

# МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

*Випробувано метод візуалізації течії газового потоку на поверхні тіл різної форми. Запропонований метод дозволяє отримати фіксовані картини обтікання при довільному розташуванні досліджуваних моделей у просторі. Отримані картини течії знаходяться в задовільній відповідності з даними раніше проведених досліджень*

*Ключові слова: метод, візуалізація, течія, потік, вприскування, модель*

*Опробован метод визуализации течения газового потока на поверхности тел различной формы. Предложенный метод позволяет получить фиксированные картины обтекания при произвольном расположении исследуемых моделей в пространстве. Полученные картины течения находятся в удовлетворительном соответствии с данными ранее проведенных исследований*

*Ключевые слова: метод, визуализация, течение, поток, впрыск, модель*

*The method for the gas flow visualizing on the surface of bodies of different shapes was tested. The proposed method provides a fixed flow pattern at an arbitrary location of the investigated models in space. Obtained flow patterns are in good accordance with the earlier studies*

*Key words: method, visualization, flow, stream, injection, mode*

**А.И. Руденко**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра экономики и предпринимательства\*\*

Контактный тел.: (044) 454-97-87

E-mail: teram57@meta.ua

**А.М. Терех**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

Контактный тел.: (044) 454-97-87

E-mail: teram57@meta.ua

**А.В. Семеняко**

Ассистент\*

Контактный тел.: (044) 454-97-87

E-mail: infinitum@lan.com.ua

**А.П. Нищик**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

Контактный тел. (044) 406-80-92

E-mail: teram57@meta.ua

**А.В. Баранюк**

Кандидат технических наук, ассистент\*

Контактный тел. (044) 454-97-87

E-mail: teram57@meta.ua

\*Кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики\*\*

\*\*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

## Введение

Результаты изучения гидродинамической картины обтекания газовым потоком различных поверхностей нагрева (гладкие трубы различного профиля, ребристые, гофрированные поверхности и др.) и исследования распределения температурных полей в них, позволяют выявить закономерности среднего и локального теплообмена, что помогает создавать научно обоснованные методики расчета теплотехнических характеристик оборудования, в котором осуществляется конвективный тепло- и массоперенос. При

этом гидродинамическая картина обтекания является определяющим фактором для понимания сложных явлений, происходящих вокруг омываемой газовым потоком поверхности.

Следовательно, совместное изучение этих двух взаимозависимых процессов позволяет оптимизировать форму, размеры, взаимное расположение труб в пакете теплообменных поверхностей, что способствует снижению массы и габаритов оборудования, улучшению теплоаэродинамических характеристик и, следовательно, в конечном итоге, экономии топлива и материалов.

Визуализация как метод, основанный на наблюдении процессов обтекания тел, является одним из способов, позволяющих получить качественную, а в некоторых случаях и количественную информацию о картине течения.

В литературе [1-8] предложен ряд методов визуализации газового потока на поверхности различных тел, как простых в реализации, так и довольно сложных и дорогостоящих. Однако, по нашему мнению, они обладают некоторыми недостатками, которые не позволяют получить достоверные данные о происходящих процессах. Так, например, метод масляной или керосиновой плёнки с сажей в качестве наполнителя [1,5,6] не позволяет проводить визуализацию на наклонённых и вертикальных поверхностях. Метод тонких нитей [7,8] может быть использован только при визуализации крупномасштабных моделей. Кроме того, нити могут вносить некоторые искажения в распространение потока вдоль исследуемой поверхности.

Учитывая, что гидродинамическая картина обтекания поверхностей нагрева различными средами является одним из определяющих факторов для описания процессов тепло- и массообмена, актуальность проведения исследований по визуализации течения газового потока на теплообменных поверхностях не вызывает сомнений. Поэтому, в НТУУ «КПИ» разработан усовершенствованный способ визуализации течения газового потока, который позволяет проводить исследования течения при любом расположении поверхности в пространстве, а также для двух- и трёхмерных тел [9]. Предложенный способ является продолжением и развитием методов визуализации, использованных в исследованиях [5].

**1. Экспериментальная установка, модели и методика проведения визуализации течения**

Визуализация течения на поверхности тел различной формы проведена в аэродинамической трубе разомкнутого типа (рис. 1). Исследуемые модели 1 устанавливались в рабочем участке 3 круглого поперечного сечения внутренним диаметром 60 мм и длиной 250 мм и закреплялись в диаметрально расположенных отверстиях 2. Выходное сечение рабочего участка через фланец соединялось с диффузором 4, на выходе из которого устанавливалось измерительное сопло 5 диаметром 30 мм, спрофилированное по лемнискате. С другой стороны рабочий участок через фланцы присоединялся к участку впрыска саже-керосиновой взвеси 6, а тот в свою очередь – к выходному патрубку вентилятора 7 максимальной производительностью 0.05 м³/с, что позволяло достичь скорости потока в свободном сечении рабочего участка до 18 м/с. Расход воздуха через аэродинамическую трубу регулировался автотрансформатором путем изменения напряжения, подаваемого на двигатель вентилятора.

Для измерения скоростного напора в сопле совместно с трубкой Пито-Прандтля 8, имеющей диаметр «носика» 2.5 мм, использовался микроанометр ММН-240. Давление окружающего воздуха измерялось барометром-анероидом типа БАММ.

Температура воздуха на выходе из сопла измерялась лабораторным ртутным термометром 9 с ценой деления шкалы 0.1°С.

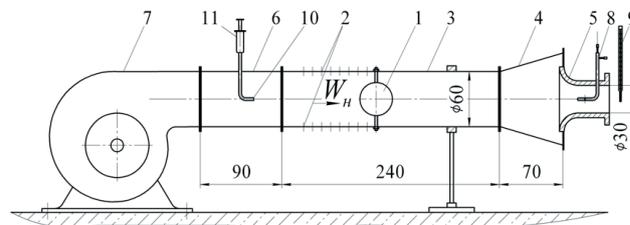


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
 1 - исследуемое тело; 2 - отверстия; 3 - рабочий участок;  
 4 - диффузор; 5 - сопло; 6 - участок впрыска;  
 7 - вентилятор; 8 - трубка Пито-Прандтля; 9 - термометр;  
 10 - насадок; 11 - дозирующее устройство

Для внесения в воздушный поток саже-керосиновой взвеси (1:8-1:10 по весу) на участке впрыска устанавливался распыляющий насадок 10, соединенный при помощи резинового шланга с дозирующим устройством 11. Диаметральный ряд отверстий в рабочем участке позволял приближать или удалять исследуемую поверхность для определения оптимального расстояния от места впрыска до объекта исследований при различных скоростях потока. В процессе проведения наладочных опытов выяснилось, что для получения качественной и четкой картины течения при скорости набегающего потока  $W_H = 5$  м/с, это расстояние составило 50-55 мм, а при скорости  $W_H = 10...15$  м/с - 100-110 мм.

Для проведения визуализации течения были выбраны шар, круговой цилиндр, цилиндр плоско-овального профиля и пластина с закрепленным на ней круговым цилиндром, геометрические размеры которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики моделей

№ п/п	Модель	d мм	d <sub>1</sub> мм	d <sub>2</sub> мм	h мм	a мм	b мм
1	Шар	38	-	-	-	-	-
2	Пластина с круговым цилиндром	10	-	-	15	30	60
3	Круговой цилиндр	28	-	-	30	-	-
4	Плоско-овальный цилиндр	-	15	42	35	-	-

Поверхность всех образцов, изготовленных из стали, была предварительно отшлифована, покрыта белой эмалью, а затем отполирована, что позволило обеспечить при проведении опытов свободное перемещение частичек сажи по поверхности тела вдоль линий тока.

После сборки всех элементов аэродинамической трубы и установки в рабочем участке исследуемого образца включался вентилятор и после достижения заданной скорости потока кратковременным впрыскиванием в поток вводилась саже-керосиновая взвесь. Такой способ введения окрашивающего вещества (взвеси) в воздушный поток позволяет обеспечить

перенос взвеси самим потоком и осадения ее на поверхности профиля в соответствии с закономерностями обтекания исследуемой поверхности. После впрыскивания объект продолжал обдуваться потоком некоторое время в зависимости от скорости воздуха до практически полного испарения керосина с поверхности тела, после чего исследуемую модель извлекали из рабочего участка и полученную зафиксированную картину обтекания фотографировали.

## 2. Результаты исследований, их анализ и сравнение

Визуализированные картины течения воздушного потока, сформировавшиеся при обтекании исследованных образцов представлены на рис. 2-7.

На рис. 2 представлена картина течения потока, обтекающего шар при скорости набегающего потока  $W_H = 10$  м/с ( $Re_d \approx 20000$ ), полученная по способу [9]. Область (1), которая начинается от лобовой точки и заканчивается вблизи экватора, представляет собой ламинарный пограничный слой, отрывающийся перед экватором (область 2). Оставаясь ламинарным на длине почти равной радиусу шара, далее по ходу потока пограничный слой становится неустойчивым и быстро превращается в турбулентный (3). Полученная картина хорошо коррелируется с приведенной в [2] визуализационной картиной обтекания шара при  $Re = 15000$ , полученной при помощи подсвеченного дыма (рис. 3).

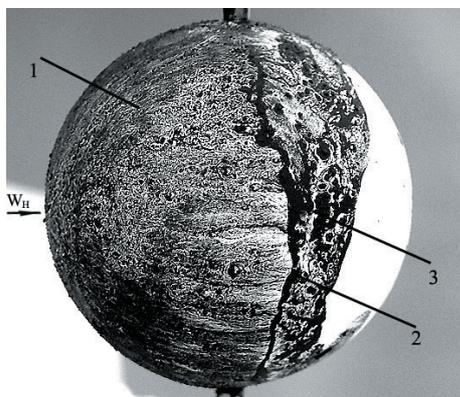


Рис. 2. Визуализационная картина обтекания шара при  $W_H = 10$  м/с

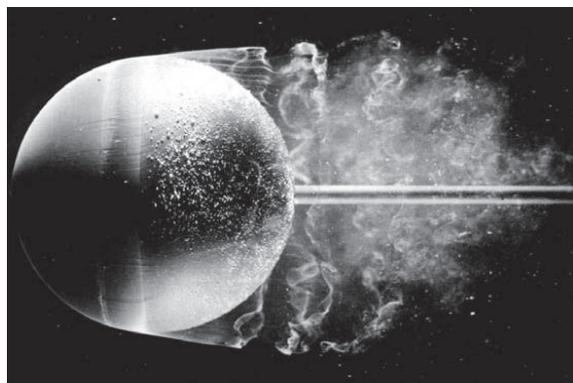


Рис. 3. Мгновенная картина потока при обтекании шара при  $Re = 15000$  [2]

Фотография, представленная на рис. 4 иллюстрирует возможности представленного способа визуализации течения газового потока [9] для модели сложной конфигурации - пластины с закрепленным на ней круговым цилиндром. На фотографии можно наблюдать, как пограничный слой претерпевает турбулентный отрыв. В области ниже по потоку перед цилиндром, оторвавшийся пограничный слой закручивается и образует вихревую систему перед цилиндром, установленным на пластине. Концы этой вихревой системы загibaются вниз и принимают характерную форму, названную подковообразным вихрем (рис. 5) [2, 10]. Такие вихри также образуются в местах соединения крыльев с фюзеляжем самолета, вокруг опор мостов. На фотографии прослеживается седловая точка первичного отрыва потока перед цилиндром (1). Седловая точка вторичного отрыва (2) также хорошо просматривается. Достаточно хорошо видна область и вихревые структуры отрыва пограничного слоя от поверхности цилиндра, которые происходят при углах  $82-84^\circ$  от лобовой точки цилиндра. Область (3) представляет собой кормовую вихревую рециркуляционную зону.

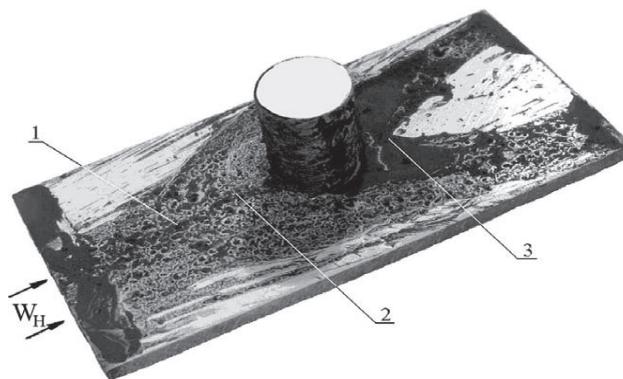


Рис. 4. Картина обтекания цилиндра, установленного на пластине при  $W_H = 10$  м/с ( $Re_d \approx 6000$ )

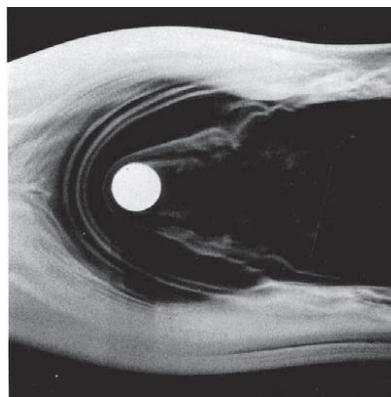


Рис. 5. Подковообразные вихри перед цилиндром в пограничном слое [2]

Полученная картина течения (рис. 4) находится в удовлетворительном соответствии с данными приведенными в [2], в которых визуализация подковообразных вихрей осуществлялась при помощи дымовой завесы, вводимой в пограничный слой выше по потоку при  $Re = 4000$ , при расчёте которого за

определяющий размер принимался диаметр цилиндра.

В случае прямого кругового цилиндра от лобовой точки до угла примерно 83-85 градусов (рис. 6) наблюдается область (1) развития псевдоламинарного пограничного слоя, который отрывается от цилиндра на линии (2) при угле 83-85°. Измерения угла отрыва хорошо коррелируются с данными, полученными Жукаускасом А.А. в [11]. Далее по ходу потока наблюдается зона присоединения (3), которая отображается укрупненными вихревыми структурами.

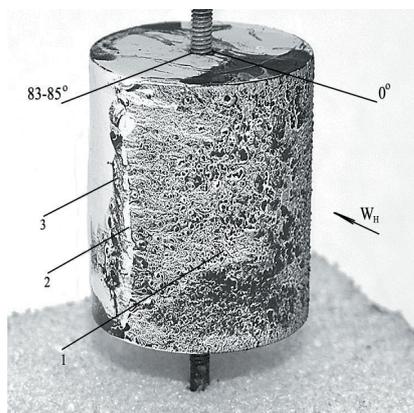


Рис. 6. Визуализация потока на поверхности прямого кругового цилиндра при  $Re_d = 20000$

На рис. 7. представлена картина обтекания цилиндра плоско-овального профиля, для которой в отличие от круглого цилиндра, характерно появление нескольких специфических зон, возникающих из-за обтекания сопряженных поверхностей различной формы (полукруг-плоскость-полукруг).

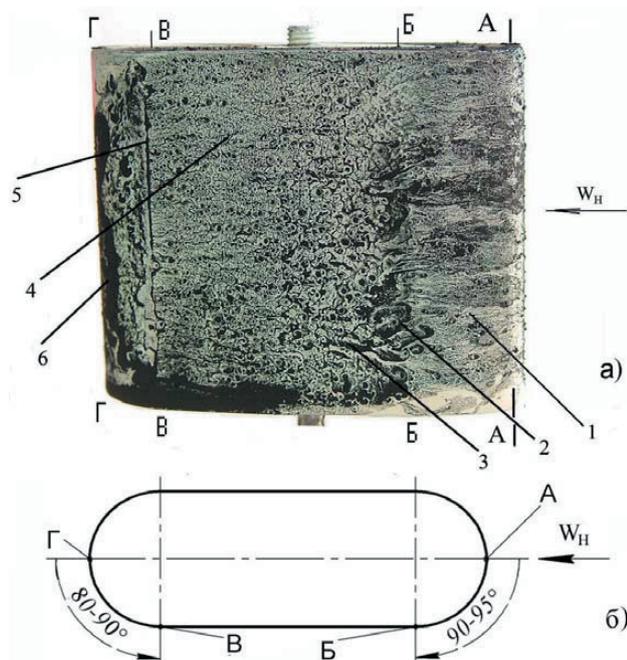


Рис. 7. Визуализация течения на поверхности плоско-овального цилиндра при  $Re_d = 15000$ : а - вид сбоку; б - вид сверху

Как следует из полученных данных, между линиями А-А и Б-Б формируется псевдоламинарный пограничный слой (1), подобный возникающему и на круговом цилиндре. Но отрыв этого слоя на цилиндре плоско-овального профиля происходит позже, затягиваясь до угла 90-95 0, т.е., практически в месте сопряжения круглой части трубы с плоской (линия Б-Б). Линия отрыва (2) явно выражена и представляет собой светлую тонкую линию с переходом на темную с образованием отрывного пузыря в виде темных пятен. Следующая по ходу потока зона присоединения (3) в которой происходит ламинарно-турбулентный переход, сопровождается довольно крупными вихревыми структурами. В области (4) до линии В-В наблюдается турбулентное течение в пограничном слое. По линии В-В, которая проходит практически по линии соединения плоской и криволинейной части трубы, происходит отрыв пограничного слоя (5) с образованием кормовой вихревой зоны, которая отображается участком (6).

**Выводы**

Анализ полученных результатов показал, что предлагаемый метод визуализации [9] позволяет осуществлять визуализацию течения газового потока на телах различной формы, а также при любом их расположении в пространстве. Полученные в экспериментах картины обтекания, находясь в удовлетворительном соответствии с данными других авторов. Предложенный метод визуализации, являющийся дальнейшим усовершенствованием метода [6], прост, надёжен, не требует больших капитальных затрат для его реализации и может быть использован в различных отраслях промышленности (авиационной, автомобильной и др.), а также при проведении научных исследований.

**Литература**

1. Чаплиц А.П. Визуализация газовых потоков во внутренних каналах (Методы и результаты экспериментальных исследований) [Текст]/ А.П. Чаплиц, А.И. Астапов. – Днепропетровск: НАН Украины и НКА Украины Институт технической механики, 2007. – 210 с.
2. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа [Текст]/ М. Ван-Дайк. – М.: Мир, 1986. – 184 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя [Текст]/ Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
4. Боровой В.Я. Течение газа и теплообмен в зонах взаимодействия ударных волн с пограничным слоем [Текст]/ В.Я. Боровой. – М.: Машиностроение, 1983. – 144 с.
5. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-орезанных труб [Текст]/ Е.Н. Письменный. – Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с.
6. Декларацийний патент на винахід № 64490А Україна, МПК G01P5/20 Визуалізації течії газового потоку [Текст]/ Є.М. Письменний, О.П. Ніщик, О.І Руденко, О.М. Терех, В.А. Рогачов, В.Д. Бурлей; заявник та володар деклараційного патенту на винахід НТУУ"КПІ" – 2003065389; заявл. 10.06.2003; опубл. 16.02.2004. Бюл. №2.

7. Чжен П. Управление отрывом потока [Текст]/ П. Чжен. – М.: Мир, 1979. – 552 с.
8. Пенкхерст Р., Холдер Д. Техника эксперимента в аэродинамических трубах [Текст]/ Р. Пенкхерст, Д. Холдер. – М.: Изд.иностр. лит., 1955. – 320 с.
9. Патент на корисну модель №54180 Україна, МПК G01P5/00. Спосіб візуалізації течії газового потоку [Текст]/ Є.М.Письменній, О.І Руденко, О.П. Ніщик, О.М. Терех, О.В. Семеняко; заявник та володар патенту на корисну модель НТУУ"КПІ" – u201006121; заявл. 20.05.2010; опубл. 25.10.2010. Бюл. №20.
10. Baker C.I. The turbulent horseshoe vortex [Текст]/C.I. Baker//Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1980. – V. 6. – N 1-2. – P. 9-23).
11. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках [Текст] / А.А. Жукаускас. – М.: Наука, 1982. – 472 с.

*Представлено результати експериментального дослідження термічного опору мініатюрних теплових труб з металловолокнуною капілярною структурою. Показано, що на величину термічного опору впливає велика кількість чинників. Одним з визначальних чинників є діаметр парового простору*

*Ключові слова: мініатюрна тепла труба, термічний опір, діаметр парового простору, кут нахилу*

*Представлены результаты экспериментального исследования термического сопротивления миниатюрных тепловых труб с металловолоконистой капиллярной структурой. Показано, что на величину термического сопротивления влияет большое количество факторов. Одним из определяющих факторов является диаметр парового пространства*

*Ключевые слова: миниатюрная тепловая труба, термическое сопротивление, диаметр парового пространства, угол наклона*

*The paper presents the results of an experimental study of thermal resistance of miniature heat pipes with metal-fibrous capillary structure. It is shown that the size of thermal resistance is influenced by a considerable quantity of factors. One of defining factors is a vapour space diameter*

*Keywords: miniature heat pipe, thermal resistance, vapour space diameter, angle of inclination*

УДК 536.248.2

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МИНИАТЮРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

**В. Ю. Кравец**

Кандидат технических наук, доцент\*  
Контактный тел.: (044) 454-96-03, 066-780-99-50  
E-mail: kravetz\_kpi@ukr.net

**Я. В. Некрашевич**

Инженер 3 категории\*  
Контактный тел.: 067-240-79-06  
E-mail: niav@i.ua

\*Кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

**А. П. Гончарова**

Инженер-конструктор компании «КиевЭнерго»  
пл. Франка, 5, г. Киев, Украина. 01001  
Контактный тел.: 066-741-22-79

## 1. Введение

Впервые упоминание о миниатюрных тепловых трубах (МТТ) было в работе Коттера [1], где он предложил использовать МТТ в качестве элементов систем охлаждения для микроэлектронной техники, указав на ряд существенных отличий в процессе теплопереноса по сравнению с тепловыми трубами большого диаметра.

Ввиду малого поперечного размера парового канала, условия передачи тепловой энергии в МТТ затруднены, поскольку скорость движения пара может достигать значений, соизмеримых со скоростью звука в данной среде. Это приводит к значительному росту коэффициента гидравлического сопротивления и снижению передаваемого теплового потока. Поэтому МТТ передают небольшие тепловые потоки [2,3].