобразующие поверхности показывают менее «выдающиеся» результаты. Несмотря на это, лунки до сих пор остаются перспективными интенсификаторами теплообмена.

Все эти факторы свидетельствуют о необходимости создания новых методов определения теплогидравлических характеристик, проведения детальных исследований вихреобразующих поверхностей с применением современного высокоточного оборудования.

Актуальность представленной диссертационной работы заключается в том, что в опубликованных работах практически отсутствуют данные по одновременному определению относительных (отнесенных к гладкой стенке) коэффициентов теплоотдачи и сопротивления. В данной работе представлен метод одновременного измерения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления облуненной и гладкой поверхностей и определения относительных коэффициентов теплоотдачи и сопротивления на облуненных поверхностях, получены новые экспериментальные данные и зависимости величин относительных коэффициентов теплоотдачи и сопротивления от параметров облуненной поверхности (формы и расположения лунок). Эксперименты проведены на мировом уровне с применением современного оборудования и методов обработки экспериментальных данных.

Цель работы: Разработка методов повышения теплогидравлических характеристик вихреобразующих поверхностей, а именно: исследование возможности нарушения аналогии Рейнольдса в сторону теплообмена на рельефных поверхностях. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Выбор, разработка и уточнение методов экспериментального определения относительных коэффициентов теплоотдачи и сопротивления в широком диапазоне параметров набегающего потока, позволяющих определять за один пуск экспериментального стенда эти величины с меньшей неопределенностью по сравнению с исследованиями, когда для определения характеристик каждой из поверхностей проводят два отдельных пуска;

2. Существенная модернизация экспериментального стенда для проведения исследований по выбранным методам;

3. Проведение экспериментальных исследований с целью получения данных о зависимостях интенсификации теплообмена, увеличения сопротивления и, соответственно, теплогидравлической эффективности от числа Рейнольдса, а также параметров вихреобразующего рельефа (компоновки, плотности нанесения и формы лунок).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен метод определения локальных значений коэффициентов теплоотдачи, учитывающий форму рельефной поверхности, а также продольные и поперечные перетечки теплоты на ней. В основе метода лежит совместное использование экспериментально определенного темпа охлаждения поверхности и численного решения нестационарной задачи теплопроводности пластины с поверхностным рельефом в трехмерной постановке;

2. Создан метод экспериментального определения фактора аналогии Рейнольдса, а именно: одновременного измерения значений осредненных по поверхности коэффициентов теплоотдачи и сопротивления как для рельефной, так и для стоящей параллельно ей гладкой поверхности с последующим определением относительных коэффициентов теплоотдачи и сопротивления рельефной поверхности;

3. Показана возможность нарушения аналогии Рейнольдса в сторону теплообмена за счет выбора рельефной поверхности. Неглубокие (отношение глубины лунки h к диаметру пятна D_p $h/D_p=0,130$) лунки обеспечивают значения St/St_0 в диапазоне 1,06-1,45, значения c_x/c_{x0} — в диапазоне 1,03-2,36, а значения $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ — в диапазоне 0,48-1,28;

4. Представлены данные и рекомендации, показывающие эффективность применения рельефных поверхностей в теплообменном оборудовании.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием современных средств измерения и методов определения параметров, оценкой неопределенностей измерений, повторяемостью и согласованием полученных экспериментальных данных с общеизвестными (как теоретическими, так и экспериментальными) данными других авторов.

Теоретическая и практическая ценность данной работы заключается в том, что реализована идея одновременного исследования рельефной и гладкой поверхностей и, следовательно, определения фактора аналогии Рейнольдса за один эксперимент при заведомо одинаковых начальных условиях набегающего потока. Полученные в ходе экспериментальных исследований данные могут быть использованы при проектировании теплообменных аппаратов (ТА), систем охлаждения энергоустановок, в расчетах устройств газодинамической стратификации, а также для валидации программных комплексов. Результаты исследований позволят лучше понять механизмы интенсификации теплообмена и увеличения сопротивления на вихреобразующих поверхностях.

Апробация работы. Основные положения работы были отмечены наградами на: XV Минском международном форуме по тепломассообмену

(Минск, Беларусь, 2016); 6-ой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6, г. Москва, МЭИ, 2014); конференции-конкурсе молодых ученых МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, 2016). Основные результаты были представлены на XVII школе-семинаре «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Туапсе, 2016 г.); XV Минском международном форуме по тепломассообмену (Минск, Беларусь, 2016 г.); XXII Международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентности (Не-За-Те-Ги-Ус)» (Звенигород, 2016 г.); пятой Международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Казань, 2015 г.); 8th International symposium on turbulence, heat and mass transfer (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2015 г.); VIII Международном аэрокосмическом конгрессе IAC'2015 (Москва, 2015 г.); XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015 г.); 6-ой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6, Москва, 2014 г.); Международной конференции «VIII Окуневские чтения» (Санкт-Петербург, 2013 г.); 3-х конференциях «Ломоносовские чтения» МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, 2014—2016 гг.); 3-х конференциях-конкурсах молодых ученых МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, 2014—2016 гг.); XIX, XX школах-семинарах под руководством академика А.И. Леонтьева (г. Орехово-Зуево, 2013 г.; Звенигород, 2015 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 27 научных работ (7 статей, 20 тезисов докладов и материалов конференций), из них 7 статей в журналах из списка ВАК РФ, включая 3 в журналах, цитируемых в базах Web of Science, Scopus, общим объемом 8,0 п.л.

Личный вклад автора

Диссертационная работа выполнялась в Межвузовской научно-учебной лаборатории «Термогазодинамика» (МГУ-МГТУ) на стенде НИИ Механики МГУ имени М.В. Ломоносова. Автором существенно модернизирован экспериментальный стенд для реализации одновременного (в ходе одного эксперимента) определения относительных коэффициентов теплоотдачи, сопротивления и теплогидравлической эффективности различных поверхностей. При непосредственном участии Киселёва Н.А. внедрены методы экспериментального исследования, произведены монтаж и тарировка измерительного оборудования стенда. Автор принимал участие в разработке, отладке и тестировании программ автоматизации эксперимента. Киселёвым Н.А. разработан метод определения двумерного поля коэффициентов теплоотдачи путем решения трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности и создан набор программ для реализации метода применительно к экспериментальному стенду. Автором проведены экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик различных облуненных поверхностей. Получены новые экспериментальные данные о влиянии параметров облуненной поверхности (расположения лунок и их формы) на величины относительных коэффициентов теплоотдачи и сопротивления.

На защиту выносятся:

1. Метод экспериментального определения локальных значений коэффициентов теплоотдачи на рельефных (вихреобразующих) поверхностях;
2. Метод одновременного (за один пуск экспериментального стенда) определения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления на рельефной и гладкой поверхностях при заведомо одинаковых условиях набегающего потока;
3. Экспериментально полученные данные о влиянии на интенсификацию теплообмена, увеличение сопротивления и теплогидравлическую эффективность следующих параметров:
 - плотности расположения лунок в коридорной компоновке;
 - продольных и поперечных шагов шахматного массива лунок;
 - формы лунки;
4. Данные и рекомендации, показывающие эффективность применения облученных поверхностей в теплообменном оборудовании.

Структура и объем работы. Текст диссертации изложен на 129 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Работа иллюстрирована 34 рисунками и имеет 13 таблиц. Список литературы насчитывает 185 наименований.

Содержание работы

Во введении отмечена актуальность диссертационной работы, ее теоретическая и практическая значимость, поставлены цели и задачи исследования, дана общая характеристика работы и кратко описано ее содержание.

В первой главе представлен обзор опубликованных работ, посвященных теплообмену и сопротивлению при обтекании облученных поверхностей. Рассмотрены вопросы интенсификации теплообмена и увеличения сопротивления на обычных сферических лунках, лунках сложной формы, в облученных трубах и каналах энергоустановок (например, лопатках газовых турбин). Описана структура течения в сферической лунке и показана возможность снижения сопротивления на облученной поверхности. Обобщены результаты численных и экспериментальных исследований интенсификации теплообмена и увеличения сопротивления на облученных поверхностях. На основе проведенного обзора работ выявлены основные параметры облученной поверхности, влияющие на теплогидравлические характеристики.

Использование лунок является одним из перспективных методов интенсификации теплообмена, как в каналах теплообменного оборудования, так и в каналах охлаждения энергоустановок. В значительном количестве работ отмечается опережающий рост относительного коэффициента теплоотдачи по сравнению с относительным коэффициентом сопротивления, особенно для несферических лунок. Однако в опубликованных работах отсутствуют обобщающие данные о влиянии взаимного расположения лунок на относительные коэффициенты теплоотдачи и сопротивления. При анализе методов проведения экспериментальных исследований отмечено, что зачастую в работах отсутствует подобие тепловых и динамических пограничных слоев, а применяемые для гладкого канала критериальные уравнения не всегда

соответствуют картине течения. Всё это приводит к значительному разбросу в данных по интенсификации теплообмена и увеличению сопротивления. Также имеются расхождения экспериментальных данных с результатами численных работ.

Обобщая результаты опубликованных работ, отмечается, что данные по локальным значениям St/St_0 лежат в диапазоне $St/St_0=0,13-10,4$; данные по осредненным значениям интенсификации теплообмена и увеличения сопротивления - в диапазоне $St/St_0=0,87-13,8$ и $c_x/c_{x0}=0,75-66$; данные по величине теплогидравлической эффективности $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ — в диапазоне $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})=0,07-6,6$ (Рисунок 1). Исходя из представленного обзора опубликованных работ, делается вывод о необходимости проведения экспериментальных исследований влияния параметров набегающего потока и лунок на процессы теплообмена и сопротивления.

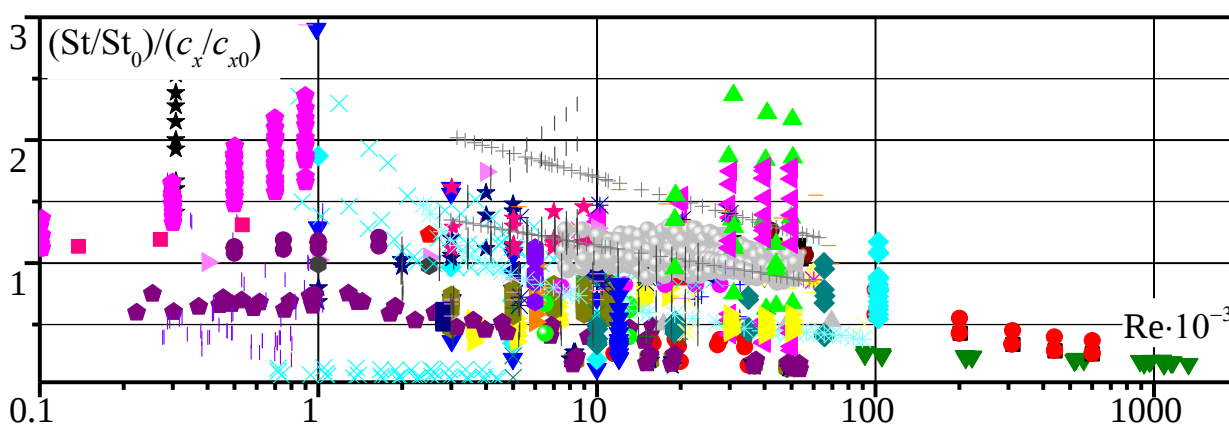


Рисунок 1. Обобщенные данные по зависимости теплогидравлической эффективности $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ от Re

Во второй главе обосновывается выбор методов измерения относительных коэффициентов теплоотдачи и сопротивления, описывается экспериментальный стенд для определения теплогидравлических характеристик облученных поверхностей. Представлены результаты измерения профилей скорости и турбулентных пульсаций в канале стенда. Отклонение профилей скоростей от логарифмического профиля скоростей в турбулентном пограничном слое не превышает $\pm 2,5\%$, профили турбулентных пульсаций удовлетворительно совпадают с известными «классическими» профилями.

В качестве метода определения коэффициента сопротивления был выбран прямой метод взвешивания плавающего элемента. Коэффициент сопротивления определялся путем непосредственного взвешивания моделей на однокомпонентных тензометрических весах. При этом учитывалось падение статического давления на длине пластины. Используя экспериментальные данные, коэффициент сопротивления вычислялся по следующей формуле

$$c_x = \frac{F_x/S_{side}}{\rho V^2/2} = \frac{(F_\Sigma - F_{\Delta pl})/S_{side}}{\rho V^2/2} = \frac{(F_\Sigma - \Delta p_{pl} S')/S_{side}}{\rho V^2/2},$$

где F_Σ - суммарное усилие, регистрируемое упругим элементом, Н; $F_{\Delta pl} = \Delta p_{pl} \cdot S'$ - усилие, вызванное падением давления на длине пластины, Н; Δp_{pl} - перепад давления в зазорах плавающего элемента, Па; S_{side} , S' - площадь

плавающего элемента и его торца, м^2 ; ρ - плотность, кг/м^3 ; V - скорость ядра потока, м/с .

Экспериментальные значения коэффициента сопротивления для гладкой пластины в пределах $\pm 5\%$ согласуются с формулой Прандтля для турбулентного пограничного слоя (Рисунок 2,а) $c_x = 0,472 \cdot (\lg(\text{Re}_x))^{-2,58}$, где число Рейнольдса Re_x определено по длине динамического пограничного слоя.

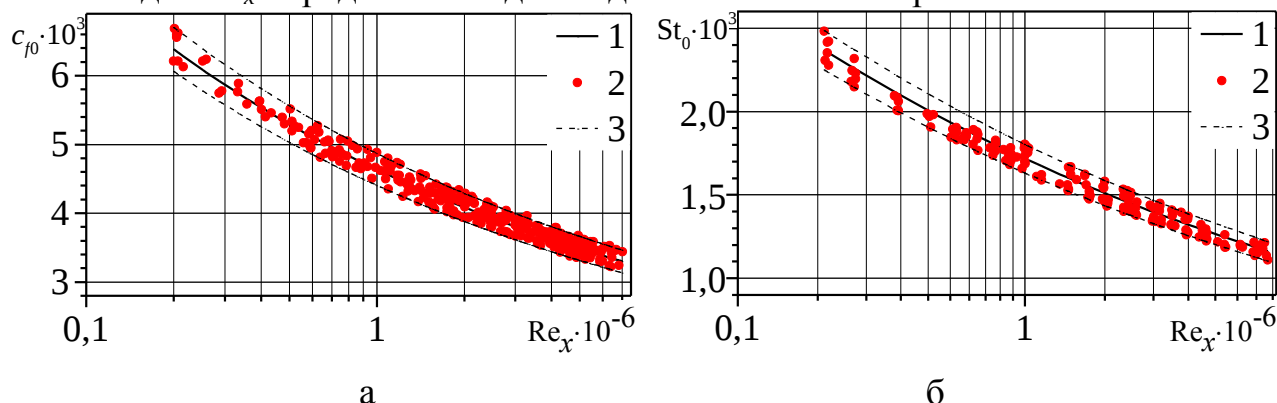


Рисунок 2. Коэффициенты сопротивления (а) и теплоотдачи (б) для гладкой пластины. 1 - теоретические значения, 2 – экспериментальные точки, 3 - интервал $\pm 5\%$ от теоретических кривых

Для определения коэффициента теплоотдачи применялся метод нестационарного теплообмена. В начальный момент времени тепловизором регистрируется температурное поле поверхностей моделей. Далее, процесс охлаждения моделей регистрируется с частотой 1 Гц в течение 40 с. При этом измеряются температуры ядра потока термопарами, расположенными на оси канала около передней и задней кромок исследуемых пластин. Распределение коэффициентов теплоотдачи на стенке вычисляется с использованием трехмерного уравнения нестационарной теплопроводности в пластине:

$$\lambda \cdot (\partial^2 T_s / \partial x^2 + \partial^2 T_s / \partial y^2 + \partial^2 T_s / \partial z^2) = \rho \cdot c \cdot \partial T_s / \partial \theta$$

и граничного условия 3-го рода:

$$\lambda \cdot \nabla T = \alpha \cdot (T - T_0)$$

где λ - коэффициент теплопроводности твердого тела (оргстекло), $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$; x, y, z – координаты, м ; T_s - температура твердого тела, К ; T – температура на омываемой поверхности твердого тела (на поверхности исследуемого рельефа), К ; T_0 – температура ядра потока, К ; c – удельная теплоемкость твердого тела $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; θ – время, с ; α - искомый коэффициент теплоотдачи $\text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

Данный метод позволяет получить двумерное поле St/St_0 на исследуемой поверхности с учетом всех возникающих тепловых потоков и кривизны рассматриваемой геометрии. Экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи для гладкой пластины в пределах $\pm 5\%$ согласуются со степенной зависимостью $\text{St} = 0,0296 \cdot \text{Re}^{-0,2} \cdot \text{Pr}^{-0,6}$ для пограничного слоя (Рисунок 2,б), где число Рейнольдса Re_x , определено по длине теплового пограничного слоя.

Оценены неопределенности при измерении коэффициентов теплоотдачи и сопротивления, а также относительных коэффициентов теплоотдачи и сопротивления. Величины относительных коэффициентов теплоотдачи и сопротивления, определенные в одном эксперименте, имеют значительно

меньшие неопределенности в сравнении со случаем проведения двух независимых экспериментов (Таблица 1), то есть такой метод определения теплогидравлических характеристик является более точным в сравнении с методами, используемыми в опубликованных работах, что является преимуществом предложенного метода экспериментального исследования.

Таблица 1. Сравнение неопределенностей экспериментов

Метод определения величины	$(U_{St})_{0,95}, \%$	$(U_{Cx})_{0,95}, \%$	$(U_{Re})_{0,95}, \%$
1-н эксперимент (абсолютное значение)	5,4	4,4	3,0
1-н эксперимент (относительное значение)	6,9	5,2	3,0
2-а эксперимента (относительное значение)	8,0	8,8	3,5

В третьей главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований теплогидравлических характеристик облуненных поверхностей. Все модели получены путем фрезерования углубления сферической фрезой (глубиной $h=1$ мм) на изначально гладкой модели (толщиной 6 мм). Длина пластин в направлении потока – 125 мм, поперек - 100 мм.

Приведены данные по влиянию продольного и поперечного шагов коридорного и шахматного массивов сферических лунок на процессы интенсификации теплообмена и сопротивления (Рисунок 3). Было изготовлено 12 моделей с коридорной и 10 моделей с шахматной компоновкой лунок.

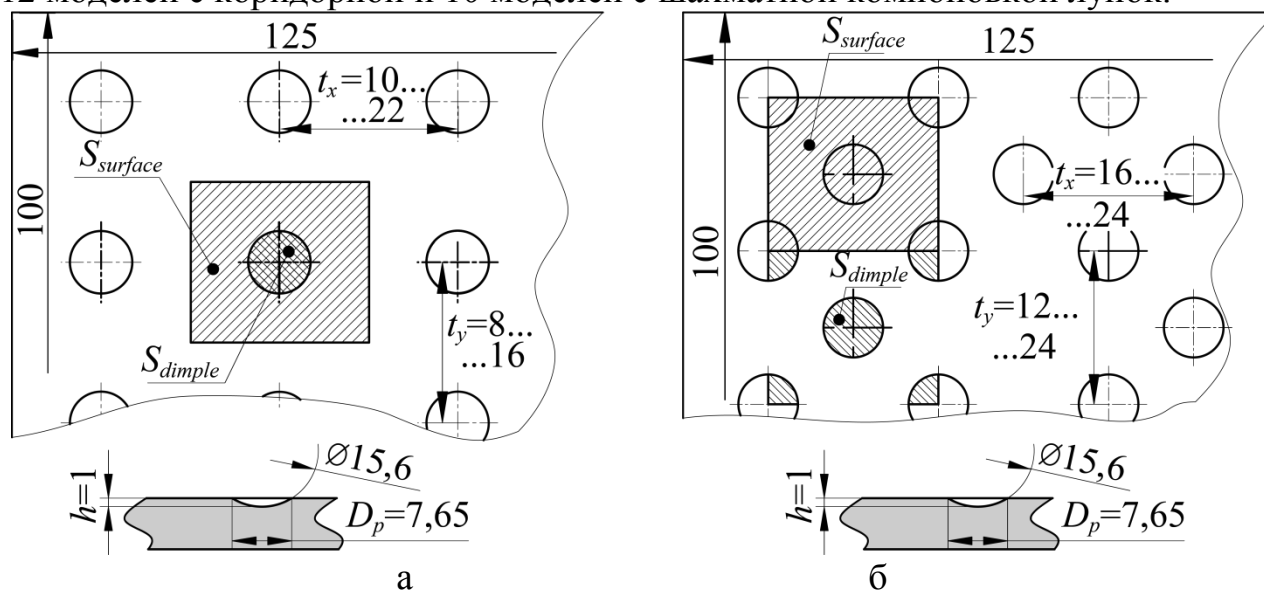


Рисунок 3. Геометрия коридорных (а) и шахматных (б) компоновок сферических лунок. Направление потока – слева направо

Для оптимального шага шахматной компоновки (соответствующего максимальному значению $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$), рассмотрено 6 поверхностей с лунками сложной формы (Рисунок 4): обычная сферическая лунка (№1), лунка, полученная протяжкой сферической лунки по дуге окружности (№2), овальная лунка (№3), каплеобразная лунка, установленная под углом 45° к направлению потока (№4), сферическая лунка со скруглением кромки (№5), прямая каплеобразная лунка (№6).

При сравнении экспериментальных результатов, полученных для разных пластин, в качестве основных параметров были приняты продольный и поперечный шаги лунок t_x и t_y , а также плотность их нанесения, определенная

как отношение площади пятна лунки к площади сектора компоновки, или $S=S_{dimple}/S_{surface}$ ($S=2\cdot\pi\cdot D_p^2/(4\cdot t_x\cdot t_y)$ для шахматной и $S=\pi\cdot D_p^2/(4\cdot t_x\cdot t_y)$ для коридорной компоновки). Для гладкой пластины плотность лунок равна нулю.

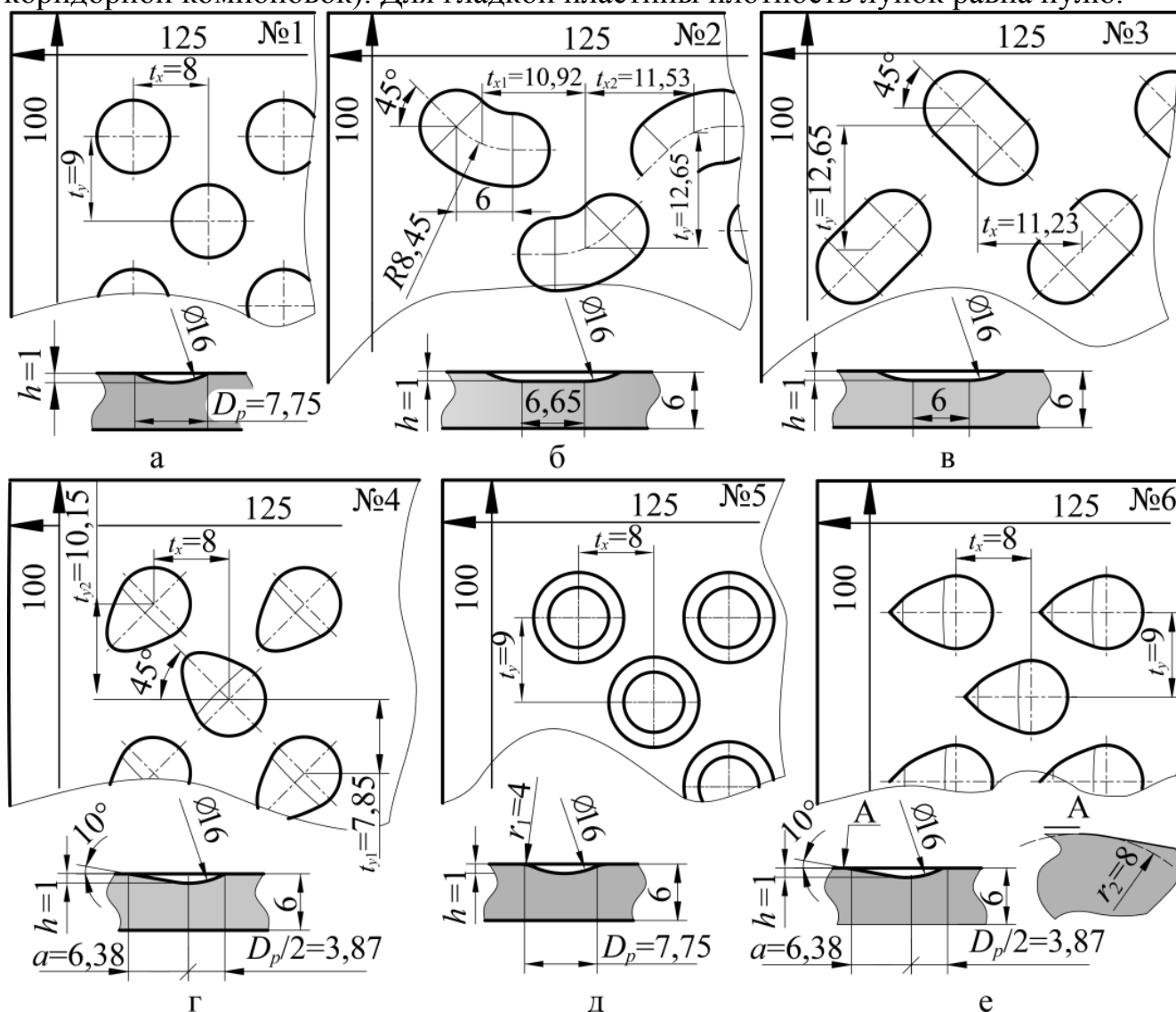


Рисунок 4. Лунки сложной формы: сферическая лунка (а), лунка, полученная протяжкой сферической лунки по дуге окружности (б), овальная лунка (в), каплеобразная лунка, установленная под углом 45° к направлению потока (г), сферическая лунка со скруглением кромки (д), прямая каплеобразная лунка (е)

Одновременно (за один пуск экспериментального стенда) определялись коэффициенты теплоотдачи и сопротивления исследуемой и гладкой поверхностей, находящихся в одинаковых условиях. Для каждого рельефа получены: локальные распределения St/St_0 ; зависимости c_x/c_{x0} и St/St_0 , а также $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ от числа Рейнольдса Re_x ; осредненные по всем числам Рейнольдса значения c_x/c_{x0} , St/St_0 и $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$. Определенное по длине пограничного слоя число Рейнольдса, менялось в диапазоне $Re_x=0,2\cdot 10^6-7,0\cdot 10^6$.

Поля локальных значений относительных коэффициентов теплоотдачи для всех лунок носят сходный характер (Рисунок 5). В первой половине лунки образуется застойная зона, соответствующая минимальным значениям St/St_0 , так как в ней практически нет обновления потока. Далее наблюдается область

присоединения потока, в которой происходит увеличение локальных значений относительного коэффициента теплоотдачи St/St_0 . Наибольшие значения St/St_0 находятся вблизи задней кромки лунок. Для сферических и траншейных лунок наблюдается область невозмущенного пограничного слоя между лунками, где $St/St_0 \approx 1,0$, для каплеобразных лунок эта область выражена не так явно. Стоит отметить, что форма лунки (при постоянной относительной глубине) практически не влияет на осредненные по поверхности лунки значения St/St_0 .

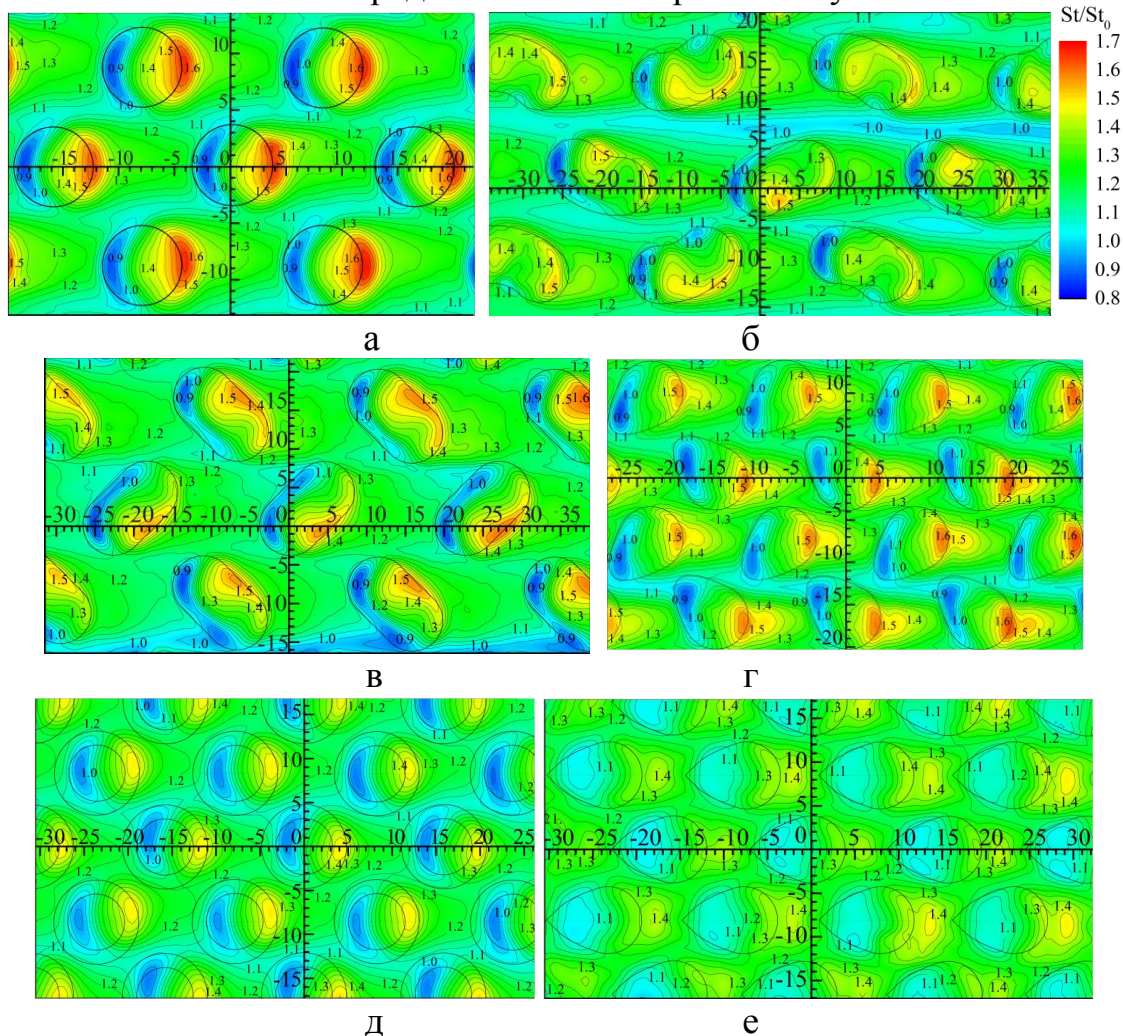


Рисунок 5. Поля St/St_0 при $Re_x = 2,0 \cdot 10^6$. Направление течения – слева направо

Для коридорной компоновки лунок отмечено следующее:

1) Для рассмотренных моделей с коридорной компоновкой лунок интенсификация теплообмена и увеличение сопротивления лежат в диапазоне $St/St_0 = 1,055-1,36$ и $c_x/c_{x0} = 1,17-2,36$, что соответствует минимальной и максимальной плотности нанесения интенсификаторов.

2) Обнаружена нелинейная зависимость St/St_0 , c_x/c_{x0} и их отношения $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ от числа Re_x . Величина c_x/c_{x0} сначала падает (до некоторого числа Re_x) и, далее, начинает увеличиваться, стремясь к значению, соответствующему c_x при автомодельном обтекании. Значение St/St_0 падает с увеличением Re_x .

3) Значения St/St_0 и c_x/c_{x0} линейно возрастают, а $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ убывают с увеличением плотности расположения лунок (Рисунок 6).

4) Полученные данные свидетельствуют о малой теплогидравлической эффективности коридорной компоновки лунок: $(St/St_0)/(c_x/c_{x0}) < 1,0$.

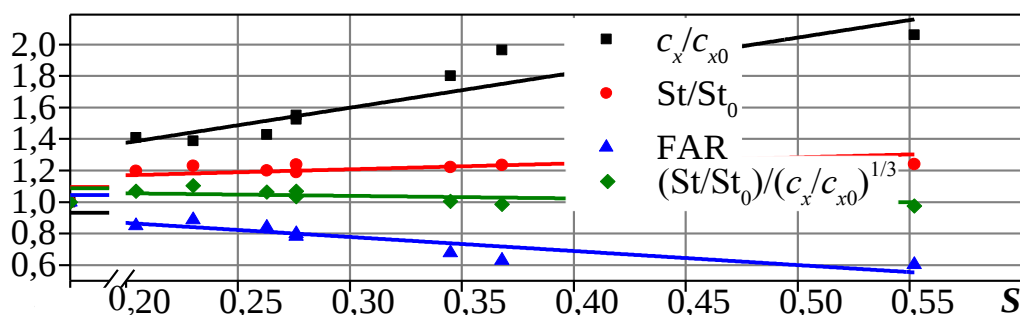


Рисунок 6. Влияние плотности лунок в коридорной компоновке на c_x/c_{x0} , St/St_0 , $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ и $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})^{1/3}$ (сплошные линии – линейные аппроксимации)

Для шахматной компоновки лунок отмечено следующее:

1) Шахматная компоновка обеспечивает интенсификацию теплообмена $St/St_0=1,15-1,45$ и увеличение сопротивления $c_x/c_{x0}=1,10-1,53$ в зависимости от плотности расположения лунок. Увеличение плотности лунок при больших продольных и поперечных шагах приводит к росту осредненной интенсификации теплообмена до величины $St/St_0=1,20$. При уменьшении поперечного шага лунок относительный коэффициент сопротивления сначала уменьшается до величины $c_x/c_{x0}=1,18$, а затем начинает увеличиваться. При уменьшении продольного шага лунок c_x/c_{x0} уменьшается от $c_x/c_{x0}=1,3$ при $t_x=22$ мм до минимальной величины $c_x/c_{x0}=1,10$ при $t_x=16$ мм. Теплогидравлическая эффективность $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ для всех рассмотренных моделей изменяется от 0,74 до 1,19 (Рисунок 7). При изменении поперечного шага $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ имеет максимум при $t_y=18$ мм. При изменении продольного шага величина $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ увеличивается с 0,92 до 1,10 при уменьшении продольного шага t_x с 22 до 16 мм (Рисунок 8).

2) Несмотря на наличие локальных областей, для которых интенсификация теплообмена превышает $St/St_0>1,6$, осредненные значения St/St_0 даже при малых числах Re_x незначительно превышают величину $St/St_0=1,4$ из-за наличия областей с малыми значениями $St/St_0\approx 0,6$. Осредненные значения St/St_0 и c_x/c_{x0} соответствуют современным представлениям о процессах интенсификации теплообмена и увеличения сопротивления. Полученные данные свидетельствуют о возможности нарушения аналогии Рейнольдса в сторону теплообмена $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})>1$.

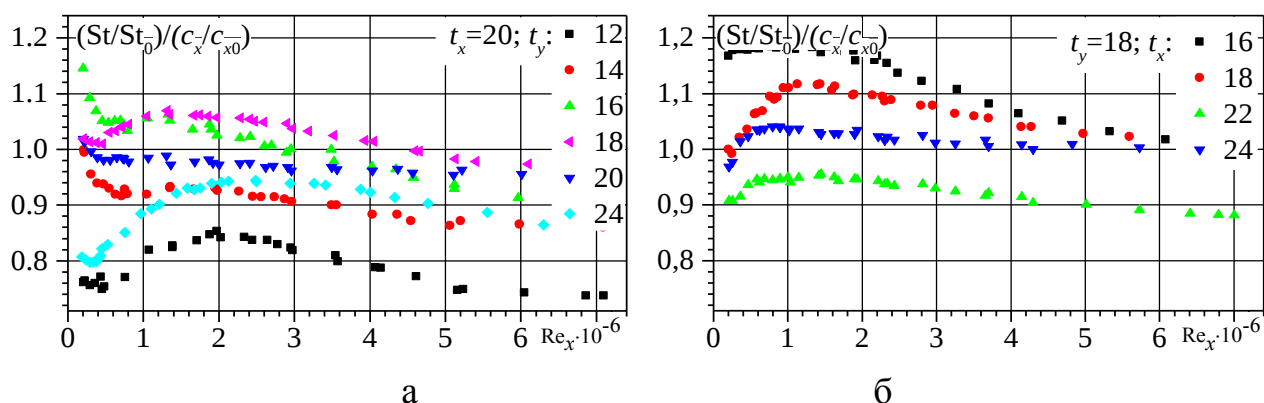


Рисунок 7. Зависимость $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ от числа Рейнольдса и поперечного (а) и продольного (б) шагов шахматной компоновки лунок

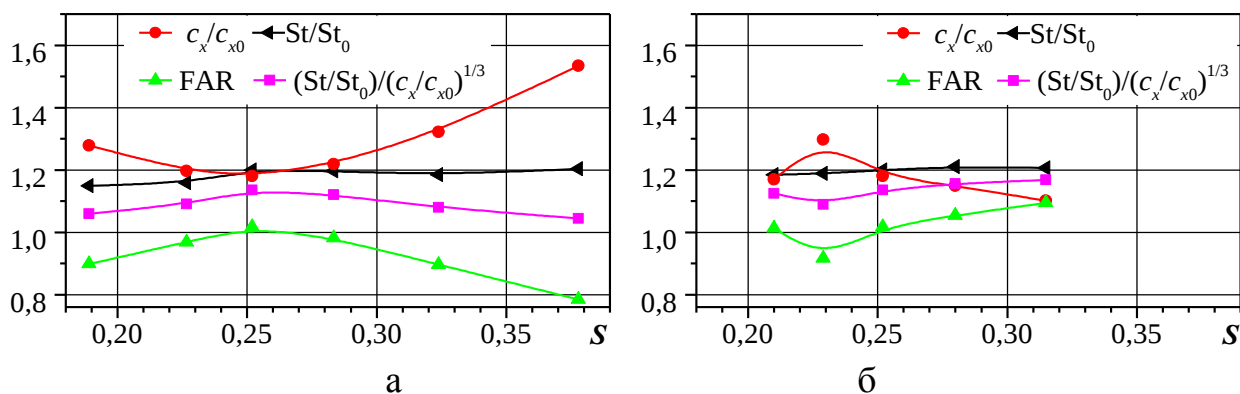


Рисунок 8. Влияние поперечного (а) и продольного (б) шагов шахматной компоновки лунок на c_x/c_{x0} , St/St_0 , $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ и $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})^{1/3}$

Для лунок сложной формы отмечено следующее:

1) Поверхности с лунками сложной формы обеспечивают осредненную интенсификацию теплообмена $St/St_0=1,17-1,27$ и осредненное увеличение сопротивления $c_x/c_{x0}=1,03-1,53$ в зависимости от формы лунки.

2) Усложнение формы лунки не приводит к значительному увеличению осредненного значения коэффициента теплоотдачи. Это объясняется такими факторами как, наличие застойных зон, областей невозмущенного потока между лунками и деформацией области интенсификации теплообмена за лункой. Из-за наличия областей с малыми значениями $St/St_0=0,85-1,0$ осредненные значения интенсификации теплообмена даже при малых числах Рейнольдса незначительно превышают величину $St/St_0=1,30$ (Рисунок 9), несмотря на наличие областей, для которых интенсификация теплообмена превышает $St/St_0>1,50-1,58$. Каплеобразные лунки обеспечивают наибольший прирост теплообмена $St/St_0=1,14-1,40$ в рассматриваемом диапазоне чисел Re_x .

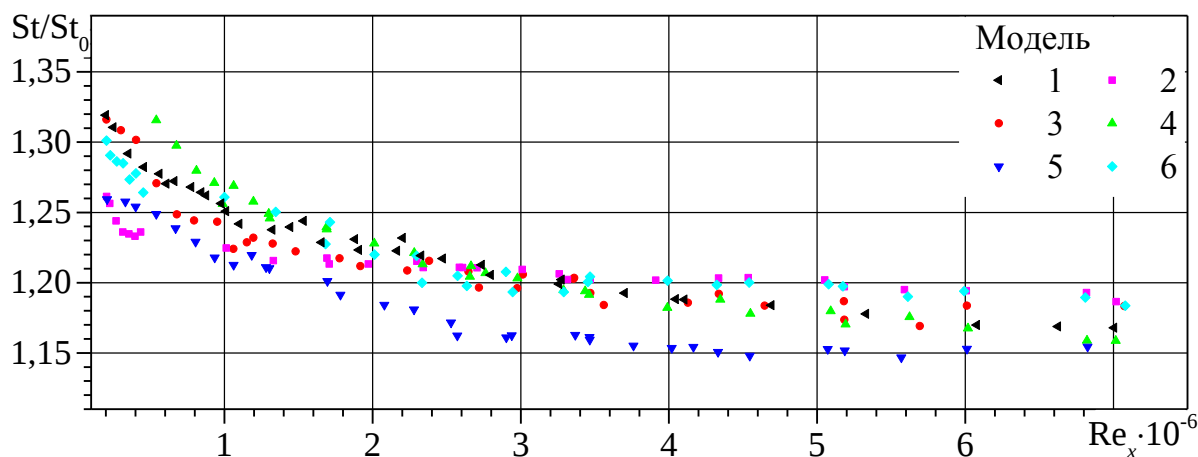


Рисунок 9. Зависимость St/St_0 от числа Рейнольдса и формы лунки. Номера моделей см. на Рисунке 4

3) Величина c_x/c_{x0} для поверхностей с лунками сложных форм (Рисунок 10) превышает значения c_x/c_{x0} сферических лунок ($c_x/c_{x0}=1,10$ и $c_x/c_{x0}=1,03$ для сферических лунок с острой и скругленной кромкой). Каплеобразные лунки также максимально увеличивают сопротивление $c_x/c_{x0}=1,03-1,69$.

4) Наибольшую теплогидравлическую эффективность $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})=1,14$ имеет сферическая лунка со скругленными краями, максимальное значение

$(St/St_0)/(c_x/c_{x0})^{1/3}=1,18$ соответствует обычной сферической лунке. Минимальные значения $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})=0,80$ и $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})^{1/3}=1,05$ имеет поверхность с каплеобразными лунками.

5) Полученные данные свидетельствуют о возможности опережающего роста теплообмена по сравнению с ростом сопротивления. Для сферических лунок $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})>1$ во всем диапазоне рассмотренных чисел Рейнольдса. Теплогидравлическая эффективность сферической лунки со скругленными кромками $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})=1,12-1,22$ превышает теплогидравлическую эффективность сферической лунки $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})=1,01-1,19$ в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса (Рисунок 11).

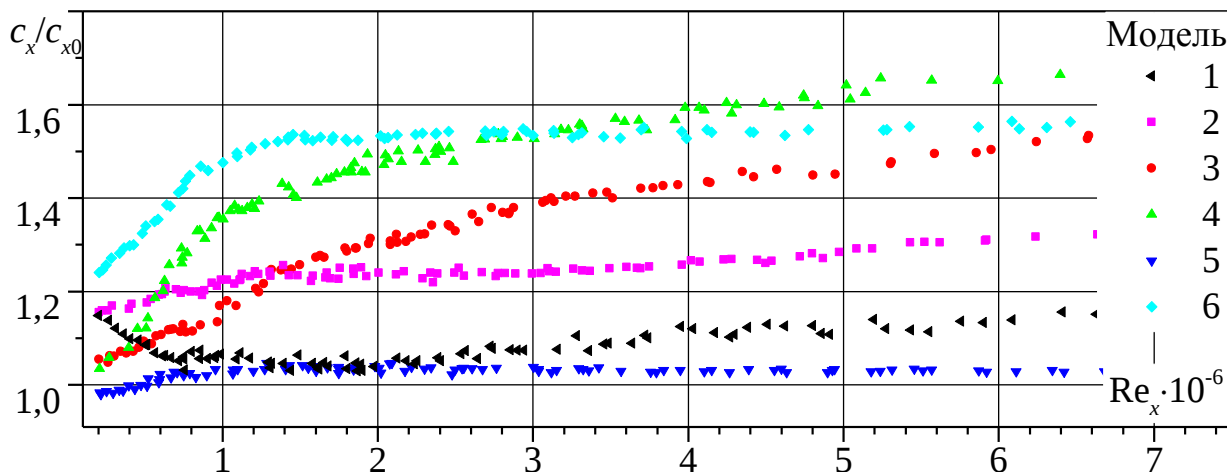


Рисунок 10. Зависимость c_x/c_{x0} от числа Рейнольдса и формы лунки. Номера моделей см. на Рисунке 4

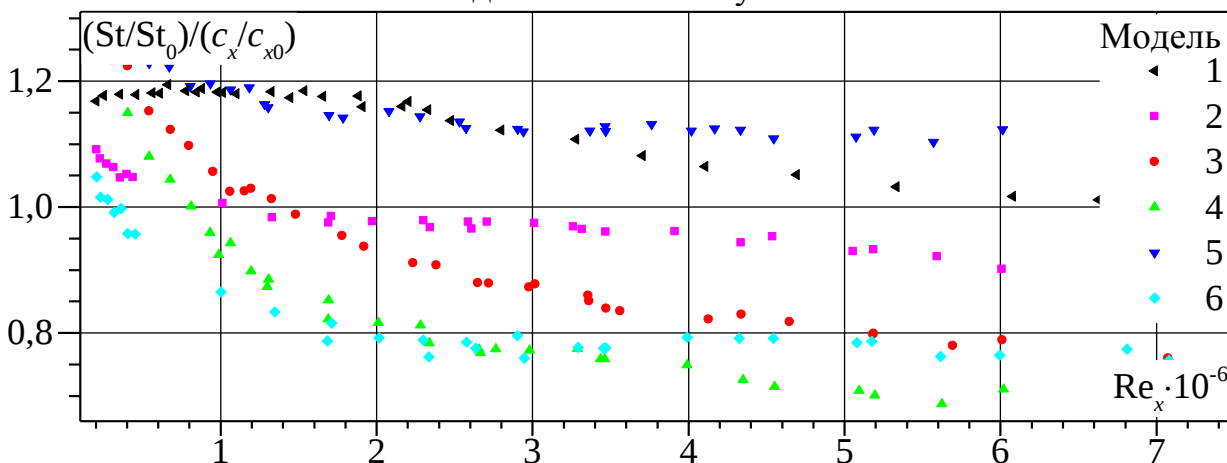


Рисунок 11. Зависимость $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ от числа Рейнольдса и формы лунки. Номера моделей см. на Рисунке 4

В четвертой главе рассмотрен вопрос применимости различных типов интенсификаторов теплообмена (облуненные поверхности, поверхности со штырьками и внутренним оребрением) в теплообменном оборудовании. Приведены данные по теплогидравлическим характеристикам рассматриваемых поверхностей.

Представлены различные критерии теплогидравлической эффективности, полученные для 4-х различных целевых функций (уменьшение размеров теплообменного аппарата, увеличение передаваемой теплоты, уменьшение

среднетемпературного логарифмического напора, уменьшение мощности на прокачку теплоносителя) и 15 возможных вариантов интенсификации теплообмена. Приведены выражения, позволяющие оценить преимущества различных интенсификаторов теплообмена. Показано влияние величин St/St_0 и c_x/c_{x0} на основные параметры теплообменного аппарата: количество z и длину l труб, объем матрицы V , скорость теплоносителя в матрице (или, при постоянном диаметре труб, число Re), расход теплоносителя G , мощность на прокачку N (потери давления Δp) теплоносителя, количество передаваемой теплоты Q , средний логарифмический температурный напор ΔT . На примере сравнения оребренных и облуненных труб показана важность выбора необходимого критерия эффективности для поиска оптимальной геометрии ТА.

Как отмечено выше, лунки имеют значительно меньшие величины St/St_0 и c_x/c_{x0} ($St/St_0=1,45$ и $c_x/c_{x0}=1,26$) в сравнении, например, с внутренним оребрением труб ($St/St_0=2,5$ и $c_x/c_{x0}=8,6$). В Таблице 2 и на Рисунке 12 представлены относительные (отнесенные к параметрам исходного ТА) параметры ТА с интенсификаторами. Несмотря на меньшие значения St/St_0 и c_x/c_{x0} , облуненные поверхности показывают сопоставимое с оребрением уменьшение объема матрицы ТА. При сравнении величины уменьшения объема ТА при сохранении расхода, мощности и передаваемой теплоты, представленные данные свидетельствуют о возможности применения облуненных поверхностей в различных областях техники, в том числе — при проектировании теплообменного оборудования энергоустановок.

Таблица 2. Уменьшение объема ТА

	$\bar{z}$	$\bar{l}$	$\bar{V}$	$\bar{Re}$	$\bar{G}$	$\bar{N}$	$\bar{Q}$	$\bar{\Delta T}_l$
Лунки	0,93	0,7	0,65	1,07	1	1	1	1
Ребра	1,85	0,35	0,66	0,54	1	1	1	1
	$\frac{\bar{z}_l}{z_p}$	$\frac{\bar{l}_l}{l_p}$	$\frac{\bar{V}_l}{V_p}$	$\frac{\bar{Re}_l}{Re_p}$	$\frac{\bar{G}_l}{G_p}$	$\frac{\bar{N}_l}{N_p}$	$\frac{\bar{Q}_l}{Q_p}$	$\frac{(\bar{\Delta T}_l)_l}{(\Delta T)_p}$
Лунки/Ребра	0,5	1,98	0,99	1,99	1	1	1	1

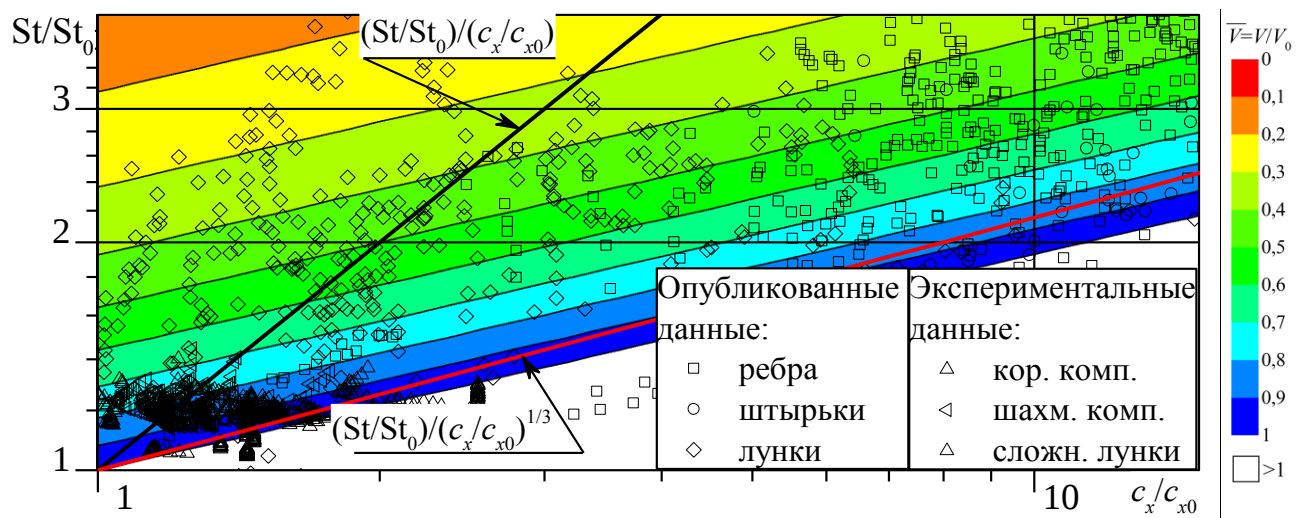


Рисунок 12. Уменьшение объема матрицы ТА с интенсификаторами при сохранении расхода, мощности на прокачку и передаваемой теплоты

Основные выводы и результаты работы

1. Обобщены результаты опубликованных численных и экспериментальных исследований интенсификации теплообмена и увеличения сопротивления на облученных поверхностях. На основе проведенного обзора работ выявлены основные параметры облученной поверхности, влияющие на теплогидравлические характеристики.

2. Создан рабочий участок для одновременного определения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления на облученной и гладкой поверхностях за один пуск экспериментального стенда при заведомо одинаковых условиях набегающего потока. Оценены неопределенности измерения как абсолютных, так и относительных коэффициентов теплоотдачи (5,4 и 6,9% соответственно) и сопротивления (4,4 и 5,2% соответственно) при данной постановке экспериментальных исследований.

3. Получены экспериментальные данные о влиянии продольного и поперечного шагов в коридорной и шахматной компоновках сферических лунок, а также формы лунок на интенсификацию теплообмена St/St_0 , увеличение сопротивления c_x/c_{x0} , и теплогидравлическую эффективность $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$. Показана возможность нарушения аналогии Рейнольдса в сторону теплообмена на облученных поверхностях.

4. Для рассмотренных моделей с коридорной компоновкой лунок интенсификация теплообмена и увеличение сопротивления лежат в диапазонах $St/St_0=1,055-1,36$ и $c_x/c_{x0}=1,07-2,36$, что соответствует минимальной и максимальной плотности нанесения интенсификаторов. Значения St/St_0 и c_x/c_{x0} линейно возрастают, а $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ убывают с увеличением плотности расположения лунок.

5. Для рассмотренных моделей с шахматной компоновкой лунок увеличение сопротивления лежит в диапазоне $c_x/c_{x0}=1,10-1,53$. Интенсификация теплообмена лежит в диапазоне значений $St/St_0=1,15-1,21$. Зафиксировано наличие минимума сопротивления при определенном расположении лунок ($c_x/c_{x0}=1,18$ и $St/St_0=1,20$ при $t_y=18$ мм). Полученные данные свидетельствуют о возможности нарушения аналогии Рейнольдса в сторону теплообмена.

6. Для рассмотренных моделей с лунками сложной формы увеличение сопротивления лежит в диапазоне $c_x/c_{x0}=1,03-1,69$. Интенсификация теплообмена лежит в диапазоне значений $St/St_0=1,17-1,33$. Наибольшую теплогидравлическую эффективность $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})=1,12-1,28$ имеет сферическая лунка со скругленными кромками. Полученные данные свидетельствуют о возможности дальнейшего (по сравнению с обычными сферическими лунками) нарушения аналогии Рейнольдса в сторону теплообмена.

7. Рассмотрен вопрос эффективности применения различных типов интенсификаторов теплообмена (лунки, штырьки, внутреннее оребрение) в теплообменном оборудовании. Показано, что, несмотря на относительно малую величину интенсификации теплообмена, облученные поверхности обеспечивают уменьшение объема матрицы теплообменного аппарата, сопоставимое с уменьшением объема для внутреннего оребрения (до 1,5 раз).

Перспективы дальнейшего развития темы

В настоящее время проводится широкий комплекс экспериментов, направленных на выявление оптимальной геометрии интенсифицирующего рельефа и параметров набегающего потока, обеспечивающих максимальную теплогидравлическую эффективность поверхности (отношение $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})$). Проводятся исследования по следующим направлениям: определение влияния геометрии поверхностного рельефа, определение влияния взаимодействия крупномасштабных вихревых структур с вихреобразующей поверхностью на теплогидравлическую эффективность этой поверхности.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих работах:

1. Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces with spherical dimples /N.A. Kiselev [et al.] // Exp. Therm. Fluid Sci. 2016. Vol. 79. P. 74-84. (1,3 п.л./0,9 п.л.).
 2. Kiselev N.A., Burtsev S.A., Strongin M.M. A procedure for determining the heat transfer coefficients of surfaces with regular relief // Meas. Tech. 2015. Vol. 58, № 9. P. 1016-1022. (0,5 п.л./0,4 п.л.). Оригинальный русский текст: Киселёв Н.А., Бурцев С.А., Стронгин М.М. Методика определения коэффициентов теплоотдачи поверхностей с регулярным рельефом // Метрология. 2015. № 3. С. 34–45. (0,5 п.л./0,4 п.л.).
 3. Burtsev S.A., Kiselev N.A., Leontiev A.I. Peculiarities of studying thermohydraulic characteristics of relief surfaces // High Temp. 2014. Vol. 52, № 6. P. 869–872. (0,25 п.л./0,15 п.л.). Оригинальный русский текст: Бурцев С.А., Киселёв Н.А., Леонтьев А.И. Особенности исследования теплогидравлических характеристик рельефных поверхностей // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 6. С. 895–898. (0,25 п.л./0,15 п.л.).
 4. Выбор рациональных интенсификаторов теплообмена в теплообменном оборудовании /Н.А. Киселёв [и др.] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 12. С. 35-56. DOI: 10.7463/1216.0852444. (0,75 п.л./0,6 п.л.).
 5. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик поверхностей с коридорным расположением лунок /Н.А. Киселёв [и др.] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 5. С. 348-369. DOI: 10.7463/0515.0776160 (0,75 п.л./0,6 п.л.).
 6. Киселёв Н.А. Отработка методики определения коэффициентов теплоотдачи и восстановления температуры на основе тепловой картины на поверхности пластин, обтекаемых потоком сжимаемого газа // Тепловые процессы в технике. 2013. № 7. С. 303–312. (0,68 п.л.).
 7. Экспериментальное исследование характеристик поверхностей, покрытых регулярным рельефом /Н.А. Киселёв [и др.] Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 1. С. 263-290. DOI: 10.7463/0113.0532996 (0,8 п.л./0,4 п.л.).
- а также в 20-и сборниках тезисов и материалов конференций.