

Экспериментальное исследование характеристик поверхностей, покрытых регулярным рельефом

01, январь 2013

DOI: 10.7463/0113.0532996

Бурцев С. А., Васильев В. К., Виноградов Ю. А., Киселёв Н. А., Титов А. А.

УДК 536.24

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Россия, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Россия, НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова

serg7573@pochta.ru

vyk1961@list.ru

vinograd@imec.msu.ru

kiselev.nick.a@gmail.com

zibidok@mail.ru

Введение

В последнее время, в связи с постоянно возрастающей стоимостью энергоресурсов, уделяется повышенное внимание эффективности производства и использования энергии, а также энергосберегающим технологиям. Наиболее часто реализуемым решением в данной области является установка теплообменных аппаратов (котлов-утилизаторов, регенераторов, экономайзеров). Естественно, что к теплообменному оборудованию предъявляются те же требования, что и к основному - высокая эффективность и надежность, безотказность и т.д.

Для теплообменников, работающих на жидкостях, затраты энергии на преодоление сил трения и сопротивления (мощность на прокачку теплоносителя), возникающих при движении жидкости через теплообменник, обычно малы по сравнению с количеством передаваемой теплоты. Соответственно влияние затрат мощности на преодоление трения и сопротивления редко является определяющим фактором. Однако в теплообменниках, работающих на газах, затраты механической энергии на преодоление силы трения достаточно легко могут достигнуть

величины, сопоставимой с количеством энергии, передаваемой в виде теплоты. При этом необходимо помнить, что в большинстве энергоустановок механическая энергия «стоит» в несколько (обычно 3-5) раз «дороже», чем эквивалентное ей количество теплоты.

Можно легко показать, что для большинства геометрических форм каналов, которые могут быть использованы при формировании поверхности теплообменника, тепловая нагрузка на единицу поверхности может быть увеличена путем увеличения скорости теплоносителя и что изменение этой нагрузки пропорционально изменению скорости в степени близкой к единице.

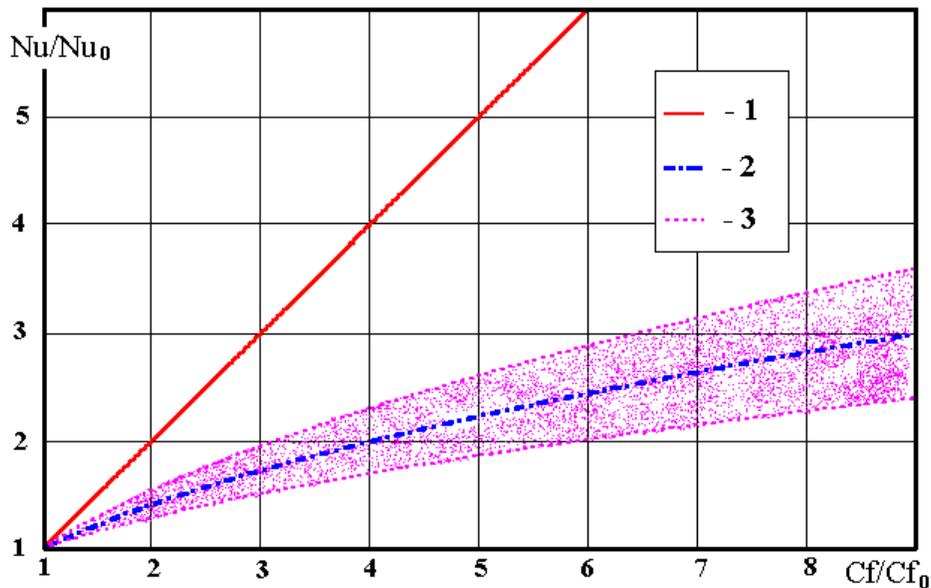
Затрата энергии на преодоление трения также увеличивается с увеличением скорости потока, но обычно она изменяется пропорционально квадрату скорости. Это характерная особенность взаимной зависимости параметров тепловой нагрузки и трения (мощности на прокачку теплоносителя) определяет многие характеристики теплообменников различных классов. Для сравнения поверхностей с различными способами интенсификации теплообмена обычно вводят отношение повышения эффективности передачи теплоты (отношение числа Нуссельта на поверхности с интенсификаторами теплообмена к числу Нуссельта на гладкой поверхности) к росту сопротивления при вводе интенсификаторов теплообмена. Это отношение называется аналогией Рейнольдса, которая в общем виде записывается как

$$k = \frac{Nu/Nu_0}{C_f/C_{f0}},$$

где Nu, C_f - число Нуссельта и коэффициент трения на поверхности с интенсификаторами теплообмена, Nu_0, C_{f0} - число Нуссельта и коэффициент трения на гладкой поверхности, k - критерий аналогии Рейнольдса. Для течения воздуха достаточно часто принимают $k=1$ и, соответственно, аналогия Рейнольдса может быть представлена в виде

$$Nu/Nu_0 = C_f/C_{f0}.$$

Известно, что практически все способы интенсификации прекрасно описывается кривой Нуннера ($Nu/Nu_0 = \sqrt{C_f/C_{f0}}$), графическое представление которой изображено на рисунке 1. Там же приведено графическое представление простейшего варианта аналогии Рейнольдса и область известных экспериментальных данных (кроме вихревых методов интенсификации).



1 – аналогия Рейнольдса $Nu/Nu_0 = Cf/Cf_0$; 2 - кривая Нуннера $Nu/Nu_0 = \sqrt{Cf/Cf_0}$; 3 - область известных экспериментальных данных (кроме вихревых методов интенсификации)

Рисунок 1 - Влияние способов интенсификации теплообмена на отношение Nu/Nu_0 в зависимости от C_f/C_{f0}

Для снижения затрат на преодоление сил трения можно уменьшить скорость потока и увеличить поверхность теплообмена, что в свою очередь также приведет к увеличению затрат энергии на прокачку теплоносителя, но только в той пропорции, в какой увеличена поверхность теплообмена. Но обычно этот путь экономически нецелесообразен, так как стоимость теплообменного оборудования (в силу большой металлоемкости и применения дорогостоящих материалов) на сегодняшний день уже может быть сравнима со стоимостью всей энергоустановки.

Для решения данной проблемы есть практически только один выход – интенсификация теплообмена при равноценном или отстающем росте сопротивления.

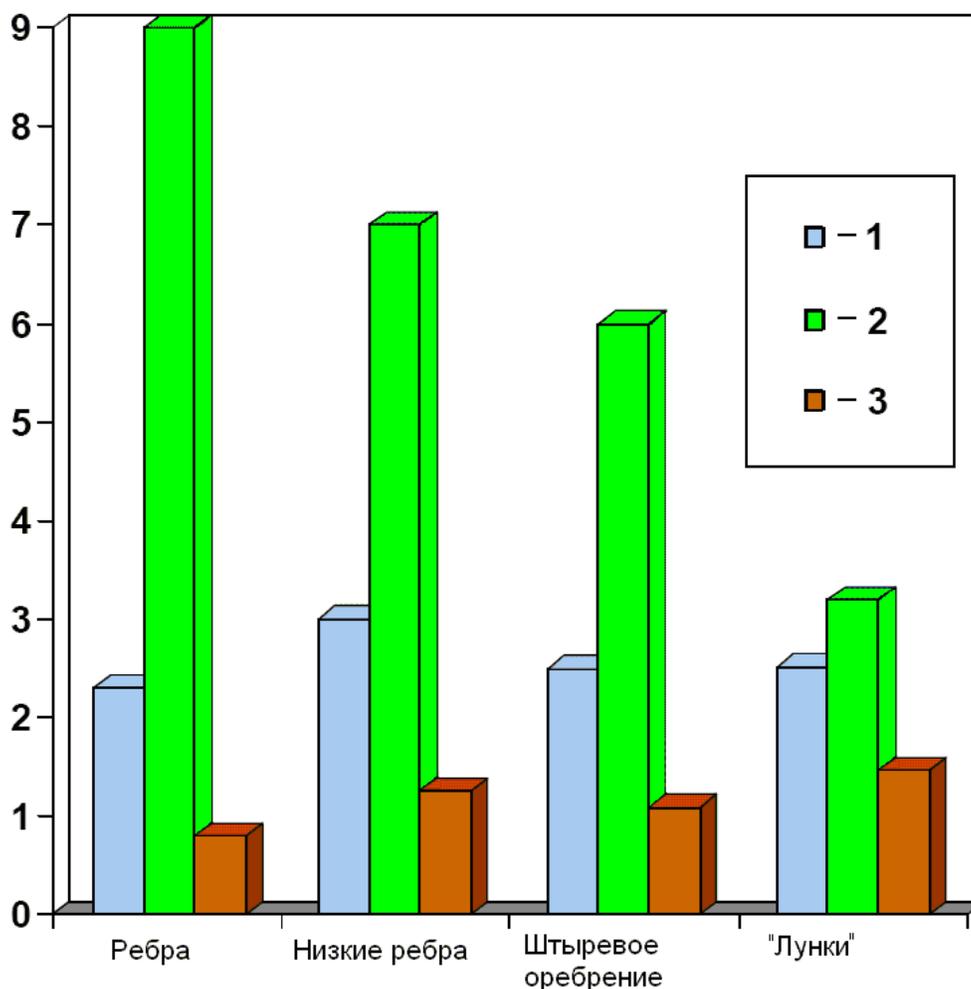
1 Анализ литературных данных по исследованию аналогии Рейнольдса

Одним из наиболее эффективных методов повышения экономичности энергетического оборудования является интенсификация процессов тепломассообмена, позволяющая снизить габариты теплообменного оборудования и, соответственно, его стоимость. Наиболее

приемлемым методом интенсификации теплообмена в теплообменном оборудовании является применение различных турбулизаторов потока. Существуют разные типы интенсификаторов теплообмена, реализующих данный подход. На рисунке 2 приведена диаграмма, на которой показан относительный рост гидравлического сопротивления, интенсификация теплообмена и теплогидравлическая эффективность исследуемых поверхностей, по сравнению с гладкой поверхностью. В качестве параметра теплогидравлической эффективности взято выражение, полученное из уравнения для кривой Нуннера

$$k1 = (Nu/Nu_0) / (\sqrt{C_f/C_{f0}}).$$

Как показано на рис. 2 применение интенсификаторов теплообмена обычно ведет к существенному увеличению гидравлического сопротивления. Тем интереснее результаты, полученные на теплообменных поверхностях с вихревыми интенсификаторами («лунки»), так как в данном случае существенному росту теплообмена соответствует практически равноценный рост гидравлического сопротивления. Благодаря этим качествам, к поверхностям с вихревыми интенсификаторами проявляется повышенный интерес в ведущих исследовательских центрах по всему миру. В литературе существует множество работ посвященных экспериментальному и численному исследованию данных поверхностей (из фундаментальных можно отметить работы [1, 2, 3, 4, 5]). При этом до сих пор нет ответа на вопрос об оптимальной (с точки зрения теплогидравлической эффективности) форме, хотя одна из первых публикаций по использованию нанесенных на поверхность лунок (полусферических углублений) для интенсификации теплообмена появилась еще 1961 [6]. Все это свидетельствует о необходимости проведения дополнительных исследований.



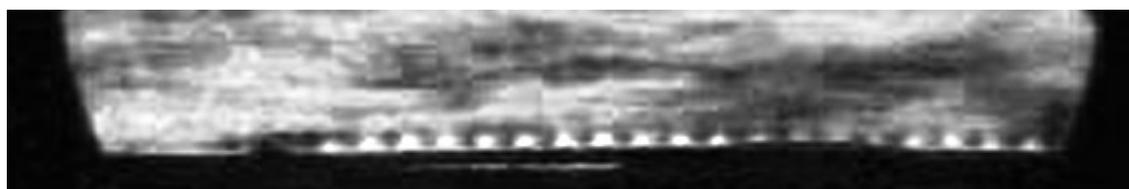
1 – интенсификация теплообмена по сравнению с гладкой поверхностью; 2 – рост гидравлического сопротивления по сравнению с гладкой поверхностью; 3 - параметр теплогидравлической эффективности $k1$.

Рисунок 2 - Теплогидравлическая эффективность поверхностей с различными интенсификаторами теплообмена

При обтекании потоком газа или жидкости углублений в виде лунок возникают крупномасштабные динамические вихревые структуры, наблюдаемые как при ламинарном, так и при турбулентном режимах течения. Эти структуры наблюдаются и при низкой дозвуковой скорости (при значении числа Маха $M < 0,3$, когда сжимаемостью среды можно пренебречь), и при течении с большой дозвуковой и сверхзвуковой скоростью (когда сжимаемостью среды пренебрегать нельзя).

Наличие вихревых структур на поверхности теплообмена приводит к разрушению пограничного слоя и, соответственно, интенсифицирует процессы теплообмена. Естественно, возникновение возмущающих факторов в потоке влияет и на гидродинамику течения. Теневые картины обтекания потоком воздуха поверхностей, покрытых регулярным рельефом, представлены на рисунке 3.

На рис. 3.а показано дозвуковое обтекание пластины. Как видно из фотографии, в этом случае над лунками образуется ярко выраженная оптическая неоднородность в виде "столбиков". Это явление можно объяснить тем, что внутри лунки располагаются вихри, которые поднимаются над ними и создают оптическую неоднородность. Из фотографии видно, что высота подъема вихря над лункой соизмерима с ее размерами.



а.



б.

а – обтекание пластины, покрытой регулярным рельефом, дозвуковым потоком воздуха; б - обтекание пластины, покрытой регулярным рельефом, сверхзвуковым потоком воздуха.

Рисунок 3 - Теневая картина обтекания потоком воздуха пластины, покрытой регулярным рельефом (лунками)

На рисунке 3.б приведена фотография обтекания пластины, покрытой регулярным рельефом, сверхзвуковым потоком воздуха. Из фотографии видно, что косые скачки уплотнения небольшой интенсивности (угол наклона скачков уплотнения почти не отличается от угла наклона характеристики при данном числе Маха) располагаются между лунками, и из-за малости расстояния между ними можно считать, что они существуют перед передней кромкой

последующей лунки. Этот факт существенно усложняет картину течения газа вдоль поверхности пластины с лунками.

Известно, что генерируемые вихри вызывают интенсивный теплообмен между пограничным слоем и потенциальным ядром потока. Можно назвать три механизма возникновения вихрей на поверхности преграды.

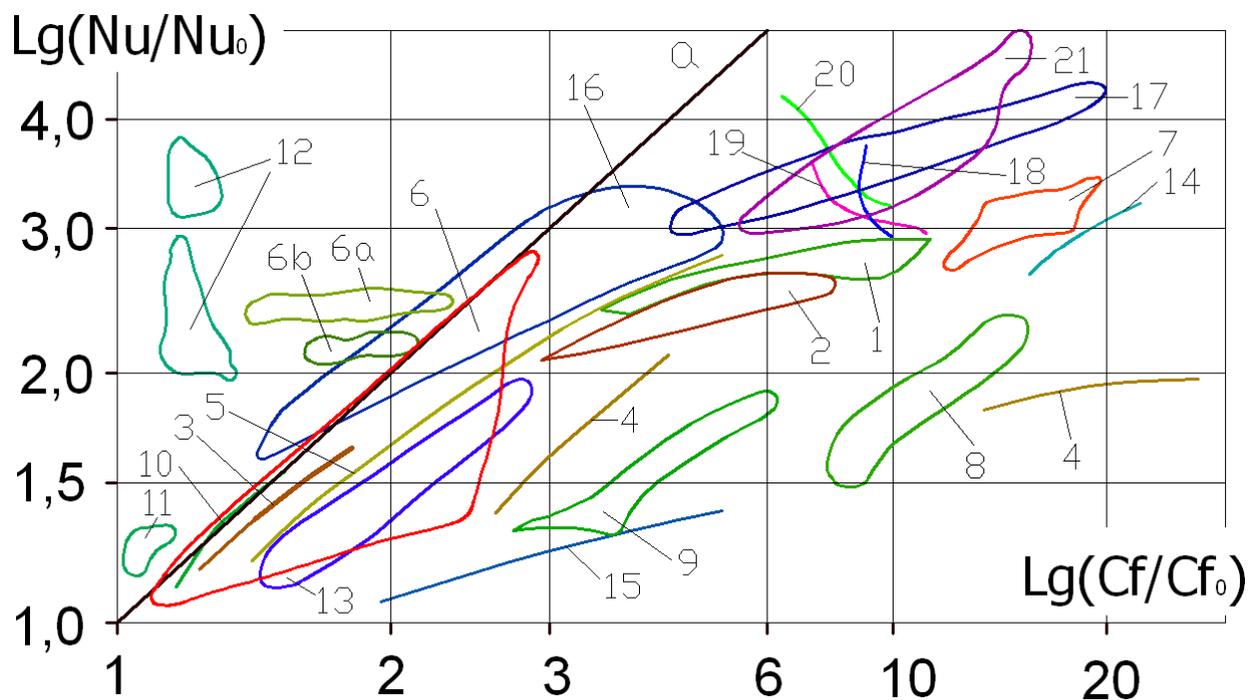
Первый, когда вихри возникают из-за неустойчивости пограничного слоя на вогнутой стенке – это так называемые вихри Тейлора – Гертлера.

Второй, когда механизм образования вихрей осуществляется в вязком газе. Сюда относится система вихревых шнуров, которые образуются во вращающейся жидкости (газе), и вихри, возникающие на задней кромке крыла конечного размаха.

К третьему случаю относится механизм образования вихрей из-за наличия на поверхности вихреобразующих элементов: впадин, бугров, канавок и т.д. В частности, когда вихри генерируются при обтекании поверхности с рельефом в виде полусферических углублений (лунок) и выступов (см., например, работы [7, 8, 9, 10]).

Поверхности с вихреобразующим рельефом позволяют существенно увеличить теплообмен при умеренном росте сопротивления. В ряде работ экспериментально установлено, что при использовании сферических углублений рост теплоотдачи не сопровождается типичным квадратичным увеличением гидравлического сопротивления (особенно ярко это проявляется в щелевых каналах). Сравнительный анализ различных способов интенсификации теплообмена (по данным работы [3]) представлен на рисунке 4. Там же приведены данные других исследователей.

На фоне остальных способов интенсификации особо выделяется использование различных поверхностных углублений (лунок), у которых высокий уровень теплообмена и относительно простая технология производства комбинируется с низким сопротивлением и высокими теплогидравлическими характеристиками.



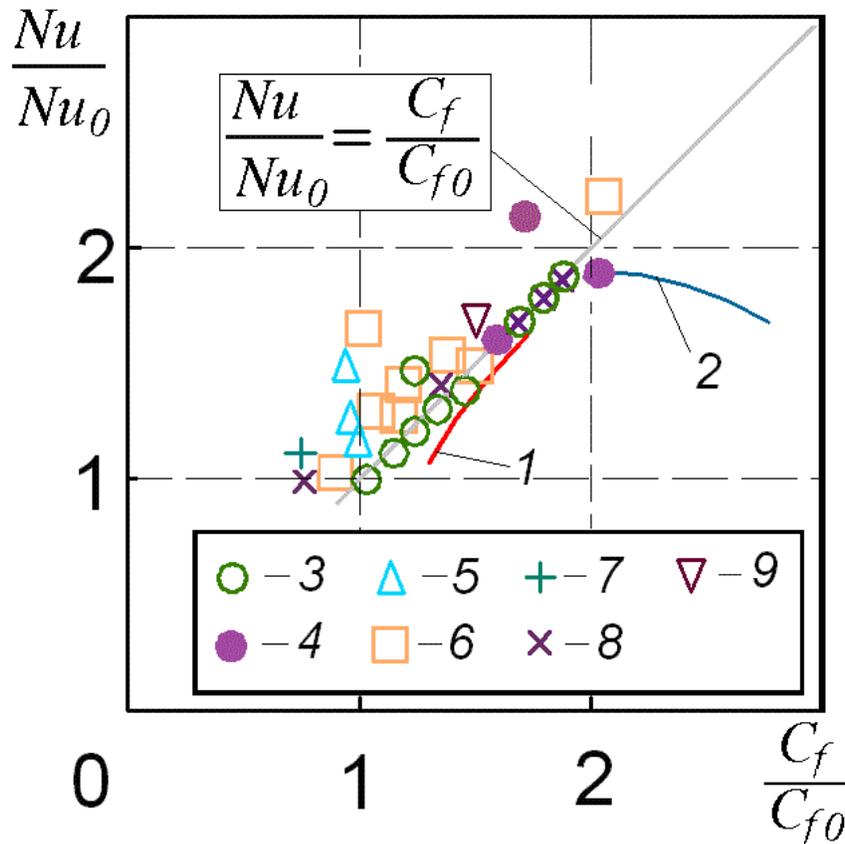
1 – внутреннее кольцевое оребрение; 2 – сферические выпуклости; 3 – скрученные ленты; 4 – цилиндрические «штырьки»; 5 – вихревая матрица [11]; 6 – сферические углубления [12]; 6а – сферические углубления [13]; 6б – сферические углубления [Moon Н.К., O’Konnell Т., Glezer В.]; 7 – внутренние спиральные канавки; 8 – чередующиеся сферические выпуклости-углубления; 9 – внутренние канавки; 10 – винтовые трубы; 11 – риблеты; 12 – сферические углубления (кипение); 13 – каналы переменного сечения; 14 – зигзагообразные каналы; 15 – криволинейные каналы; 16 – овалыные скрученные трубы; 17 – закрученное течение в трубе; 18 – 90° разрезные ребра [13]; 19, 20 – 60° сплошные и разрезные ребра [13]; 21 – внутреннее циклонное охлаждение (трехканальная петлевая схема); а: линия аналогии Рейнольдса.

Рисунок 4 - Сравнительный анализ различных способов интенсификации теплообмена

Тепловые и гидравлические характеристики поверхностей, формованных сферическими углублениями, зависят от многих факторов, например от формы лунок (с острыми кромками или плавными обводами), плотности их расположения на поверхности, продольного и поперечного шага лунок и их относительной глубины, относительной высоты канала и др. Помимо этого на гидравлическое сопротивление и теплообмен в каналах оказывает заметное влияние наличие и взаимное расположение лунок на соседних поверхностях.

Несмотря на достаточно большое количество экспериментальных и численных работ нет достоверных зависимостей и рекомендаций по расчету характеристик «облуненных» поверхностей, обеспечивающих приемлемую точность в широком диапазоне параметров.

Проведенный анализ публикаций показал, что большинство исследований гидравлического сопротивления и интенсификации теплообмена проведены на неглубоких сферических выемках (отношение глубины лунки h к диаметру d до $h/d < 0,2$). Как видно из рисунка 5, основной массив экспериментальных точек, полученных на таких выемках, концентрируется вблизи линии $Nu/Nu_0 = C_f/C_{f0}$.

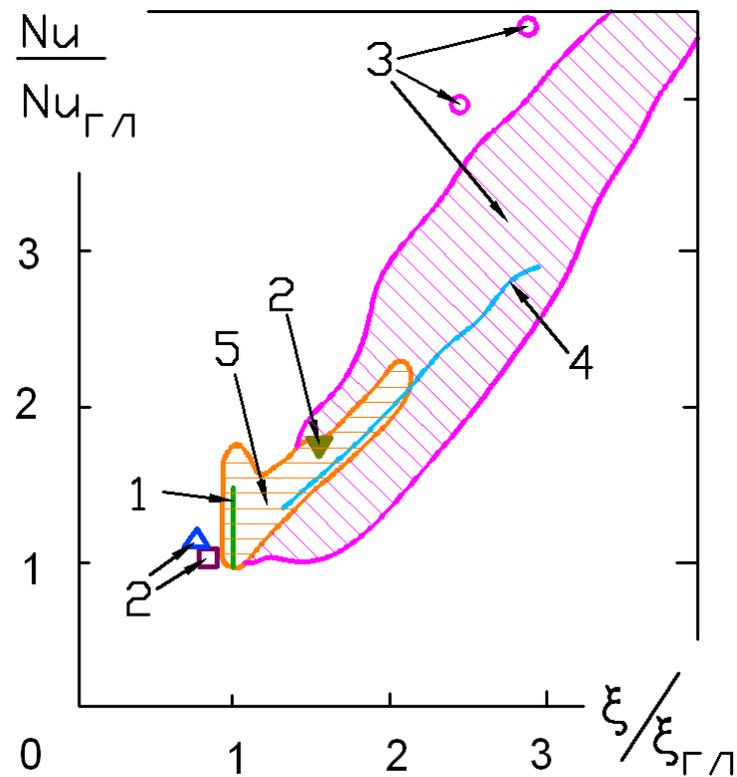


1 - [14]; 2 - [15]; 3, 4 - [16], [17] для одностороннего расположения выемок со скругленными кромками и для двухстороннего расположения выемок с острыми кромками соответственно; 5 - [18]; 6 - [19], коаксиальный кольцевой канал; 7, 8 - [20] пучок трубок, расположенных в шахматном и коридорном порядке соответственно; 9 - [21].

Рисунок 5 - Эффективность интенсификации теплообмена сферическими выемками (при $h/d = 0,1..0,2$)

На рисунке 6 представлены результаты исследований «облуненных» поверхностей различных конфигураций по данным работы [22]. В данной работе вместо отношения

коэффициентов трения C_f/C_{f0} использовалось соотношение соответствующих гидравлических сопротивлений $\xi/\xi_{гл}$.



1 - В.Н. Афанасьева и др.; 2 - М.Я. Беленького и др. (пучок труб, расположенных в шахматном и коридорном порядке); 3 - Ю.Ф. Гортышова и др.; 4 - Г.П. Нагоги и др.; 5 -М.Я. Беленького и др.

Рисунок 6 - Результаты исследований (плоский канал) для поверхностей со сферическими выемками

Однако, как следует из анализа имеющихся работ, теоретические и экспериментальные значения теплогидравлической эффективности существенно различаются (подробнее см. работы [23, 24]). В связи со всем вышеизложенным возникает необходимость проведения новых экспериментальных исследований. Особенно актуальным это является для несферических лунок. Анализ результатов численных исследований (см., например, работы [25, 26, 27, 28, 29, 30]) по интенсификации теплообмена показал, что замена сферических лунок на траншеи (овальные лунки) приводит к значительному росту теплоотдачи при значительно отстающем росте сопротивления.

2 Описание экспериментального стенда и методики исследования

Для получения данных о параметрах теплообмена и сопротивления различных поверхностей с вихребразующим рельефом модернизирован экспериментальный стенд, на котором проведены экспериментальные исследования.

Схема экспериментального стенда и методика измерения. С учетом существующих методов экспериментального определения теплогидравлических характеристик рельефных поверхностей на данном стенде была реализована схема измерения параметров теплообмена и сопротивления, представленная на рисунке 7.

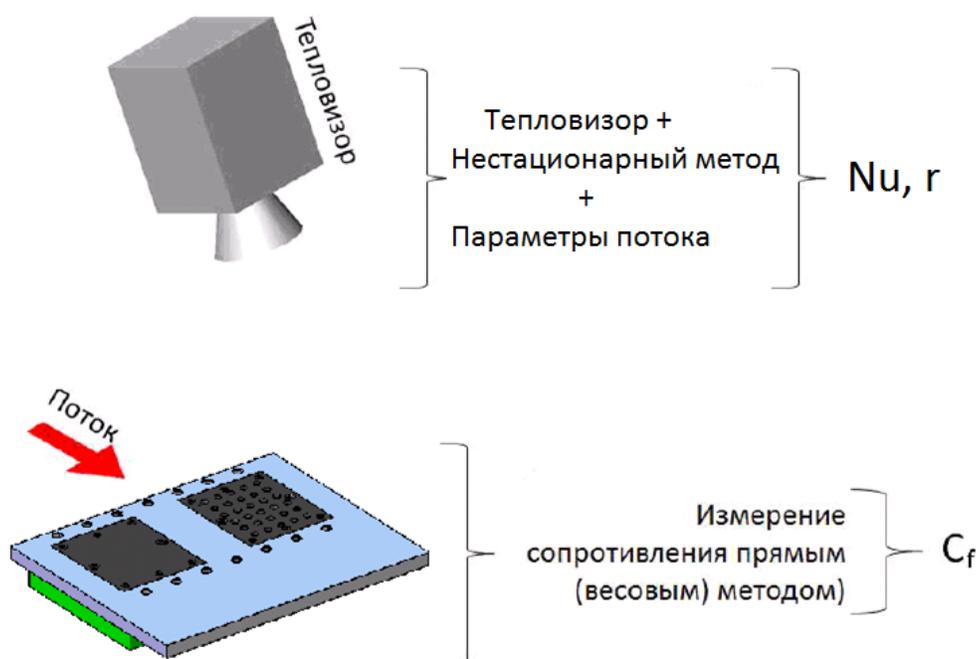


Рисунок 7 - Схема измерения параметров теплообмена и гидравлического сопротивления при проведении экспериментальных исследований

Сопротивление поверхности определяется методом непосредственного взвешивания, для чего разработан и изготовлен специальный упругий элемент.

Параметры теплообмена определяются при помощи тепловизионного оборудования, причем коэффициент теплоотдачи рассчитывается по темпу охлаждения поверхности

(нестационарный метод), а коэффициент восстановления температуры по температуре стенки и параметрам потока (реализуется при течении сжимаемого газа).

Особенность такой постановки эксперимента заключается в том, что измерительное оборудование не вносит возмущений в поток и не нарушает целостности материала исследуемых пластин. При этом указанные параметры измеряются в одном эксперименте для двух поверхностей (одна из которых «рельефная», а другая - гладкая).

На данном этапе была выполнена отработка «взвешивания» пластины, позволяющая с высокой точностью определять гидравлические характеристики поверхностей. Отработка методик определения значений коэффициента восстановления температуры r и критерия Нуссельта Nu (коэффициента теплоотдачи) была проведена ранее и описана в работах [31,32, 33, 34, 35].

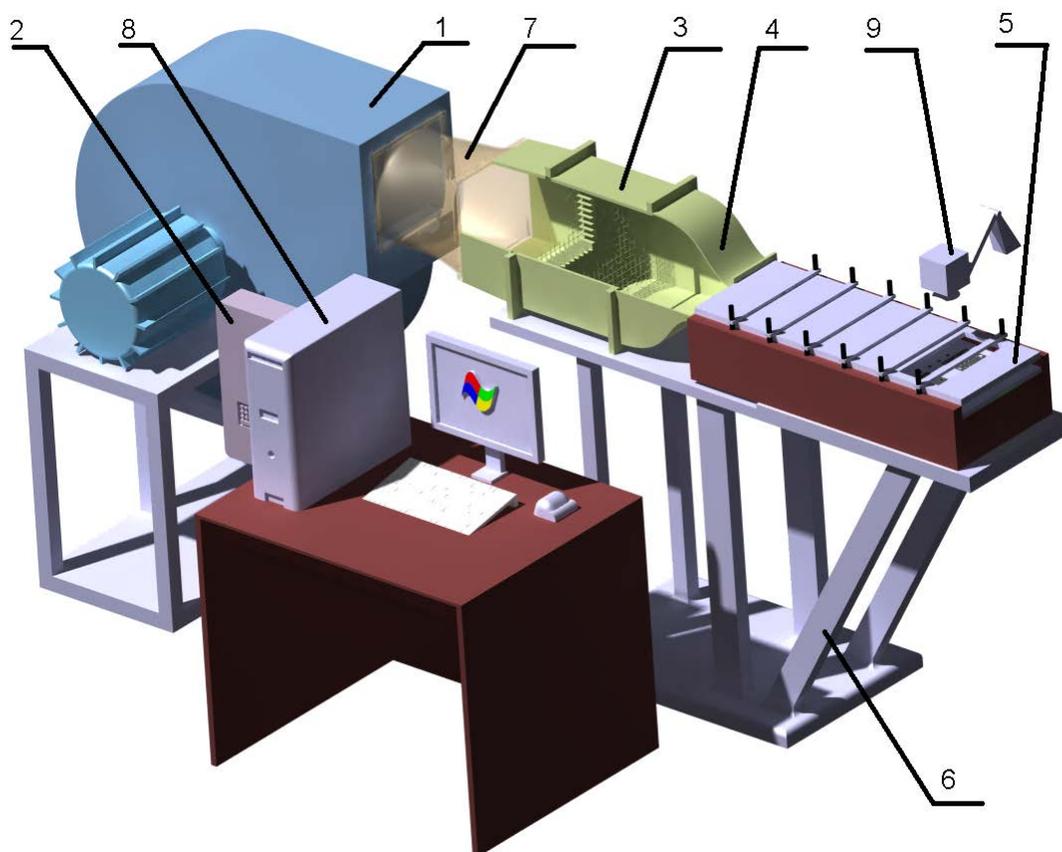
При этом если определение значения критерия Нуссельта (коэффициента теплоотдачи) необходимо для анализа эффективности теплоотдачи, то определение коэффициента восстановления температуры r необходимо для учета специфики теплообмена при течении сжимаемой среды (при числах Маха $M < 0,3$ определение r практически невозможно). Этот учет необходим, например, при расчете устройства газодинамической температурной стратификации газа (подробнее см. работы [36, 37, 38, 39]).

Экспериментальные исследования проводились в НИИ механики МГУ на малой аэродинамической установке, работающей по принципу нагнетания. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 8, а её внешний вид – на рисунке 9.

Установка включает в себя следующие элементы (см. рисунок 8):

- высоконапорный центробежный вентилятор (ВЦ6-20-8-01, фирма «МОВЕН», Россия) (1);
- частотный преобразователь (VFD450F43A, фирма «Delta Electronics, Inc», Китай) (2), предназначенный для плавного регулирования частоты вращения вентилятора и, соответственно, изменения скорости потока в канале;
- форкамера (3) с двумя сетками-детурбулизаторами и спрямляющей решеткой (хонейкомбом, предназначенным для разрушения вихревых структур и получения равномерного потока воздуха в рабочем канале);
- сопло (4);
- рабочий канал (5);

- опорная рама рабочего канала (6), выполненная отдельно от вентилятора (для снижения влияния вибраций вентилятора на рабочий участок);
- мягкий соединительный рукав (7) между вентилятором (1) и форкамерой (3) для гашения колебаний и предотвращения жесткой механической связи между вентилятором и рабочим участком;
- персональный компьютер (8) с системой сбора и обработки данных созданной на базе оборудования и программного обеспечения фирмы National Instruments (США);
- тепловизионная камера (9) TermaCAM SC3000 (Швеция) - для исследования тепловых характеристик поверхностей.



1 – вентилятор; 2 - частотный преобразователь; 3 – форкамера; 4 – сопло; 5 - рабочий канал;
 6 - опорная рама рабочего канала; 7 - соединительный рукав; 8 - персональный компьютер с
 системой сбора и обработки данных; 9 – тепловизионная камера.

Рисунок 8 – Принципиальная схема экспериментальной установки (малой аэродинамической
 установки НИИ механики МГУ)

Рабочая часть установки представляет собой плоский канал длиной 1 м, шириной 0,3 м и высотой 0.03 м. Для того, чтобы исследуемые пластины можно было располагать как на участке развитого турбулентного течения, так и на начальном участке течения, нижняя стенка канала выполнена секционной и состоит из трех равных частей. Вместо одной из секций монтируется экспериментальный участок.



Рисунок 9 – Внешний вид малой аэродинамической установки НИИ механики МГУ

Использование на стенде современного измерительного оборудования, программного обеспечения и высокопроизводительных компьютеров позволяет отслеживать требуемые выше параметры в режиме реального времени.

Система сбора и обработки информации. Сбор и обработка экспериментальных данных осуществляется с помощью современного специализированного оборудования, состоящего из коннекторного блока SCB-100, аналого-цифрового преобразователя NI-1071E,

(производитель – National Instruments, США), подключенного к высокопроизводительному ПК. Для обработки данных используется программное обеспечение LabVIEW, что позволяет проводить запись и обработку данных в автоматическом режиме, а также отображать результаты измерения в режиме реального времени. Для повышения точности за один интервал длительностью 1 с происходит съем 1000 показаний с каждого датчика и выдается средняя величина сигнала. LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench, разработчик – National Instruments, США) – это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G».

Для измерения давлений использовались датчики корпорации Honeywell International (США), для измерения температуры – хромель-капелевые термопары с холодным спаем, термостатированным при 0°C.

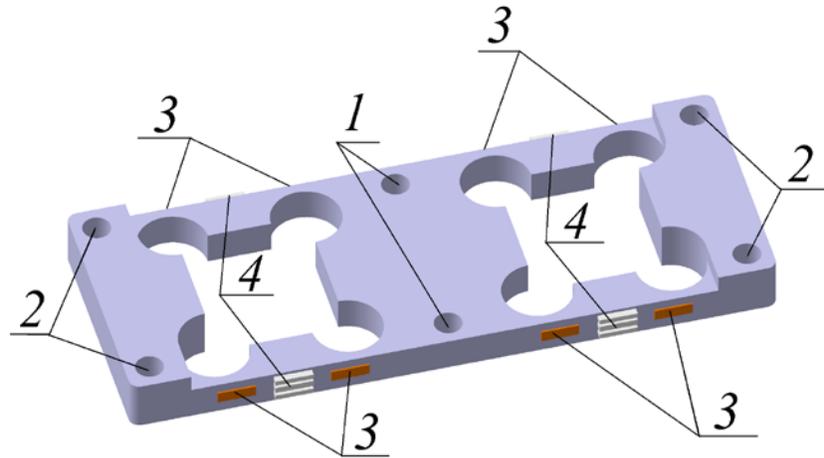
В процессе проведения экспериментов измерялись следующие параметры потока: температуры и давления (по статическим параметрам и по параметрам торможения) на входе в канал и перед экспериментальными поверхностями. Помимо этого измерялись усилия, возникающие на упругом элементе тензометрических весов.

Для работы тензометрических весов необходимо наличие зазоров между исследуемой поверхностью и проточной частью. Так как давление до и после экспериментальных поверхностей различно, то для корректного учета силы, возникающей от действия перепада давления на торцевые поверхности пластин, в зазорах выполнены точки отбора давления (по 3 на каждый торец каждой пластины). По полученным значениям определяли необходимую корректирующую поправку.

Упругий элемент, используемый в тензометрических весах, разработан для измерения сопротивления как гладких, так и рельефных поверхностей. Форма упругого элемента представляет собой сдвоенный параллелограмм (схема упругого элемента представлена на рисунке 10, а внешний вид показан на рисунке 11), на каждую половину которого может быть установлена либо гладкая, либо исследуемая поверхность (поверхность, покрытая рельефом), а центральная часть жестко крепится к основанию стенда (см. рисунок 12). Исходя из этого, каждая исследуемая поверхность закреплена на горизонтальной консольной двухопорной балке, которая может воспринимать деформации только в одном направлении (однокомпонентные тензометрические весы).

Упругий элемент изготовлен с высокой точностью на станке с ЧПУ. В качестве материала упругого элемента выбрана легированная сталь 38ХС с высоким содержанием хрома, что обеспечивает хорошие упругие свойства и долговечность при циклических нагрузках.

Тензометрические датчики наклеены на четыре гибких элемента (в местах наибольших деформаций) каждого параллелограмма, при этом два датчика работают на растяжение, два на сжатие, тем самым образуя полный измерительный мост (см. рис. 10).



1 - места крепления к основанию; 2 - места для установки исследуемых пластин; 3 – тензометрические датчики; 4 - измерительный мост.

Рисунок 10 - Принципиальная схема упругого элемента тензометрических весов



Рисунок 11 - Фотография упругого элемента тензометрических весов

Так как величины деформаций упругого элемента малы (перемещения пластин при максимальной скорости набегающего потока не превышали 0,1 мм), то сигналы с плавающего

элемента усиливались при помощи специально разработанного и изготовленного усилителя (коэффициент усиления – 10).

Размер исследуемых поверхностей составлял 100 x 125 мм. Материал пластин – оргстекло (для повышения точности определения коэффициента теплоотдачи был необходим материал с низким значением коэффициента теплопроводности). Перед каждым экспериментом рабочая поверхность пластин и нижняя поверхность канала притирались совместно и покрывались специальной краской для получения заданного коэффициента черноты поверхности.

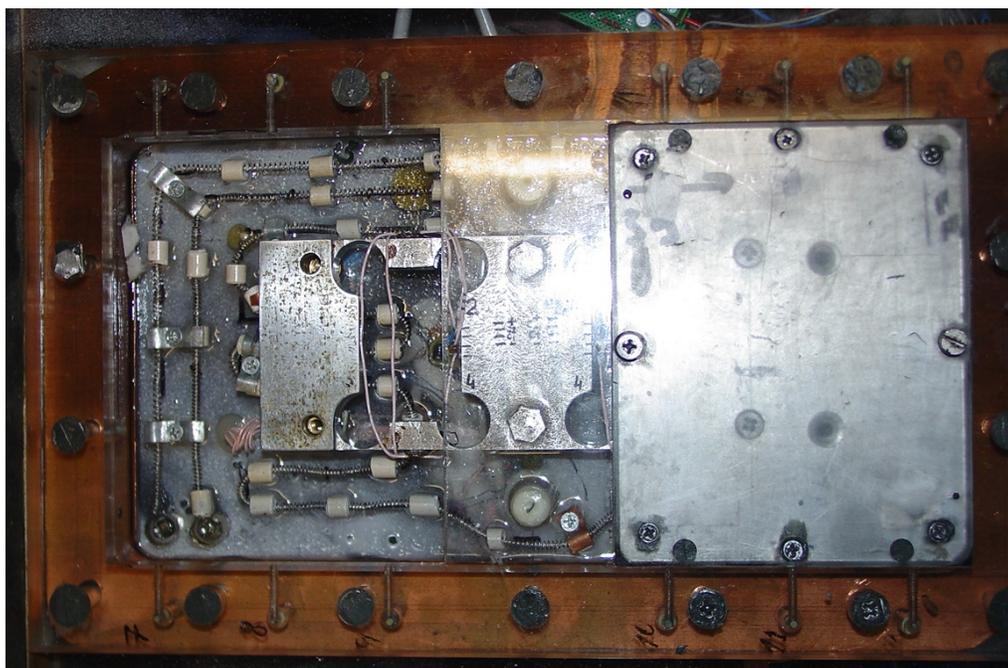


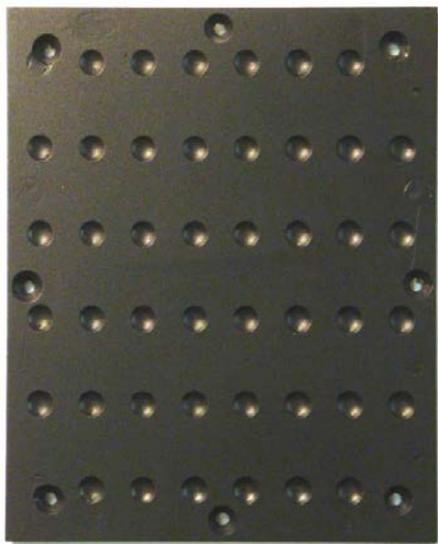
Рисунок 12 - Фотография рабочего участка с упругим элементом тензометрических весов и одной (гладкой) пластиной (до притирки и покраски)

3 Результаты экспериментальных исследований

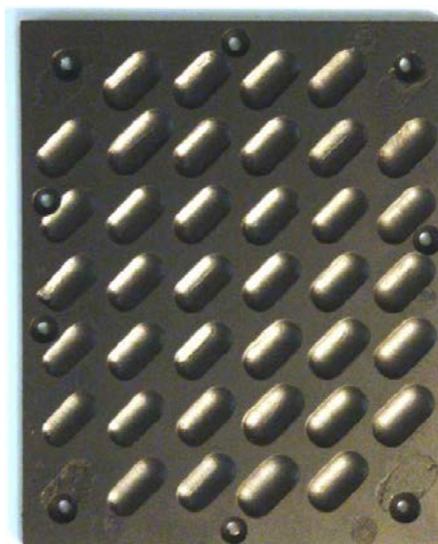
Непосредственно перед проведением экспериментальных исследований на рельефных поверхностях были проведены эксперименты с двумя гладкими поверхностями. Измерялся профиль скорости, влияние вибраций станда, отработывалась методика измерений. Тестовые исследования показали, что данные по сопротивлению и теплообмену на гладких поверхностях соответствуют расчетам, проведенным по общеизвестным зависимостям.

Была выполнена отработка "взвешивания" пластины, позволяющая с высокой точностью (порядка 5 % и точнее) определять гидравлические характеристики поверхностей. Для верификации были использованы экспериментальные данные, полученные до модернизации данной установки и представленные в работе [40].

Во время проведения работ было исследовано 2 варианта рельефа: полусферические лунки с коридорным расположением и траншейные углубления (овальные лунки). Геометрия поверхностей соответствовала данным, представленным в работе [40]. Внешний вид исследованных поверхностей приведен на рисунке 13.



Поверхность №1



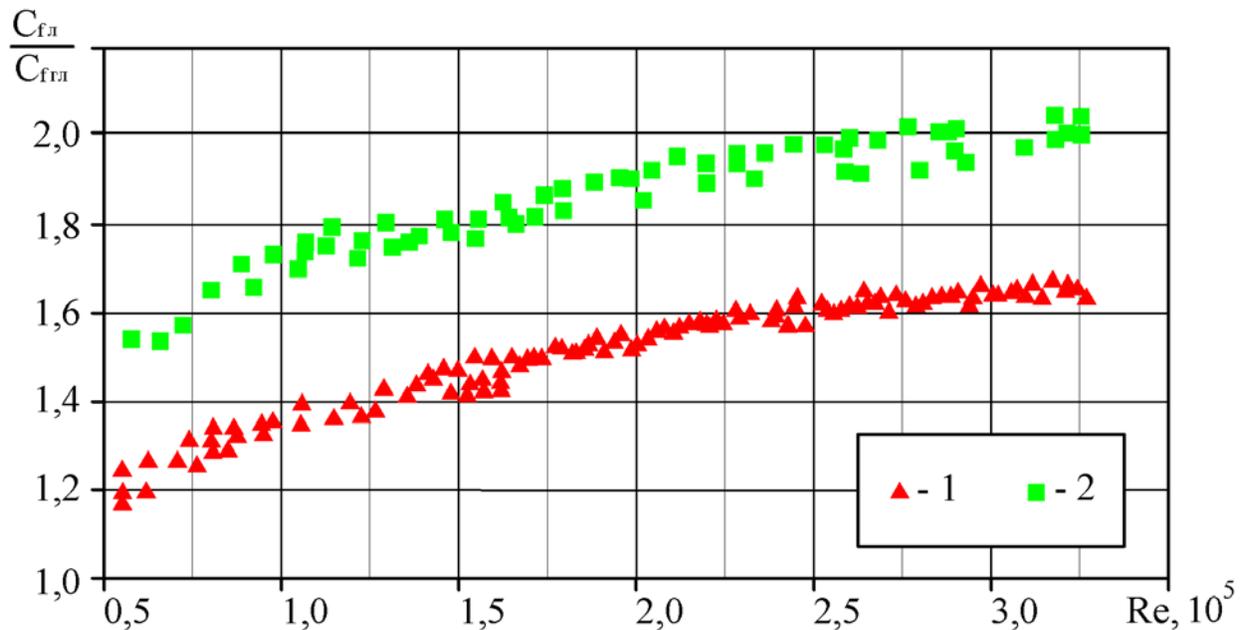
Поверхность №2

Рисунок 13. Фотографии исследованных поверхностей

Результаты экспериментальных исследований роста гидравлического сопротивления представлены на рисунке 14 в виде зависимости отношения коэффициента сопротивления «облуненной» поверхности к коэффициенту сопротивления гладкой поверхности, измеренному в том же эксперименте, от числа Рейнольдса. В качестве характерного размера принят гидравлический диаметр канала.

Из представленных результатов видно, что сопротивление поверхностей с овальными лунками (траншеями) выше, чем сопротивление поверхностей с полусферическими лунками, на 20-35 %, при этом производство овальных лунок требует более сложного оборудования. Однако, из работ [27, 28, 29, 30] следует, что коэффициент теплоотдачи поверхностей с овальными лунками выше почти на 90 %, чем для поверхностей с полусферическими углублениями.

Из анализа распределения температуры на поверхности с углублениями обнаружено (аналогично с работами [10, 32]), что наибольшее снижение температуры поверхности происходит непосредственно за углублением на длине приблизительно равной половине диаметра углубления. В центре углубления температура поверхности практически совпадает с температурой гладкой поверхности.



1 – данные для поверхности №1 (см. рис. 13) 2 – данные для поверхности №2 (см. рис. 13).

Рисунок 14 - Результаты измерения роста сопротивления поверхностей с углублениями сферической и овальной формы по отношению к гладкой поверхности

4 Заключение

При выполнении работы получены следующие результаты:

Выполнен обзор экспериментальных и численных исследований по определению теплогидравлических характеристик теплообменных поверхностей с вихребразующим рельефом, в том числе работ, посвященных прямым измерениям сопротивления (тензометрические весы). Определены геометрические параметры поверхностей для исследования.

Для исследования влияния поверхностных углублений на теплообмен и сопротивление модернизирован экспериментальный стенд, позволяющий в одном эксперименте измерять параметры теплообмена и сопротивление двух исследуемых поверхностей, установленных в потоке параллельно. Основными преимуществами стенда являются измерение сопротивления прямым весовым методом и определение коэффициента теплоотдачи (нестационарным методом) с применением современного тепловизионного оборудования. Отработаны методики обработки данных, полученных при проведении экспериментов.

Проведены экспериментальные исследования параметров сопротивления поверхностей с полусферическими и овальными (траншейными) углублениями. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что поверхности с овальной формой углублений обладают большим (на 20-35 %) сопротивлением, чем поверхности с полусферическими лунками.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 11-08-00152-а и 11-08-00750-а и ведущей научной школы НШ-6495.2012.8.

Список литературы

1. 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: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. 143 с.
2. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакете труб / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. СПб.: Судостроение, 2005. 392 с.
3. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / НАН Украины, Институт технической теплофизики. Киев, 2005. 59 с.
4. Дзюбенко Б.В., Кузма-Китча Ю.А., Леонтьев А.И., Федин И.И., Холпанов Л.П. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах. Москва, ФГУП ЦНИИАТОМИнформ, 2008. 532 с.
5. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: монография / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимпиев, А.В. Щелчков, С.И. Каськов; под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань, Центр инновационных технологий, 2009. 531 с.
6. Федоров И.Г., Щукин В.К., Мухачев Г.А., Идиатуллин Н.С. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление щелевых каналов со сферическими выштамповками // Изв. вузов. Авиационная техника. 1961. № 4. 120-127.

7. Афанасьев В.Н., Леонтьев А.И., Чудновский Я.П. Теплообмен и трение на поверхности с регулярным рельефом сферических вогнутостей // ИТФ. 1991. Т. 63. № 1. С. 23-27.
8. Боровой В.Я., Яковлев Л.В. Теплообмен при сверхзвуковом обтекании одиночной лунки // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1991. № 5. С. 46-52.
9. Кашко А.А. О трёхмерном течении вязкой жидкости вблизи пластины с пространственной шероховатостью // Аэромеханика и газовая динамика. 2002. № 3. С. 73-77.
10. Leontiev A.I., Vinogradov Yu.A., Bednov S.M., Golikov A.N., Yermolaev I.K., Dilevskaya E.V., Strongin M.M. Effect of vortex flows at surface with hollowtype relief on heat transfer coefficient and equilibrium temperature in supersonic flow // Experimental Thermal and Fluid Science. 2002. Vol. 26, no. 5. P. 487-497. DOI: 10.1016/S0894-1777(02)00157-7
11. Нагога Г.П., Рукин М.В., Ануров Ю.М. Гидравлическое сопротивление в плоских каналах со сферическими углублениями // Охлаждаемые газовые турбины двигателей летательных аппаратов: межвуз. сб. / Казан. авиац. ин-т. Казань, 1990. С. 40-44.
12. Терехов В.И., Калинина С.В., Мшвидобадзе Ю.М. Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной // Сиб. физ.- тех. журнал. 1992. № 1. С. 77-85.
13. Chyu M.K., Yu Y., Ding H., Downs J.P., Soechting F.O. Concavity enhancement heat transfer in an internal cooling passage // ASME Paper. 1997. No. 97-GT-437. 8 p.
14. Александров А.А., Горелов Г.М., Данильченко В.П., Резник В.Е. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при обтекании поверхностей с развитой шероховатостью в виде сферических углублений // Промышленная теплотехника. 1989. Т. 11, № 6. С. 57-61.
15. Почуев В.П., Луценко Ю.Н., Мухин А.А. Теплообмен в охлаждаемых лопатках высокотемпературных газовых турбин // Труды Первой Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 8. М.: Изд-во МЭИ, 1994. С. 178-183.
16. Гортышов Ю.Ф., Амирханов Р.Д. Теплообмен и трение в каналах со сферическими углублениями // Рабочие процессы в охлаждаемых турбомашинах и энергетических установках: межвуз. сб. / Казан. гос. техн. ун-т, 1995. С. 87-90.
17. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 1999. 176 с.
18. Афанасьев В.Н., Чудновский Я.Л. Теплообмен и трение при безотрывном обтекании сферических углублений турбулентным потоком воздуха // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1991. № 4. С. 15-25.
19. Беленький М.Я., Готовский М.А., Леках Б.М., Фокин Б.С., Хабенский В.Б. Экспериментальное исследование тепловых и гидравлических характеристик теплообменных

поверхностей, формованных сферическими лунками // Теплофизика высоких температур. 1991. Т. 29, № 6. С. 1142-1147.

20. Бельский М.Я., Готовский М.А., Лекаш Б.М. и др. Интенсификация теплообмена при использовании поверхностей, формованных сферическими лунками // Теплообмен - ММФ - 92: Минский международный форум: тез. докл. Т. 1, ч.1 / ИТМО НАНБ. Минск, 1992. С. 90-92.

21. Туркин А.В., Сорокин А.Г., Брагина О.Н. и др. Интенсификация теплообмена при помощи лунок в плоском канале при низких скоростях движения воздуха // Теплообмен - ММФ - 92: Минский международный форум: тез. докл. Т. 1, ч.1 / ИТМО НАНБ. Минск, 1992. С. 18-21.

22. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 1999. 176 с.

23. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В. Потенциал энергосбережения различных способов закрутки потока и дискретно шероховатых каналов // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 1. С. 13-49.

24. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В. Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена (обзор) // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 1. С. 7-31.

25. Исаев С.А., Леонтьев А.И. Проблемы моделирования смерчевого теплообмена при турбулентном обтекании рельефа с лунками на стенке узкого канала // Инженерно-физический журнал. 2010. Том 83, № 4. С. 733-742.

26. Influence of the Reynolds Number and the Spherical Dimple Depth on Turbulent Heat Transfer and Hydraulic Loss in a Narrow Channel / Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., Hassel E. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2010. Vol. 53, no. 1-3. P. 178-197. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.042

27. Vortical investigation of heat transfer in microchannels with oval dimples / Isaev S.A., Leonardi E., Timchenko V., Usachov A.E. // Heat Transfer Research. 2010. Vol. 41, no. 4. P. 413-424. DOI: 10.1615/HeatTransRes.v41.i4.50

28. Vortex Mechanism of Heat Transfer Enhancement in a Channel With Spherical and Oval Dimples / Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E. // Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 47, no. 3. P. 301-313. DOI: 10.1007/s00231-010-0720-5

29. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Кудрявцев Н.А. Численное моделирование гидродинамики и теплообмена при турбулентном поперечном обтекании «траншеи» на плоской поверхности // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43, № 1. С. 86-99.

30. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Кудрявцев Н.А., Баранов П.А., Жукова Ю.В. Интенсификация вихревого теплообмена при турбулентном обтекании сферической лунки и

двумерной траншеи на плоской стенке // Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78, № 1. С. 112-122.

31. Бурцев С.А., Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Медвецкая Н.В. Исследование влияния рельефа поверхности на коэффициент восстановления температуры // 4-я Российская национальная конференция по теплообмену (23-27 октября 2006 года, Москва): труды. В 8 т. Т. 6. Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена. М.: Изд-во МЭИ. С. 170-173.

32. Здитовец А.Г., Титов А.А. Влияние формы поверхности теплоизолированного стержня, омываемого сверхзвуковым потоком, на коэффициент восстановления температуры // Известия РАН. Энергетика. 2007. № 2. С. 111-117.

33. Титов А.А. Экспериментальное исследование сопротивления и теплообмена на поверхности со сферическими углублениями в потоке сжимаемого газа // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 1. С. 82-87.

34. Бурцев С.А., Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М., Титов А.А. Исследования влияния рельефа поверхности на коэффициент восстановления температуры // Труды 5-ой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-5). Т. 2. М.: Изд-во МЭИ, 2010. С. 61-64.

35. Titov A.A., Leontiev A.I., Vinogradov U.A., Zditovets A.G., Strongin M.M. Experimental Investigation of Skin Friction Drag and Heat Transfer on the Surfaces with Concavities in Compressible Fluid Flow // Proceedings of the International Heat Transfer Conference (ИНТС-14). August 8-13, 2010, Washington, DC, USA. ИНТС14-22585.

36. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 1. С. 157-159.

37. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа // Известия РАН. Энергетика. 2000. № 5. С. 101-113.

38. Бурцев С.А. Исследование температурной стратификации газа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1998. № 2. С. 65-72.

39. Бурцев С.А. Оптимизация геометрии сверхзвукового канала в устройстве для энергоразделения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1999. № 2. С. 48-54.

40. Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Медвецкая Н.В., Стронгин М.М., Титов А.А. Экспериментальное исследование влияния вихреобразующего рельефа на сопротивление плоской поверхности // Тепловые процессы в технике. 2010. Т. 2, № 7. С. 290-293.

Experimental study of parameters of surfaces coated with regular relief

01, January 2013

DOI: 10.7463/0113.0532996

Burtsev S.A., Vasil'ev V.K., Vinogradov Yu.A., Kiselev N.A., Titov A.A.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation
Russia, Moscow Aviation Institute (National Research University)
Russia, Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University

serg7573@pochta.ru

vvk1961@list.ru

vinograd@imec.msu.ru

kiselev.nick.a@gmail.com

zibidok@mail.ru

Publications with keywords: [heat transfer intensification](#), [spherical dimples](#), [oval dimples](#), [Nusselt number](#), [friction factor](#), [Reynolds analogy](#), [curve Nunnera](#), [vortex generating relief](#), [vortex intensification](#)

Publications with words: [heat transfer intensification](#), [spherical dimples](#), [oval dimples](#), [Nusselt number](#), [friction factor](#), [Reynolds analogy](#), [curve Nunnera](#), [vortex generating relief](#), [vortex intensification](#)

References

1. Shchukin A.V., Kozlov A.P., Agachev R.S., Chudnvsikii Ia.P. *Intensifikatsiia teploobmena sfericheskimi vyemkami pri vozdeistvii vozmushchaiushchikh faktorov* [Intensification of heat transfer by spherical dimples under the influence of disturbing factors]. Kazan', KSTU Publ., 2003. 143 p.
2. Bystrov Iu.A., Isaev S.A., Kudriavtsev N.A., Leont'ev A.I. *Chislennoe modelirovanie vikhrevoi intensifikatsii teploobmena v pakete trub* [Numerical simulation of vortex heat exchange intensification in bundle of tubes]. St. Petersburg, Sudostroenie, 2005. 392 p.
3. Khalatov A.A. *Teploobmen i gidrodinamika okolo poverkhnostnykh uglublenii (lunok)* [Heat transfer and hydrodynamics near surface dimples (holes)]. NAS of Ukraine, Institute of technical thermal physics, Kiev, 2005. 59 p.

4. Dziubenko B.V., Kuzma-Kitcha Iu.A., Leont'ev A.I., Fedin I.I., Kholpanov L.P. *Intensifikatsiia teplo- i massoobmena na makro-, mikro- i nanomasshtabakh* [Intensification of heat and mass transfer at the macro-, micro - and nanoscale]. Moscow, TsNIIATOMInform, 2008. 532 p.
5. Gortyshov Iu.F., Popov I.A., Olimp'ev V.V., Shchelchkov A.V., Kas'kov S.I. *Teplogidravlicheskaia effektivnost' perspektivnykh sposobov intensivatsii teplootdachi v kanalakh teploobmennogo oborudovaniia. Intensifikatsiia teploobmena* [Heat hydraulic efficiency of the perspective ways of intensification of heat transfer in the channels of the heat-exchange equipment. Intensification of heat exchange]. Kazan', Center of innovative technologies, 2009. 531 p.
6. Fedorov I.G., Shchukin V.K., Mukhachev G.A., Idiatullin N.S. Teplootdacha i gidravlicheskie soprotivlenie shchelevykh kanalov so sfericheskimi vyshtampovkami [Heat transfer and hydraulic resistance of narrow channels with spherical dimples]. *Izv. VUZ. Aviatsionnaia tekhnika*, 1961, no. 4, pp. 120-127.
7. Afanas'ev V.N., Leont'ev A.I., Chudnovskii Ia.P. Teploobmen i trenie na poverkhnosti s reguliarnym rel'efom sfericheskikh vognutostei [Heat transfer and friction on the surface with regular relief of spherical dimples]. *ITF*, 1991, vol. 63, no. 1, pp. 23-27.
8. Borovoi V.Ia., Iakovlev L.V. Teploobmen pri sverkhzvukovom obtekanii odinochnoi lunki [Heat transfer in supersonic flow around a single hole]. *Izvestiia RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza* [Bulletin of the Universities. Fluid and gas mechanics], 1991, no. 5, pp. 46-52.
9. Kashko A.A. O trekhmernom techenii viazkoi zhidkosti vblizi plastiny s prostranstvennoi sherokhovatost'iu [Three-dimensional flow of a viscous fluid near the plate with spatial roughness]. *Aeromekhanika i gazovaia dinamika*, 2002, no. 3, pp. 73-77.
10. Leontiev A.I., Vinogradov Yu.A., Bednov S.M., Golikov A.N., Yermolaev I.K., Dilevskaya E.V., Strongin M.M. Effect of vortex flows at surface with hollowtype relief on heat transfer coefficient and equilibrium temperature in supersonic flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, no. 26, no. 5, pp. 487-497. DOI: 10.1016/S0894-1777(02)00157-7
11. Nagoga G.P., Rukin M.V., Anurov Iu.M. Gidravlicheskie soprotivlenie v ploskikh kanalakh so sfericheskimi uglublenniami [Hydraulic resistance in a flat channel with spherical dimples]. *Okhlazhdaemye gazovye turbiny dvigatelei letatel'nykh apparatov: mezhvuz. sb.* [Cooled gas turbine aircraft engines: inter-University collect.]. Kazan', KAI, 1990, pp. 40-44.
12. Terekhov V.I., Kalinina S.V., Mshvidobadze Iu.M. Eksperimental'noe issledovanie razvitiia techeniia v kanale s polusfericheskoi kavernoii [Experimental study of the development of the flow in the channel with a hemispherical cavity]. *Sibirskii fiziko- tekhnicheskii zhurnal*, 1992, no. 1, pp. 77-85.
13. Chyu M.K., Yu Y., Ding H., Downs J.P., Soechting F.O. Concavity enhancement heat transfer in an internal cooling passage. *ASME Paper*, 1997, no. 97-GT-437, 8 p.
14. Aleksandrov A.A., Gorelov G.M., Danil'chenko V.P., Reznik V.E. Teplootdacha i gidravlicheskie soprotivlenie pri obtekanii poverkhnostei s razvitoi sherokhovatost'iu v vide sfericheskikh uglublennii [Heat transfer and hydraulic resistance in the flow around surfaces with

developed roughness in the form of spherical dimples]. *Promyshlennaiia teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 1989, vol. 11, no. 6, pp. 57-61.

15. Pochuev V.P., Lutsenko Iu.N., Mukhin A.A. Teploobmen v okhlazhdaemykh lopatkakh vysokotemperaturnykh gazovykh turbin [Heat transfer in cooled blades of high-temperature gas turbines]. *Trudy Pervoi Ros. nats. konf. po teploobmenu. T. 8.* [Proc. of the First Russian national conference on heat transfer. Vol. 8.]. Moscow, MEI Publ., 1994, pp. 178-183.

16. Gortyshov Iu.F., Amirkhanov R.D. Teploobmen i trenie v kanalakh so sfericheskimi uglublenniami [Heat transfer and friction in the channels with spherical dimples]. *Rabochie protsessy v okhlazhdaemykh turbomashinakh i energeticheskikh ustanovkakh: mezhvuz. sb.* [Work processes in cooled turbomachines and power plants: Intercollege collect.]. Kazan', KSTU Publ., 1995, pp. 87-90.

17. Gortyshov Iu.F., Olimp'ev V.V. *Teploobmennye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom* [Heat exchanging devices with intensified heat transfer]. Kazan', KSTU Publ., 1999. 176 p.

18. Afanas'ev V.N., Chudnovskii Ia.L. Teploobmen i trenie pri bezotryvnom obtekanii sfericheskikh uglublennii turbulentnym potokom vozdukha []. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 1991, no. 4, pp. 15-25.

19. Belen'kii M.Ia., Gotovskii M.A., Lekakh B.M., Fokin B.S., Khabenskii V.B. Eksperimental'noe issledovanie teplovykh i gidravlicheskh kharakteristik teploobmennyykh poverkhnostei, formovannykh sfericheskimi lunkami [Experimental investigation of the thermal and hydraulic characteristics of heat exchange surfaces, molded by spherical hole]. *Teplofizika vysokikh temperature* [Thermal physics of high temperatures], 1991, vol. 29, no. 6, pp. 1142-1147.

20. Belen'kii M.Ia., Gotovskii M.A., Lekakh B.M., et al. Intensifikatsiia teploobmena pri ispol'zovanii poverkhnostei, formovannykh sfericheskimi lunkami [Intensification of heat transfer when using of surfaces, formed by spherical hole]. *Teplomassoobmen - MMF - 92: Minskii mezhdunarodnyi forum: tez. dokl. T. 1, ch.1* [Heat and Mass Transfer - MMF - 92: Minsk International Forum: Abstracts, vol. 1, pt .1]. Minsk, The Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 1992, pp. 90-92.

21. Turkin A.V., Sorokin A.G., Bragina O.N., et al. Intensifikatsiia teploobmena pri pomoshchi lunok v ploskom kanale pri nizkikh skorostiakh dvizheniia vozdukha [Intensification of heat exchange with the help of holes in a flat channel at low speeds of movement of air]. *Teplomassoobmen - MMF - 92: Minskii mezhdunarodnyi forum: tez. dokl. T. 1, ch.1* [Heat and Mass Transfer - MMF - 92: Minsk International Forum: Abstracts, vol. 1, pt .1]. Minsk, The Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 1992, pp. 18-21.

22. Gortyshov Iu.F. Olimp'ev V.V. *Teploobmennye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom* [Heat exchanging devices with intensified heat transfer]. Kazan', KSTU Publ., 1999. 176 p.

23. Leont'ev A.I., Olimp'ev V.V. Potentsial energosberezheniia razlichnykh sposobov zakrutki potoka i diskretno sherokhovatykh kanalov [The energy saving potential of different ways spin flow and discrete rough channels. *Izvestiia RAN. Energetika* [Bulletin of the RAS. Energetics], 2010, no. 1, pp. 13-49.

24. Leont'ev A.I., Olimpiev V.V. Teplofizika i teplotekhnika perspektivnykh intensivatorov teploobmena (obzor) [Thermophysics and thermotechnics of promising intensifiers of heat exchange (Review)]. *Izvestiia RAN. Energetika* [Bulletin of the RAS. Energetics], 2011, no. 1, pp. 7-31.
25. Isaev S.A., Leont'ev A.I. Problemy modelirovaniia smerchevogo teploobmena pri turbulentnom obtekanii rel'efa s lunkami na stenke uzkoogo kanala [Problems of simulating tornado-like heat transfer in turbulent flow past a dimpled relief on a narrow channel wall]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2010, vol 83, no. 4, pp. 733-742. (Trans. version: *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 783-793. DOI: [10.1007/s10891-010-0404-5](https://doi.org/10.1007/s10891-010-0404-5)).
26. Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., Hassel E. Influence of the Reynolds Number and the Spherical Dimple Depth on Turbulent Heat Transfer and Hydraulic Loss in a Narrow Channel. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2010, vol. 53, no. 1-3, pp. 178-197. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.042
27. Isaev S.A., Leonardi E., Timchenko V., Usachov A.E. Vortical investigation of heat transfer in microchannels with oval dimples. *Heat Transfer Research*, 2010, vol. 41, no. 4, pp. 413-424. DOI: 10.1615/HeatTransRes.v41.i4.50
28. 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*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 301-313. DOI: 10.1007/s00231-010-0720-5
29. Isaev C.A., Leont'ev A.I., Kudriavtsev N.A. Chislennoe modelirovanie gidrodinamiki i teploobmena pri turbulentnom poperechnom obtekanii «transhei» na ploskoi poverkhnosti [Numerical simulation of hydrodynamics and heat transfer under conditions of turbulent transverse flow past a "trench" on a plane surface]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2005, vol. 43, no. 1, pp. 86-99. (Trans. version: *High Temperature*, 2005, vol. 43, no. 1, pp. 89-102. DOI: [10.1007/s10740-005-0010-y](https://doi.org/10.1007/s10740-005-0010-y)).
30. Isaev C.A., Leont'ev A.I., Kudriavtsev N.A., Baranov P.A., Zhukova Iu.V. Intensifikatsiia vikhrevoogo teploobmena pri turbulentnom obtekanii sfericheskoi lunki i dvumernoi transhei na ploskoi stenke [Enhancement of vortex heat transfer in a bundle of transverse tubes with ordered trenches]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2005, vol. 78, no. 1, pp. 112-122. (Trans. version: *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2005, vol. 78, no. 1, pp. 115-126. DOI: [10.1007/s10891-005-0037-2](https://doi.org/10.1007/s10891-005-0037-2)).
31. Burtsev S.A., Vinogradov Iu.A., Zditovets A.G., Medvetskaia N.V. Issledovanie vliianiia rel'efa poverkhnosti na koeffitsient vosstanovleniia temperatury [Investigation of influence of the surface relief on the coefficient of restitution of temperature]. *4-ia Rossiiskaia natsional'naia konferentsiia po teploobmenu : trudy. V 8 t. T. 6. Dispersnye potoki i poristye sredy. Intensifikatsiia teploobmena* [4th Russian National Heat Transfer Conference : proc. In 8 vols. Vol. 6. Dispersed flows and porous media. Intensification of heat transfer], 23-27 October, 2006, Moscow, MEI Publ., 2006, pp. 170-173.
32. Zditovets A.G., Titov A.A. Vliianie formy poverkhnosti teploizirovannogo sterzhnia, omyvaemogo sverkhzvukovym potokom, na koeffitsient vosstanovleniia temperatury [The influence of heat insulated rod surface shape in the supersonic flow on the temperature recovery factor]. *Izvestiia RAN. Energetika* [Bulletin of the RAS. Energetics], 2007, no. 2, pp. 111-117. 33. Titov A.A.

Eksperimental'noe issledovanie soprotivleniia i teploobmena na poverkhnosti so sfericheskimi uglublenniami v potoke szhimaemogo gaza [Experimental investigation of skin friction drag and heat transfer on the surface with concavities in compressible fluid flow]. *Izvestiia RAN. Energetika* [Bulletin of the RAS. Energetics], 2011, no. 1, pp. 82-87.

34. Burtsev C.A., Vinogradov Iu.A., Zditovets A.G., Strongin M.M., Titov A.A. Issledovaniia vliianiia rel'efa poverkhnosti na koeffitsient vosstanovleniia temperatury [Investigation of influence of the surface relief on the coefficient of restitution of temperature]. *Trudy 5-oi Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu (RNKT-5). T. 2* [Proc. of 5th Russian national conference on heat transfer (PHKT-5). Vol. 2]. Moscow, MEI Publ., 2010, pp. 61-64.

35. Titov A.A., Leontiev A.I., Vinogradov U.A., Zditovets A.G., Strongin M.M. Experimental Investigation of Skin Friction Drag and Heat Transfer on the Surfaces with Concavities in Compressible Fluid Flow. *Proc. of the International Heat Transfer Conference (IHTC-14)*. August 8-13, 2010, Washington, DC, USA, IHTC14-22585.

36. Leont'ev A.I. Gazodinamicheskii metod energorazdeleniia gazovykh potokov [Gas-dynamic method of energy separation of gas flows]. *Teplofizika vysokikh temperature* [Thermal physics of high temperatures], 1997, vol. 35, no. 1, pp. 157-159.

37. Burtsev S.A., Leont'ev A.I. Temperaturnaia stratifikatsiia v sverkhzvukovom potoke gaza [Thermal stratification in the supersonic gas flow]. *Izvestiia RAN. Energetika* [Bulletin of the RAS. Energetics], 2000, no. 5, pp.101-113.

38. Burtsev S.A. Issledovanie temperaturnoi stratifikatsii gaza [Investigation of the temperature stratification of gas]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 1998, no. 2, pp. 65-72.

39. Burtsev S.A. Optimizatsiia geometrii sverkhzvukovogo kanala v ustroistve dlia energorazdeleniia [Optimization of the geometry of the supersonic channel device for energy separation]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 1999, no. 2, pp. 48-54.

40. Vinogradov Iu.A., Zditovets A.G., Medvetskaia N.V., Strongin M.M., Titov A.A. Eksperimental'noe issledovanie vliianiia vikhreobrazuiushchego rel'efa na soprotivlenie ploskoi poverkhnosti [Experimental investigation of the influence of vortex generating relief on resistance of flat surface]. *Teplovyie protsessy v tekhnike*, 2010, vol. 2, no. 7, pp. 290-293.