

**Титов Александр Андреевич**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ УГЛУБЛЕНИЙ НА ТЕПЛООБМЕН И  
СОПРОТИВЛЕНИЕ В ПОТОКЕ СЖИМАЕМОГО ГАЗА**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в НИИ механики МГУ.

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор, академик РАН Леонтьев Александр Иванович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Кузма-Кичта Юрий Альфредович;  кандидат технических наук Ивочкин Юрий Петрович
Ведущая организация:	Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет (СПбГПУ)

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ декабря 2010 г. в \_\_\_ ч. \_\_\_ мин. на заседании Диссертационного совета Д 002.110.02 Объединенного института высоких температур РАН по адресу: г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экз., заверенный печатью организации, просим выслать по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, ОИВТ РАН, ученому секретарю Диссертационного совета Д 002.110.02.

Телефон для справок: 8(926)526-10-29.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



А.Л. Хомкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** В современных и перспективных теплоэнергетических установках теплообменное оборудование составляет основную или заметную часть по габаритам, металлоемкости и функциональному значению и во многом определяет общие технико-экономические показатели установок. Таким образом, одним из главных путей повышения экономичности энергоустановок является совершенствование теплообменного оборудования с помощью внедрения эффективных способов передачи тепла. Посредством интенсификации теплообмена увеличивается количество тепла, передаваемого через единицу поверхности теплообмена, и, соответственно, уменьшаются массогабаритные показатели теплообменника, достигается более выгодное соотношение между передаваемым количеством тепла и мощностью, затрачиваемой на прокачивание теплоносителей. Высокое техническое качество интенсифицированного теплообменного оборудования улучшает общие характеристики энергоустановки.

В последние годы большое внимание уделяется вихревой интенсификации теплообмена, в частности применению теплопередающих поверхностей со сферическими углублениями, которые способствуют возникновению крупномасштабных вихревых структур. Особенностью данного способа является наличие режимов течения, при которых интенсификация теплообмена опережает рост гидравлического сопротивления. Причем, при определенных обстоятельствах гидравлическое сопротивление «облуненных» поверхностей может оставаться на уровне гидравлического сопротивления гладкой поверхности. К достоинству данного метода также можно отнести простую технологию изготовления теплообменных поверхностей.

Еще одна интересная особенность «облуненных» поверхностей, как и всех поверхностей с регулярным рельефом, проявляется при обтекании их сверхзвуковыми потоками. В этом случае экспериментально получено снижение равновесной температуры поверхности, при существенной интенсификации теплообмена. Данное обстоятельство позволяет говорить о перспективности использования таких поверхностей еще в одной очень важной области энергетического оборудования – устройствах газодинамической температурной стратификации (труба Леонтьева).

Однако, существует ряд факторов, препятствующих широкому распространению такого типа интенсификации теплообмена: несогласованность данных (как экспериментальных, так и расчетных) у различных авторов, проводивших исследования в данной области; сложности при проведении численных исследований дозвукового обтекания «облуненных» поверхностей и практически невозможное в настоящее время проведение расчетов при сверхзвуковых режимах течения. Все эти факторы требуют проведения более тщательных экспериментальных исследований с применением современного высокоточного оборудования.

Актуальность представленной диссертационной работы заключается в том, что исследований теплообмена и сопротивления при сверхзвуковом обтекании рельефных поверхностей с углублениями очень мало, а имеющиеся работы посвящены либо изучению параметров теплообмена, либо только измерению сопротивления. В данной работе представлены новые экспериментальные данные по измерению параметров теплообмена и сопротивления поверхности с регулярно расположенными полусферическими углублениями. Эксперименты проведены с применением современного измерительного оборудования.

**Целью данной работы** является исследование влияния регулярно расположенных полусферических углублений на параметры теплообмена и сопротивление поверхности при обтекании ее потоком сжимаемого газа. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнение обзора опубликованных работ по «луночной» тематике, а также методам измерения поверхностного трения в высокоскоростных потоках.
2. Выбор методов экспериментального определения коэффициентов теплоотдачи, восстановления температуры и сопротивления.
3. Разработка, создание и отладка экспериментального стенда для проведения исследований по выбранным методикам.
4. Проведение непосредственно экспериментальных исследований и обработки полученных в ходе эксперимента данных.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Создан уникальный экспериментальный стенд, позволяющий в одном эксперименте определять параметры теплообмена (коэффициент теплоотдачи, коэффициент восстановления температуры при сверхзвуковых скоростях потока) и сопротивление рельефных поверхностей, как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых скоростях потока.
2. Предложена и отработана эффективная методика определения параметров теплообмена и сопротивления рельефных поверхностей с применением современного измерительного оборудования.
3. Получены новые экспериментальные данные по сопротивлению поверхностей с полусферическими и траншейными углублениями в плоском канале при дозвуковых скоростях течения.
4. Впервые в одном эксперименте получены данные по коэффициентам теплоотдачи, восстановления температуры и сопротивлению одновременно для двух исследуемых поверхностей.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обеспечивается использованием современных аттестованных средств измерения и апробированных методик определения параметров, расчетом погрешности измерения, согласованием полученных экспериментальных данных с общеизвестными данными (как теоретическими, так и экспериментальными) других авторов.

**Практическое значение.** Результаты представленных исследований могут быть использованы при проектировании современного высокоэффективного

теплообменного оборудования, исследователями в области численного моделирования для проведения тестовых расчетов (валидации) на существующих, а также вновь разрабатываемых, программных комплексах. Также данные результаты могут быть интересны для разработчиков высокоскоростных летательных аппаратов, подверженных аэродинамическому нагреву, при расчетах тепловых нагрузок. Еще одно направление, где могут быть применены результаты представленных исследований – повышение эффективности устройств газодинамической температурной стратификации (труба Леонтьева). При выполнении поверхностных углублений со стороны сверхзвукового канала длина устройства уменьшается (при заданном количестве передаваемого тепла), при этом снижается и температура охлаждаемого газа (за счет снижения коэффициента восстановления температуры).

**Апробация работы.** Основные положения работы были доложены и получили одобрения на 5-ой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-5, 2010г., МЭИ, г. Москва); на 14-ой международной конференции по теплообмену (14<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference, Вашингтон, США, 2010г.); на 16 и 17-й Школе семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (г. Санкт-Петербург и г. Жуковский, ЦАГИ, 2007-2009гг.); на 9-ой Международной научной конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической газодинамики» (Украина, г. Алушта, 2009г.); на конференции «Ломоносовские чтения» (МГУ, Москва, 2009г.); на конференции молодых ученых (МГУ, Москва, 2010г.); на 10-ой международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики» (Украина, г. Евпатория, 2010г.), на XVI Школе-семинаре «Современные проблемы аэрогидродинамики» (г. Сочи, 2010г.).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах в научных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 2 доклада в иностранных издательствах в трудах Международных конференций.

**Личный вклад автора** состоял в проведении обзора ранее выполненных исследований в области интенсификации теплообмена и в области измерения сопротивления рельефных поверхностей; разработке на основе проведенного обзора и создании экспериментального стенда; проведении серии экспериментальных исследований при дозвуковых скоростях течения потока; проведении экспериментальных исследований и обработке экспериментальных данных по коэффициентам теплоотдачи, сопротивления и восстановления температуры при сверхзвуковом обтекании поверхности с полусферическими лунками; а также подготовке статей и докладов по теме исследования на конференциях и для публикации в рецензируемых журналах.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. По

объему работа содержит 136 страниц, включая 110 рисунков и 8 таблиц по тексту диссертации. Библиография имеет 104 наименования.

### **На защиту выносятся:**

1. Методика определения параметров теплообмена (коэффициентов теплоотдачи, коэффициента восстановления температуры для сверхзвуковых скоростей потока режима) и сопротивления рельефных поверхностей.

2. Результаты экспериментального исследования сопротивления поверхностей с лунками полусферической и траншейной формы в плоском канале при дозвуковых скоростях течения потока.

3. Результаты экспериментального исследования параметров теплообмена (коэффициентов теплоотдачи, коэффициента восстановления температуры) и сопротивления поверхности с полусферическими углублениями, обтекаемой сверхзвуковым потоком воздуха.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** определены цели работы, ее актуальность, научная и практическая значимость решаемых задач, кратко описано содержание работы.

**Первая глава** носит обзорный характер и разделена на две части. В первой рассмотрены экспериментальные работы, посвященные исследованию теплогидравлических характеристик поверхностей с лунками полусферической и траншейной формы. Вторая часть посвящена обзору экспериментальных исследований по измерению сопротивления гладких и рельефных поверхностей методом плавающего элемента. Из проведенного анализа работ сделан вывод о необходимости новых достоверных экспериментальных данных по сверхзвуковому обтеканию облуненных поверхностей. В заключении первой главы сформулированы основные цели работы.

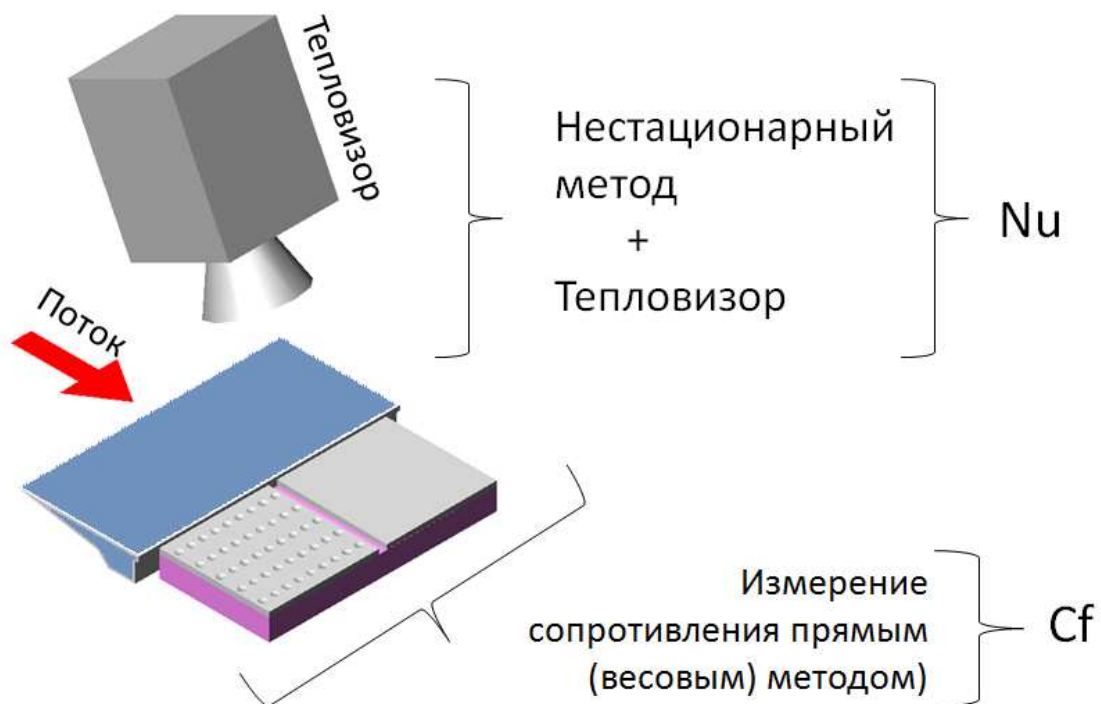
Во **второй главе** представлена принципиальная схема экспериментального определения теплогидравлических характеристик рельефных поверхностей, как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых скоростях набегающего потока. Предложенная схема измерения разработана с учетом выполненного в первой главе обзора. Также приведено описание экспериментального стенда, созданного для отработки выбранной методики измерения сопротивления рельефных поверхностей. Приведены результаты экспериментального определения сопротивления поверхностей с полусферическими и траншейными углублениями.

**Схема экспериментального стенда и методика измерения.** Разработанная схема экспериментального стенда предполагает измерение сопротивления исследуемых поверхностей методом непосредственного взвешивания (плавающего элемента), а измерение параметров теплообмена осуществляется нестационарным методом, по темпу охлаждения исследуемых поверхностей, с использованием тепловизионного оборудования, (см. **рис. 1**). При этом указанные параметры измеряются в одном эксперименте для двух поверхностей (одна из которых рельефная, а другая – гладкая). При этом использование современного измерительного оборудования, программного

обеспечения, высокопроизводительных компьютеров позволяет отслеживать указанные выше параметры в режиме реального времени.

Данные методы измерения могут быть применены как при дозвуковых скоростях течения, так и при сверхзвуковых скоростях потока. Особенность такой постановки эксперимента заключается в том, что измерительное оборудование не вносит возмущений в поток (что особенно важно при сверхзвуковых скоростях течения) и не нарушает целостности материала исследуемых пластин.

Для отработки измерительного оборудования (главным образом наиболее сложной его части – тензовесовой системы) и методики определения теплогидравлических характеристик рельефных поверхностей, а также для получения новых достоверных экспериментальных данных по коэффициентам сопротивления поверхностей с полусферическими и траншейными углублениями были проведены исследования при дозвуковых (от 20 до 100 м/с) скоростях потока.

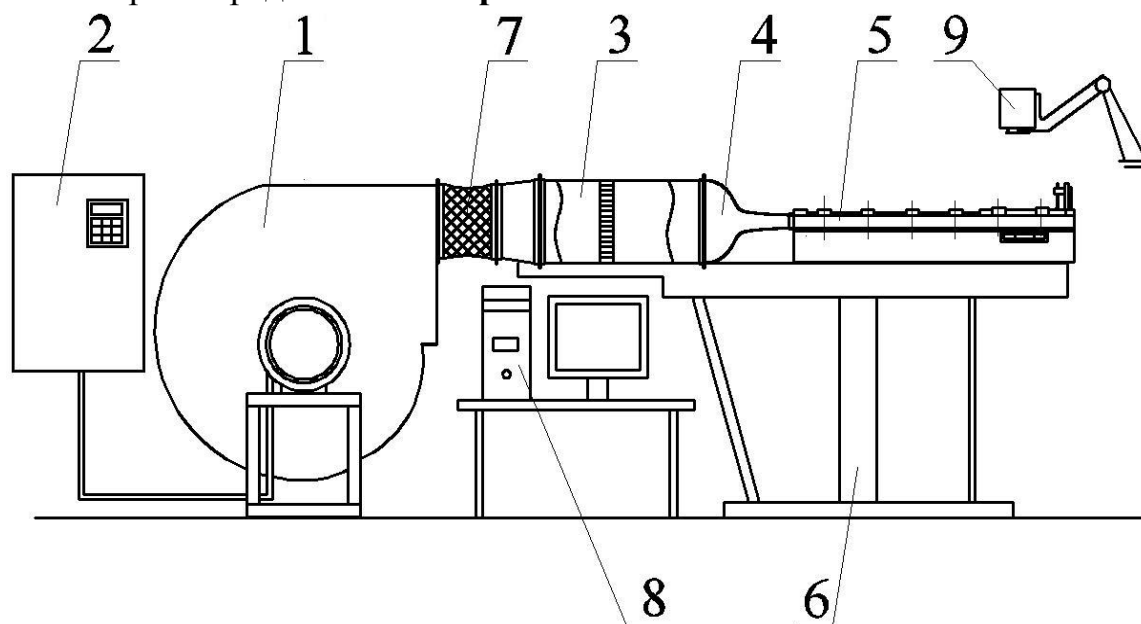


**Рис. 1.** Схема измерения параметров теплообмена и гидравлического сопротивления при проведении экспериментальных исследований.

**Экспериментальная установка для дозвуковых скоростей течения потока.** Схема экспериментальной установки представлена на **рис. 2**. Установка работает по принципу нагнетания и состоит из высоконапорного центробежного вентилятора (1), частотного преобразователя (2), предназначенного для плавного регулирования частоты вращения вентилятора и соответственно, изменения скорости потока в канале. Далее расположены: форкамера (3), сопло (4) и рабочий канал (5), которые для исключения влияний вибрации от вентилятора смонтированы на отдельной опорной раме (6), а

между вентилятором и форкамерой установлен мягкий соединительный рукав (7). Для разрушения вихревых структур и получения равномерного потока воздуха в рабочем канале в форкамере установлены сетки-детурбулизаторы и хонейкомб. Для исследования тепловых характеристик поверхностей над рабочим участком канала может быть установлен тепловизор (9).

Рабочая часть установки представляет собой плоский канал длиной 1 м., шириной 0,3 м. и высотой 0,03 м. Нижняя стенка канала выполнена секционной (состоит из трех равных частей). Вместо последней секции на участке развитого турбулентного течения устанавливался экспериментальный стенд, схема которого представлена на **рис. 3**.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки.

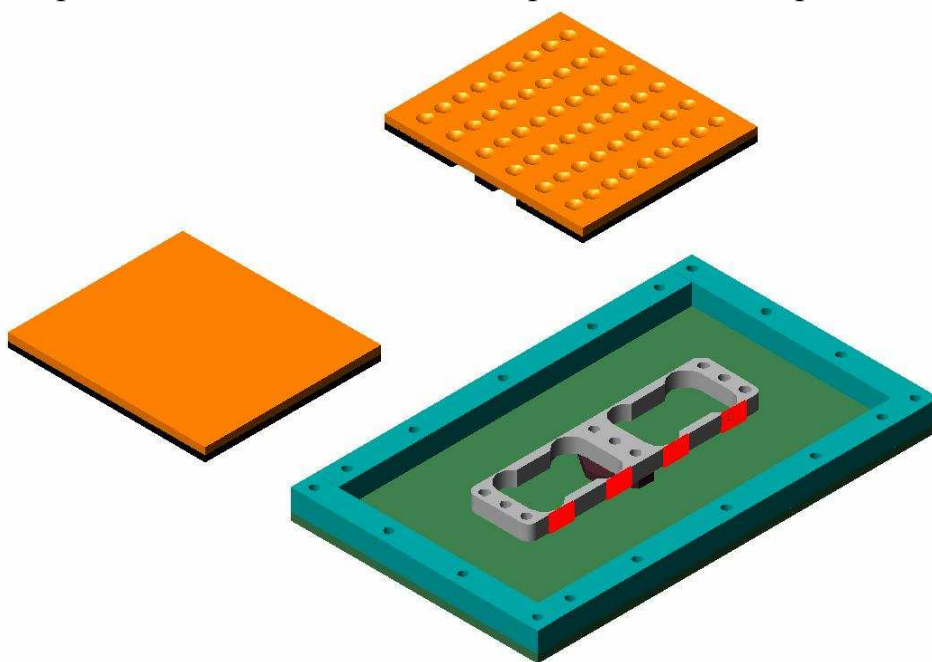
Сопротивление исследуемых поверхностей определяется методом непосредственного взвешивания, для чего, с учетом выполненного обзора экспериментальных работ по измерению сопротивления как гладких, так и рельефных поверхностей, разработан и изготовлен специальный упругий элемент. Форма упругого элемента представляет собой сдвоенный параллелограмм (см. **рис. 3-4**) на каждую половину которого может быть установлена либо гладкая, либо исследуемая поверхность, а центральная часть жестко крепится к основанию стенда (см. **рис.3**). Т.е. каждая исследуемая поверхность закреплена на горизонтальной консольной двухопорной балке, которая может воспринимать деформации только в одном направлении (однокомпонентные тензометрические весы).

Тензодатчики наклеены на четыре гибких элемента (в местах наибольших деформаций) каждого параллелограмма, при этом два датчика работают на растяжение, два на сжатие, и тем самым образуют полный измерительный мост.

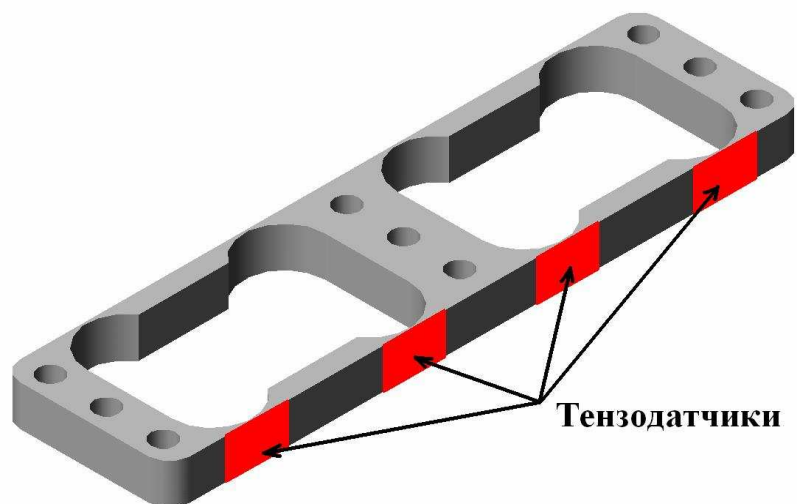
Геометрические параметры исследуемых поверхностей представлены в *таблице 1*. Первые две поверхности покрыты полусферическими углубления-



ми. 3-я и 4-я поверхности покрыты одинаковыми траншейными углублениями, но отличаются взаимным расположением углублений (см. **рис. 5-6**). Все углубления выполнены одним инструментом (сферической фрезой). Размер исследуемых поверхностей – 100х125 мм. Материал пластин – оргстекло.



**Рис. 3.** Схема расположения исследуемых поверхностей на упругом элементе.



**Рис. 4.** Схема упругого элемента.

Таблица 1. Геометрические параметры углублений.

№ поверхности	d, мм	s, мм	h, мм	$\alpha$ , град.	$t_1$ , мм	$t_2$ , мм	Кол-во лунок
1	8,5	8,5	1,25	-	20	12	44
2	6,5	6,5	1	-	20	12	44
3	8,5	17	1,25	45	16	16	38
4	8,5	17	1,25	45	16	16	38

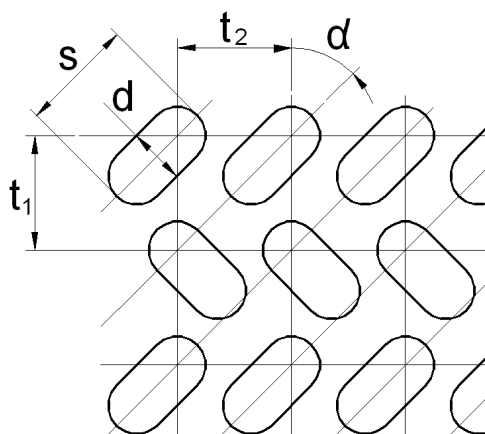


Рис. 5. Геометрические характеристики и схема расположения углублений на поверхности 3.

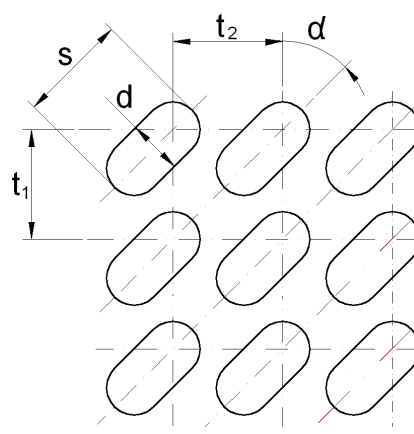
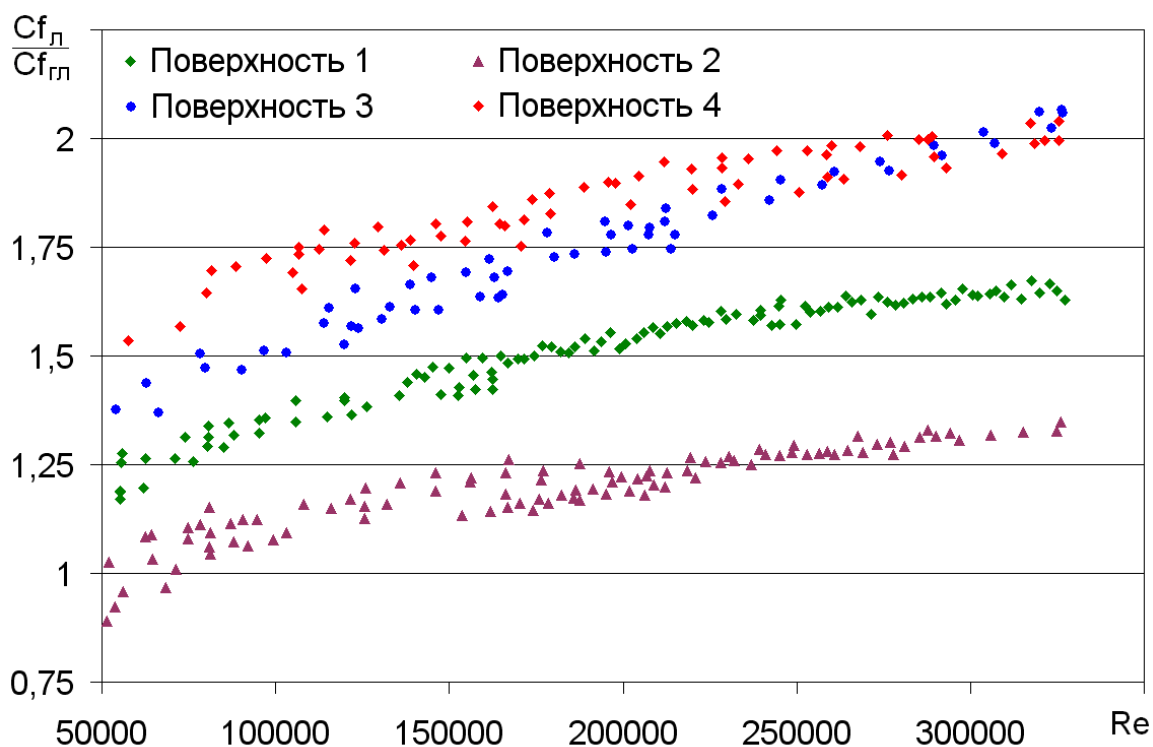


Рис. 6. Геометрические характеристики и схема расположения углублений на поверхности 4.

**Результаты экспериментальных исследований** представлены на **рис. 7** в виде зависимости отношения коэффициента сопротивления облученной поверхности к коэффициенту сопротивления гладкой поверхности, измеренном в том же эксперименте, от числа Рейнольдса. В качестве характерного размера принят гидравлический диаметр канала.

В результате выполненных экспериментальных исследований сопротивления поверхностей с полусферическими углублениями получено, что при определенных параметрах потока и геометрических параметрах углублений сопротивление рельефной поверхности может быть на уровне сопротивления (трения) гладкой поверхности. Результаты экспериментальных исследований сопротивления поверхностей с траншейными углублениями показали, что поверхности с данной формой углублений обладают большим (на 15-20%) сопротивлением, чем поверхности с полусферическими лунками той же глубины, во всем исследованном диапазоне чисел Рейнольдса.



**Рис. 7.** Результаты измерения сопротивления поверхностей с углублениями сферической и траншейной формы (номера поверхностей соответствуют номерам поверхностей в *таблице 1*).

В третьей главе приведены результаты экспериментального определения теплогидравлических характеристик (коэффициента теплоотдачи, восстановления температуры и сопротивления) поверхности со сферическими лунками при сверхзвуковой скорости набегающего потока. В экспериментах использовался стенд, аналогичный описанному во второй главе, но несколько конструктивно измененный в силу значительно больших усилий, действующих на исследуемые поверхности в сверхзвуковых потоках.

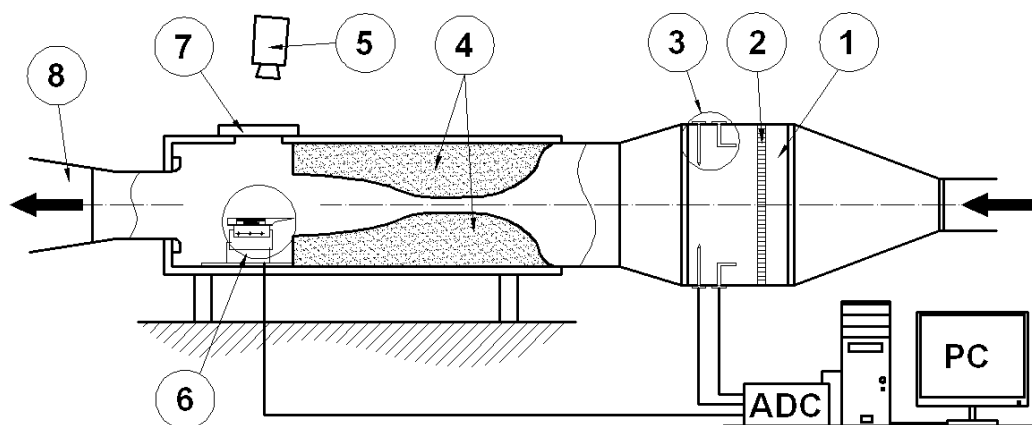
#### **Описание экспериментальной установки.**

Исследования проводились в лаборатории 108 НИИ механики МГУ на сверхзвуковой аэродинамической установке А-11, схема которой показана на **рис. 8**. Установка работает следующим образом: компрессорная станция создает необходимое для работы установки давление в газгольдерах (7 атм). Воздух, пройдя по системе трубопроводов, попадает в форкамеру с установленными сетками и хонейкомбом. После форкамеры равномерный поток попадает в плоское сверхзвуковое сопло и далее в рабочую часть. Ширина рабочей части – 250мм, высота 320мм. Для использования тепловизионного оборудования при определении параметров теплообмена над рабочей частью изготовлено окно из поликристалла ZnSe, прозрачного для необходимого диапазона длин волн теплового излучения. За рабочей частью поток воздуха тормозится в сверхзвуковом диффузоре и выбрасывается в выхлопную шахту. Время работы установки на сверхзвуковом режиме при полностью наполненных газгольдерах составляет

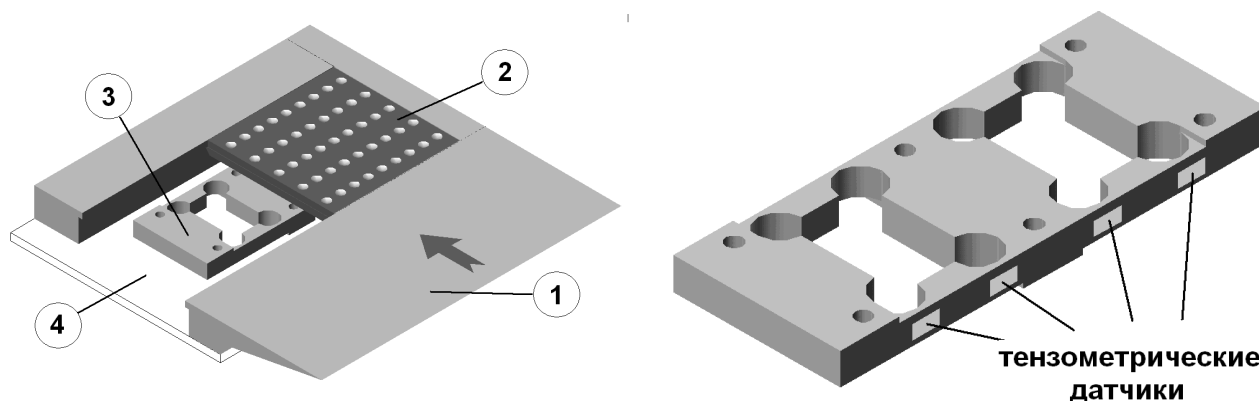
около 7 минут. Число Маха набегающего потока 2,8, единичное число Рейнольдса  $5,5 \cdot 10^7$  1/м.

### Экспериментальный стенд.

Измерения проводились на стенде, конструкция которого аналогична конструкции стенда, используемого при дозвуковых скоростях потока (см. **рис. 9**). Так как величины измеряемых усилий в сверхзвуковом потоке достаточно велики, то в сверхзвуковых экспериментах был применен более жесткий упругий элемент, а также применены арретиры, фиксирующие исследуемые пластины при запуске и останове аэродинамической трубы.



**Рис. 8.** Схема сверхзвуковой аэродинамической установки (1 – форкамера; 2 – набор сеток и хонейкомб; 3 – измерители полного давления и температуры в форкамере; 4 – плоское сверхзвуковое сопло; 5 – тепловизор; 6 – экспериментальный стенд; 7 – экран из поликристалла ZnSe, ADC – аналого-цифровой преобразователь, PC – персональный компьютер).



**Рис. 9.** Схема экспериментального стенда (слева) и упругого элемента (справа) (на схеме экспериментального стенда не показаны гладкая пластина и одна из боковых стенок; стрелкой указано направление потока). Обозначения: 1 – нож; 2 – исследуемая пластина; 3 – упругий элемент; 4 – основание.

Стенд устанавливался в рабочей части таким образом, что пограничный слой развивался с передней острой кромки ножа. Расстояние от передней острой кромки ножа до исследуемых поверхностей 115 мм.

Исследуемые пластины (гладкие и рельефная) выполнены из оргстекла - материала с низким значением коэффициента теплопроводности. размеры исследуемых пластин – 105х105 мм. Толщина пластин 5 мм. Исследуемая рельефная пластина была покрыта сферическими углублениями глубиной 1 мм и диаметром 7 мм. Кромки углублений выполнены острыми. Углубления располагались в коридорном порядке с шагом по потоку 20 мм, поперек потока 11,5 мм. Увеличение площади поверхности за счет нанесения рельефа составило ~1,3%.

### **Метод определения коэффициента теплоотдачи.**

Определение величины коэффициента теплоотдачи осуществляется нестационарным методом, используя экспериментально полученные при помощи тепловизионного оборудования последовательности температурных полей поверхностей исследуемых пластин.

Рассмотрим равномерно нагретое (до некоторой начальной температуры  $T_{нач}$ ) тело, поверхность которого в момент времени  $\tau=0$  начинает омывать поток с заданной температурой  $T_{пот}$ . Изменение профиля температуры по толщине тела  $T(z, \tau)$  можно описать одномерным уравнением теплопроводности (1) для полуграниченного тела с граничными условиями третьего рода (2).

$$\frac{\partial T(z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot C} \cdot \frac{\partial^2 T(z, \tau)}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial z} + \alpha \cdot [T_{пот} - T(0, \tau)] = 0; \quad T(\infty, \tau) = T_{нач} \quad (2)$$

Начальное условие для этого случая:

$$T(z, 0) = T_{нач} \quad (3)$$

При течении сжимаемого газа температура омывающего потока ( $T_{пот}$ ) принимается равной равновесной температуре стенки, которая может быть определена экспериментально для каждой исследуемой поверхности.

При заданных теплофизических свойствах материала омываемого тела и предположении о постоянстве по времени коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , из решения указанного уравнения можно найти распределение температуры поверхности во времени  $T_{пов}(\tau) = T(0, \tau)$ :

$$\theta(\tau) = \frac{T_{пов}(\tau) - T_{нач}}{T_{пот} - T_{нач}} = 1 - e^{H^2 \cdot \alpha \cdot \tau} \cdot \operatorname{erfc}(H \cdot \sqrt{\alpha \cdot \tau}), \quad (4)$$

где  $H = \alpha / \lambda$  – относительный коэффициент теплообмена.

Экспериментально возможно провести измерение распределения  $T_{пов}(\tau)$  и температуры торможения потока. Зная начальную температуру исследуемой поверхности  $T_{нач}$  можно рассчитать распределение во времени  $\theta(\tau)$ , для которого из (4) можно определить значение коэффициента теплоотдачи.

### Определение коэффициента восстановления.

Коэффициент восстановления температуры определялся для каждой исследуемой пластины (как для гладкой, так и для рельефной) в каждом эксперименте.

$$r = 1 - \frac{T^* - T_{cm}}{T^*} \cdot \left( 1 + \frac{2}{(k-1) \cdot M^2} \right) \quad (5)$$

Температура торможения потока измеряется в форкамере, а температура исследуемой поверхности  $T_{ст}$  измеряется при помощи тепловизора.

### Измерение сопротивления.

Коэффициент сопротивления определялся как:

$$\xi = \frac{F - (P_1 + P_2) \cdot \frac{S_{бок}}{2} + (Z_1 + Z_2 + Z_3) \cdot \frac{S_{бок}}{3}}{S \cdot k \cdot P_0 \cdot M^2}, \quad (6)$$

где  $F$  – усилие измеренное тензовесами,  $S$  – площадь пластины,  $S_{бок}$  – площадь торца пластины;  $P_1, P_2, Z_1, Z_2, Z_3$  – показания двух приемников давления расположенных в переднем зазоре и трех приемников давления, расположенных в заднем зазоре, соответственно;  $P_0$  – статическое давление,  $M$  – число Маха.

### Оценка погрешности результатов измерений.

На основе формулы накопления погрешности, погрешность  $\Delta F$  функции  $F$  аргументов  $x_i$  со случайными погрешностями  $\Delta x_i$  (погрешность косвенного измерения), выражается через частные производные функции как:

$$\Delta F = \pm \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (7)$$

Если в качестве случайных погрешностей ( $\Delta x_i$ ) принимать погрешности единичного измерения (как правило, определяемых при статических тарировках соответствующих приборов), то для определения точности эксперимента в целом необходимо учитывать также динамические свойства приборов и ряд других факторов. Однако этим способом можно оценить влияние погрешностей, обусловленных различными факторами, на суммарную погрешность. В данном случае выражение имеет вид:

$$\Delta F(f_1, f_2, \dots, f_i) \leq \left| \frac{\partial F(f_1, f_1, \dots, f_i)}{\partial f_1} \Delta f_1 \right| + \left| \frac{\partial F(f_1, f_1, \dots, f_i)}{\partial f_2} \Delta f_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial F(f_1, f_1, \dots, f_i)}{\partial f_i} \Delta f_i \right| \quad (8)$$

Рассчитанные таким образом погрешности в определении параметров дали следующие результаты:

- Погрешность в определении числа Маха потока составила  $\pm 0.019$ .
- Погрешность в определении температуры торможения потока определяется погрешностью термопары и составляет  $\pm 1^\circ\text{C}$ .
- Погрешность в определении температуры поверхности модели определяется точностью тепловизионного оборудования и составляет 2% от предела измерения.

- Погрешность в определении коэффициента сопротивления составила  $\pm 5.7 \cdot 10^{-5}$ .
- Погрешность в определении коэффициента восстановления температуры составила  $\Delta t = 0,022$  (2,5%).
- Максимальной ошибкой в определении коэффициента теплоотдачи составляет порядка 15%.

### **Результаты методических экспериментов.**

Перед проведением основных экспериментов были проведены методические эксперименты с двумя гладкими поверхностями, в которых было проведено измерение равномерности температурного поля поверхностей, а также измерения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления (трения). Определение коэффициента теплоотдачи во всех экспериментах, как для гладких поверхностей, так и в дальнейшем для рельефной, осуществлялось для области в центре каждой пластины (размер области – 60 мм в направлении потока и 46 мм перпендикулярно направлению потока). При исследовании облуненной поверхности указанная область охватывала 12 углублений (3 ряда по 4 углубления). Измеренные значения коэффициентов теплоотдачи для двух гладких поверхностей отличались не более чем на 5,5%. Результаты измерения сопротивления (трения) на двух гладких поверхностях отличались не более 4,5%.

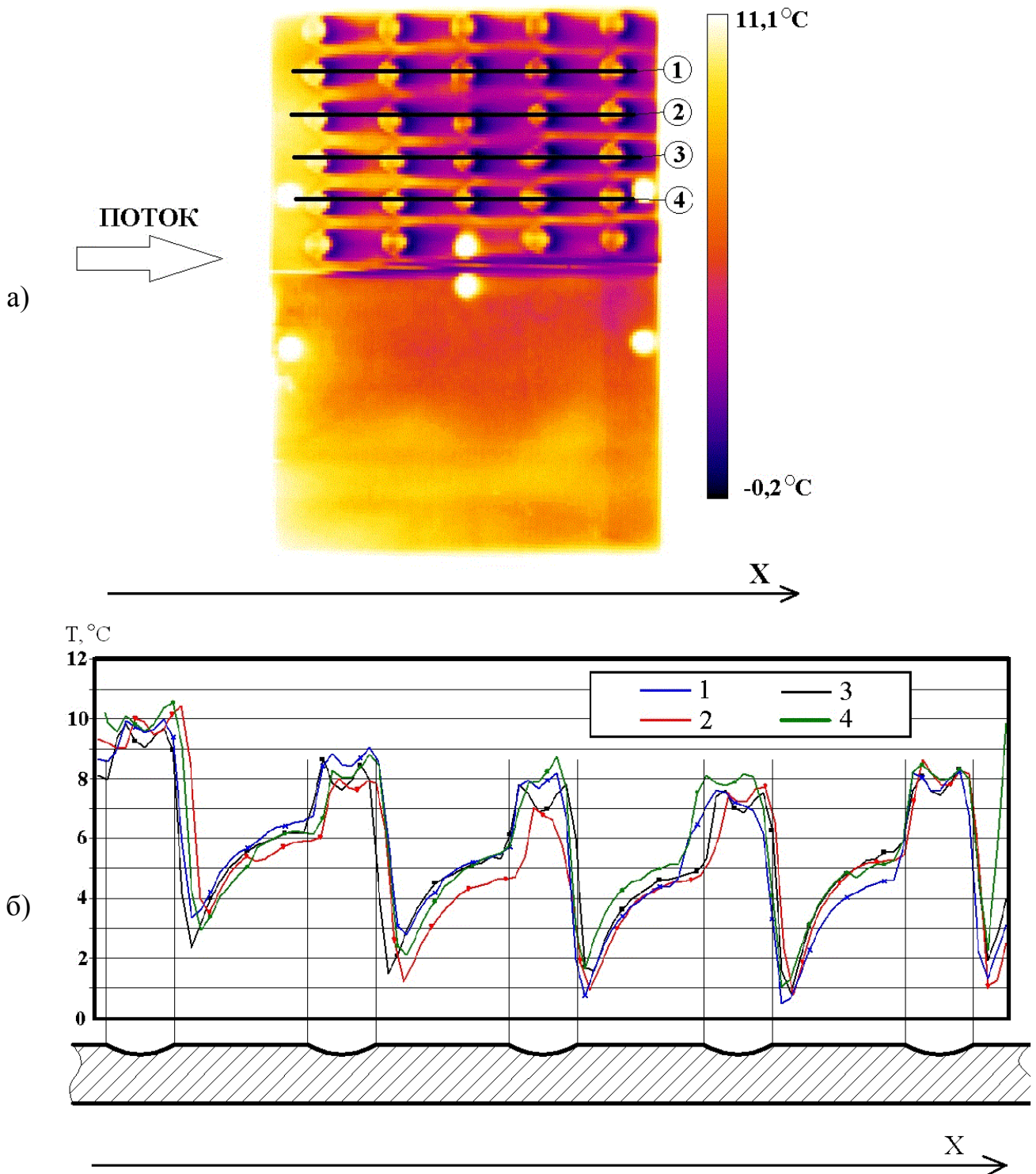
Сравнение полученных в ходе проведения тестовых экспериментов значений коэффициентов сопротивления (трения) и теплоотдачи с рассчитанными по общеизвестным зависимостям соответствующими значениями показало хорошее совпадение (в расчетах принималось, что турбулентный пограничный слой развивается от передней острой кромки ножа).

### **Результаты экспериментов.**

После проведения методических экспериментов с двумя гладкими пластинами, одна из них была заменена на рельефную и проведены экспериментальные исследования. На **рис. 10** представлено распределение температур по линиям, указанным на термограмме.

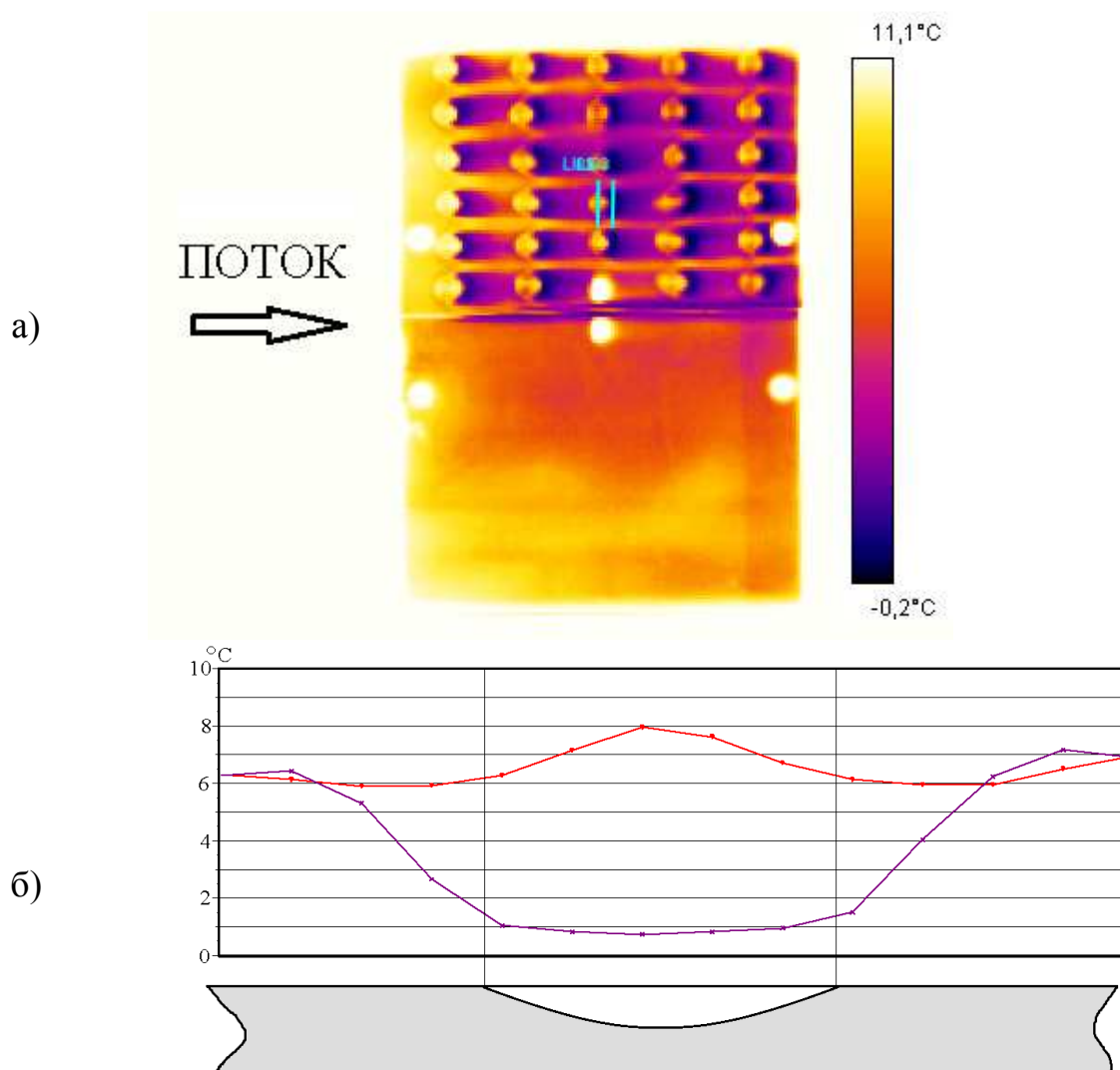
Из представленных данных видно, что наибольшее снижение температуры происходит в области за лункой на расстоянии примерно равном половине диаметра – месте присоединения потока. В центре каждого углубления температура поверхности практически равна температуре гладкой поверхности (см. **рис. 11**).

Результаты измерения коэффициента сопротивления, теплоотдачи и восстановления температуры представлены в *таблице 2*.



**Рис. 10.** График распределение температур (б) по линиям на термограмме (а).





**Рис. 11.** Распределение температур по линиям с термограммы а) (красным цветом обозначено распределение температур вдоль линии по центру углубления, синим – вдоль линии за углублением).

*Таблица 2. Результаты экспериментов*

№ эксперимента	$\zeta/\zeta_0$	$\alpha/\alpha_0$	$r_{\text{л}}$	$r_{\text{гл}}$
1	-----*	1,19	0,88	0,91
2	1,69	1,2	0,88	0,91
3	1,65	1,17	0,88	0,90
4	1,68	1,2	0,88	0,90

\*-в первом эксперименте не удалось с достаточной точностью измерить сопротивление поверхностей, т.к. было повреждено несколько приемников давления в зазорах между исследуемой поверхностью и корпусом модели, в результате чего не был учтен перепад давлений в зазорах.

### **Заключение.**

Проведенные экспериментальные исследование влияния регулярного рельефа в виде полусферических лунок (отношение глубины к диаметру – 1:7) на параметры теплообмена и сопротивления при обтекании поверхности сверхзвуковым потоком. Интенсификация теплообмена составила порядка 20%, рост сопротивления составил порядка 70% (данные приведены относительно гладкой поверхности). Также на рельефной поверхности зафиксировано снижение коэффициента восстановления температуры (на 3% по сравнению с гладкой поверхностью). Распределение температуры на поверхности исследуемой рельефной пластины зафиксированное в ходе эксперимента показало, что наиболее интенсивное захлаживание происходит непосредственно за углублениями на расстоянии примерно равным половине диаметра углубления. При этом в центре углублений температура поверхности остается на уровне температуры гладкой поверхности. Данное распределение температур наблюдается для каждого углубления, вне зависимости от ряда.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. На основе изученного опыта наиболее удачных исследований и имеющегося современного оборудования создан уникальный экспериментальный стенд, позволяющий в одном эксперименте проводить измерения сопротивления и параметров теплообмена одновременно для двух исследуемых поверхностей (проводить сравнительный эксперимент).
2. Выполнены экспериментальные исследования сопротивления поверхностей с полусферическими углублениями, в результате которых обнаружено, что при определенных параметрах потока и геометрических параметрах углублений сопротивление рельефной поверхности может быть на уровне сопротивления гладкой поверхности. Аналогичные экспериментальные исследования сопротивления поверхностей с траншейными углублениями показали, что поверхности с данной формой углублений обладают большим (на 15-20%) сопротивлением, чем поверхности с полусферическими лунками той же глубины, во всем исследованном диапазоне чисел Рейнольдса.
3. Впервые проведены экспериментальные исследование влияния регулярного рельефа в виде полусферических лунок (отношение глубины к диаметру – 1:7) на параметры теплообмена и сопротивления при обтекании поверхности сверхзвуковым потоком (число Маха 2,8). Интенсификация теплообмена составила порядка 20%, рост сопротивления составил порядка 70% (данные приведены относительно гладкой поверхности). Также на рельефной поверхности зафиксировано снижение коэффициента восстановления температуры (на 3% по сравнению с гладкой поверхностью).
4. Распределение температуры на поверхности исследуемой рельефной пластины зафиксированное в ходе эксперимента показало, что наиболее интенсивное захлаживание происходит непосредственно за лунками на расстоянии примерно равным половине диаметра углубления. В центре углублений температура поверхности остается на уровне температуры гладкой поверхности.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих изданиях, в том числе из списка, рекомендованного ВАК:**

1. *А.А. Титов*. Экспериментальное исследование сопротивления и теплообмена на поверхности со сферическими углублениями в потоке сжимаемого газа // Известия РАН. Серия "Энергетика". 2010г. №6, с. 126-131.
2. Ю.А. Виноградов, А.Г. Здитовец, Н.В. Медвецкая, М.М. Стронгин, *А.А. Титов*. Экспериментальное исследование влияния вихреобразующего рельефа на сопротивление плоской поверхности // Тепловые процессы в технике. 2010.Т. 2. № 7. с.290-293.
3. Здитовец А.Г., *Титов А.А.* Влияние формы поверхности теплоизолированного стержня, омываемого сверхзвуковым потоком, на коэффициент восстановления температуры // Изв. РАН, Энергетика. 2007. №2 с. 111-117.
4. *A.A. Titov*, A.I. Leontiev, U.A. Vinogradov, A.G. Zditovets, M.M. Strongin. 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 (IHTC-14). August 8-13, 2010, Washington, DC, USA. (IHTC14-22585).
5. С.А. Бурцев, Ю.А. Виноградов, А.Г. Здитовец, М.М. Стронгин, *А.А. Титов* / Исследования влияния рельефа поверхности на коэффициент восстановления температуры // Труды 5-ой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-5). - М.: Изд-во МЭИ. 2010г. Т.2. с. 61-64.
6. Ю.А. Виноградов А.Г. Здитовец, Н.В. Медвецкая, М.М. Стронгин, *А.А. Титов* / Экспериментальное исследование влияния вихреобразующего рельефа на сопротивление плоской поверхности // Труды XVII Школы-семинара молодых ученых под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях" 25-29 мая 2009 г., г. Жуковский. В 2 томах. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. Том 2, с.41-44.
7. Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Егоров К.С., Стронгин М.М., *Титов А.А.* / Метод исследования влияния вихреобразующего рельефа на процессы теплообмена на противоположной поверхности в плоском канале // Труды XVI Школы-семинара молодых ученых под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках", 21-25 мая 2007г., Санкт-Петербург. В 2-х томах. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. Том 2, с. 388-390.
8. *А.А. Титов*. Экспериментальное исследование соотношения сопротивления и теплообмена на поверхностях с вихреобразующим рельефом // Труды конференции-конкурса молодых ученых./ Под ред. Академика РАН Г.Г. Черного и проф. В.А. Самсонова. - М.: Изд-во Московского университета, 2009. с. 219-225.
9. Ю.А. Виноградов, А.Г. Здитовец, М.М. Стронгин, *А.А. Титов*. / Экспериментальное исследование влияния поверхностных углублений на сопротивление и теплообмен при течении сжимаемого газа // Тезисы доклада на десятой международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики». – М.: МЦНМО, 2010.- 192 с. с. 34-35.

10. Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М., *Титов А.А.* / Результаты измерения теплообмена и сопротивления поверхности с углублениями в потоке сжимаемого газа // Тезисы докладов XVI школы – семинара под руководством академика РАН Г.Г.Черного – М.: Изд-во Московского университета, 2010. – с.26–27.
11. Ю.А. Виноградов, А.Г. Здитовец, М.М. Стронгин, *А.А. Титов.* / Экспериментальное исследование соотношения теплообмена и сопротивления на поверхностях с углублением // Тезисы доклада на девятой международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики». – М.: МЦНМО, 2009.- 192 с. с. 35-36.
12. Ю.А. Виноградов, А.Г. Здитовец, М.М. Стронгин, *А.А. Титов.* Экспериментальное исследование сопротивления вихреобразующего рельефа. Тезисы 7-ой международной школы – конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» - Украина, Издательство НПВК «ТРИАКОН» 2009.-148 с., с. 28-29.
13. Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М., *Титов А.А.* / Экспериментальное исследование влияния вихреобразующего рельефа на сопротивление плоской поверхности // Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения». - М.: Изд-во Московского университета, 2009. – с.43.
14. Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М., *Титов А.А.* / Экспериментальное исследование нарушения аналогии Рейнольдса на поверхностях с вихреобразующим рельефом // Тезисы докладов XV школы – семинара под руководством академика РАН Г.Г.Черного – М.: Изд-во Московского университета, 2007. – с.92–93.
15. Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М., *Титов А.А.* / Стенд для экспериментального исследования теплогидравлических характеристик теплообменных поверхностей // Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения». - М.: Изд-во МГУ. 2007. С. 49-50.

**Титов Александр Андреевич**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ УГЛУБЛЕНИЙ НА ТЕПЛООБМЕН И СОПРОТИВЛЕНИЕ В ПОТОКЕ СЖИМАЕМОГО ГАЗА**

Автореферат

Подписано к печати 08.05.09		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л. 1.25	Усл.-печ.л. 1.16
Тираж 100 экз.	Заказ №59	Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2