

На правах рукописи



ЕРОНИН МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ

**ДОРОЖКА КАРМАНА ЗА ОБТЕКАЕМЫМ ТЕЛОМ
ВИХРЕВОГО РАСХОДОМЕРА В ВОЗМУЩЕННОМ
ПОТОКЕ**

01.02.05. – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2010

Работа выполнена в Исследовательском центре проблем энергетики Казанского научного центра РАН и Казанском государственном техническом университете им.А.Н.Туполева (КГТУ-КАИ).

Научный руководитель доктор технических наук,
Молочников Валерий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Фафурин Андрей Викторович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Хомяков Геннадий Дмитриевич

Ведущая организация Инженерный центр
«Энергопрогресс», г.Казань

Защита состоится « 15 » декабря 2010 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.02 при Казанском государственном техническом университете им.А.Н.Туполева по адресу: 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.

Электронный вариант автореферата размещен на сайте КГТУ им.А.Н.Туполева (www.kai.ru).

Автореферат разослан «_____» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



А.Г. Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из важнейших условий успешного развития ресурсодобывающих и ресурсопотребляющих секторов экономики в современных условиях является разработка и внедрение энергосберегающих технологий. В этой связи особое внимание необходимо уделять совершенствованию средств учета, как на стадии добычи энергоресурсов, так и в процессе их транспортировки, распределения и потребления: повышению их надежности, увеличению динамического диапазона измерений и снижению предела допустимой погрешности. При решении этих задач наряду с традиционными расходомерами переменного перепада давления все чаще успешно применяются сравнительно новые средства измерения расхода, обладающие более совершенными характеристиками. В первую очередь это относится к вихревым расходомерам с обтекаемым телом. Одним из основных требований, предъявляемых к средствам измерения расхода энергоносителей, является высокая точность измерений. Для выполнения этого условия необходимо учитывать влияние на работу расходомера ряда факторов, которые ранее не учитывались в полной мере, либо не принимались во внимание. К таким факторам относится, в частности, повышенная степень турбулентности измеряемого потока. Отличие этого параметра при получении градуировочной характеристики расходомера и в условиях эксплуатации может служить источником дополнительной погрешности измерения. Кроме того, в связи с ужесточением требований по учету количества извлекаемого из недр углеводородного сырья (ГОСТ Р 8.615-2005) возникает потребность измерения расхода попутного нефтяного газа, содержащего тяжелые углеводороды, которые могут отлагаться на деталях проточной части расходомеров. Вихревые расходомеры с обтекаемым телом, в составе которых отсутствуют движущиеся части, являются одним из наиболее перспективных средств измерения расхода в условиях низкой степени очистки газа.

Принцип действия вихревых расходомеров основан на эффекте формирования в потоке вязкого газа в следе за плохообтекаемым телом цепочки регулярных вихрей (дорожки Кармана). Чувствительный элемент преобразует энергию регулярных вихрей в выходной электрический частотный сигнал. Имеющиеся обширные данные о структуре потока и процессе вихреобразования за плохообтекаемыми телами относятся, главным образом, к поперечному круговому цилиндру в неограниченном потоке (*Жукаускас А.А., Чжен П., Швец И.Т., Швец А.И., Этик Э.Я., Дыбан Е.П., Шлихтинг Г. и др.*). Однако в вихревом расходомере поток ограничен, а плохообтекаемое тело имеет фиксированную линию отрыва потока (призма или цилиндр с фрезерованным по длине уступом). Закономерности формирования вихрей при обтекании таких тел ограниченным турбулизованным потоком или в условиях загрязнения (шероховатости) лобовой поверхности тела практически не изучены. Эффективность решения проблемы снижения погрешности измерения расхода вихревыми расходомерами с обтекаемым телом напрямую

зависит от того, насколько глубоко будет понятен механизм влияния вышеперечисленных факторов на процесс вихреобразования.

Таким образом, тема настоящего исследования, связанная с изучением процесса вихреобразования за плохообтекаемыми телами с фиксированной линией отрыва в ограниченных турбулизированных потоках и в условиях повышенной степени шероховатости лобовой поверхности тела, является на сегодняшний день актуальной задачей.

Цель работы: получение и обобщение экспериментальной информации о процессе вихреобразования за плохообтекаемым телом вихревого расходомера в ограниченном потоке при повышенной внешней турбулентности и в условиях турбулизации пограничного слоя на лобовой поверхности тела.

Задачи исследования:

– выполнить систематические экспериментальные исследования формирования дорожки Кармана за обтекаемым телом вихревого расходомера в турбулизированном ограниченном потоке;

– получить экспериментальную информацию о влиянии турбулизации пограничного слоя на лобовой поверхности обтекаемого тела вихревого расходомера на процесс вихреобразования;

– определить влияние формы поперечного сечения обтекаемого тела на процесс вихреобразования в условиях турбулизации пограничного слоя на поверхности тела;

– выполнить экспериментальные исследования структуры потока в ближнем следе за обтекаемым телом вихревого расходомера, выявить механизм влияния повышенной внешней турбулентности потока и турбулизации пограничного слоя на лобовой поверхности тела на формирование дорожки Кармана.

– получить экспериментальные данные о влиянии степени загромождения потока обтекаемым телом вихревого расходомера на нижний предел существования вихревой дорожки Кармана.

Научная новизна.

1. Получены новые фундаментальные результаты о влиянии турбулизующих факторов на вихревую дорожку Кармана за плохообтекаемыми телами с фиксированной линией отрыва в ограниченных потоках. Выявлено влияние повышенной степени турбулентности внешнего потока и степени шероховатости лобовой поверхности обтекаемого тела цилиндрической и призматической форм на частоту формирования вихрей Кармана.

2. Предложена физическая модель и выявлен механизм влияния повышенной турбулентности потока и турбулизации пограничного слоя на лобовой поверхности плохообтекаемого тела с фиксированной линией отрыва на процесс формирования вихревой дорожки Кармана в ограниченном потоке.

3. Определено влияние степени загромождения потока обтекаемым телом с фиксированной линией отрыва потока на нижний предел вихреобразования.

Практическая значимость. Результаты исследований позволяют оценить дополнительную погрешность измерения расхода вихревым расходомером в случае повышенной степени турбулентности внешнего потока и загрязнения лобовой поверхности обтекаемого тела. Они могут быть использованы при учете попутного нефтяного газа вихревыми расходомерами с обтекаемым телом, а также при разработке методики выполнения измерений расхода газообразных энергоносителей и попутного нефтяного газа низкой степени очистки этим типом расходомеров.

Результаты работы использованы в отчетах по гранту Президента РФ (НШ-4334.2008.8), проекту № РНП.2.1.2.8702, контракту в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

Рекомендации по использованию результатов. Результаты рекомендуются к использованию при разработке вновь создаваемых вихревых расходомеров на фирмах-разработчиках (НПП ИРВИС, Взлет, Сибна, Метран и др.) и применения таких расходомеров на предприятиях нефтегазового комплекса (Сургутнефтегаз, Татнефть, Таттрансгаз и др.)

Автор защищает:

1. Результаты экспериментальных исследований процесса вихреобразования за обтекаемыми телами вихревого расходомера в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

2. Основные закономерности формирования дорожки Кармана за плохообтекаемыми телами с фиксированной линией отрыва в ограниченном потоке в условиях турбулизации пограничного слоя на лобовой поверхности тел.

3. Физический механизм влияния турбулизирующих факторов на частоту вихреобразования за обтекаемым телом вихревого расходомера.

4. Результаты исследования влияния степени загромождения потока обтекаемым телом вихревого расходомера на нижний предел формирования регулярных вихрей Кармана.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методик и аттестованных средств измерений физических параметров, согласованием экспериментальных результатов, полученных с помощью различных методов исследования, а также удовлетворительным согласием полученных данных с известными результатами других авторов.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно проведены все экспериментальные исследования. Им обработаны, проанализированы и обобщены данные экспериментов. Все выносимые на защиту результаты получены лично соискателем.

Апробация работы. Основные материалы и результаты исследований докладывались и обсуждались XVII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблемы

газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях» 25-29 мая 2009 г. г. Жуковский, Россия, IX и X Международной Школе-семинаре «Модели и методы аэромеханики», г. Евпатория, 2009 и 2010 гг., VI и VII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов акад. В.Е.Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Казань, сентябрь 2009 и 2010 гг., Пятой Российской национальной конференции по теплообмену, г. Москва, 2010 г., на итоговых научных конференциях Казанского научного центра РАН (за 2008, 2009 гг.), на аспирантских семинарах Исследовательского центра проблем энергетики КазНЦ РАН в 2008, 2009 и 2010 гг..

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 1 – в журнале, рекомендованном ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников, включающего ___ наименование. Объем диссертации насчитывает ___ страницы машинописного текста, включая ___ рисунков и ___ таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, отмечены ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи работы, перечислены основные научные результаты, которые выносятся на защиту, показан личный вклад соискателя.

В первой главе рассматривается проблема измерения расхода вихревым расходомером с обтекаемым телом в условиях действия возмущающих факторов. Детально анализируется процесс вихреобразования за плохообтекаемым телом. Констатируется, что на сегодняшний день наиболее полно изучен процесс поперечного обтекания кругового цилиндра невозмущенным безграничным внешним потоком (*Карман Т., Жукаускас А.А., Чжен П., Швец И.Т., Швец А.И., Шлихтинг Г., Рошко А., Morgan V., и др.*) и ограниченным турбулизированным потоком (*Жукаускас А.А., Дыбан Е.П., Эник Э.Я. Козлова Л.Г., Giedt W., Sunder B. И др.*). Рассматриваются вопросы поперечного обтекания цилиндра и пластины в условиях ограниченного потока с неравномерным профилем скорости (*Woo H., Germark J., Mottran R.C., Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М. и др.*), а также при наличии наложенной нестационарности (*Михеев Н.И., Кратиров Д.В., Давлетшин И.А., Peters M.C.A.M., van Bokhorst E., Limpens C.H.L. и др.*). Отмечается отличие экспериментальных данных различных авторов о влиянии внешней турбулентности на частоту формирования вихрей Кармана за поперечно обтекаемым гладким цилиндром (*Дыбан Е.П., Эник Э.Я., Al-Asmi K., Castro I.P.*), что, возможно, вызвано малой степенью этого влияния в исследуемых условиях и различным уровнем метрологического обеспечения экспериментов. Приведенная в литературе экспериментальная информация о влиянии турбулизирующих факторов на поперечное обтекание тел с фиксированной

линией отрыва потока разрозненна и не носит систематического характера (Zhou Y., Li H., Koide M., Takanashi T., Shirakashi M.). Детальные исследования влияния шероховатости лобовой поверхности плохообтекаемых тел с фиксированной линией отрыва в ограниченном потоке на формирование дорожки Кармана практически не проводились. Кроме того, указывается на недостаточность сведений о влиянии загромождения канала обтекаемым телом на нижний предел существования регулярной вихревой дорожки и частоту вихреобразования за телами с фиксированной линией отрыва потока.

На основании выполненного обзора сформулированы проблемы, связанные с изучением процессов вихреобразования за обтекаемыми телами с фиксированной линией отрыва в ограниченном потоке при наличии турбулизирующих факторов, определены цель и задачи исследования.

Во второй главе приводится описание экспериментального оборудования, на котором проводились исследования, представлены данные об объектах исследования, средствах измерения, описывается методика выполнения измерений.

Эксперименты проводились на установке поверочной газодинамической УПГ-10, сертифицированной Госстандартом РФ (рис.1) и обеспечивающей поддержание заданного объемного расхода с погрешностью, не превышающей $\pm 0,3\%$. Основными элементами установки являются экспериментальный участок, набор критических сопел 1, установленных на герметичном фланце 2 ресивера 3, набор контрольно-измерительных приборов (КИП) и вспомогательного оборудования 4, компрессор 5, работающий на всасывание, соединительная магистраль 6. В зависимости от вида выполняемых исследований использовался один из семи экспериментальных участков, в состав которых могли входить вихревой расходомер ИРВИС-РС4 с диаметром условного прохода $D_y = 50$ или 150 мм, генераторы турбулентности, координатное устройство с однопиточным датчиком для измерения скорости потока, работа которого поддерживалась термоанемометрической аппаратурой DISA 55M. Обтекаемое тело вихревого расходомера в зависимости от этапа

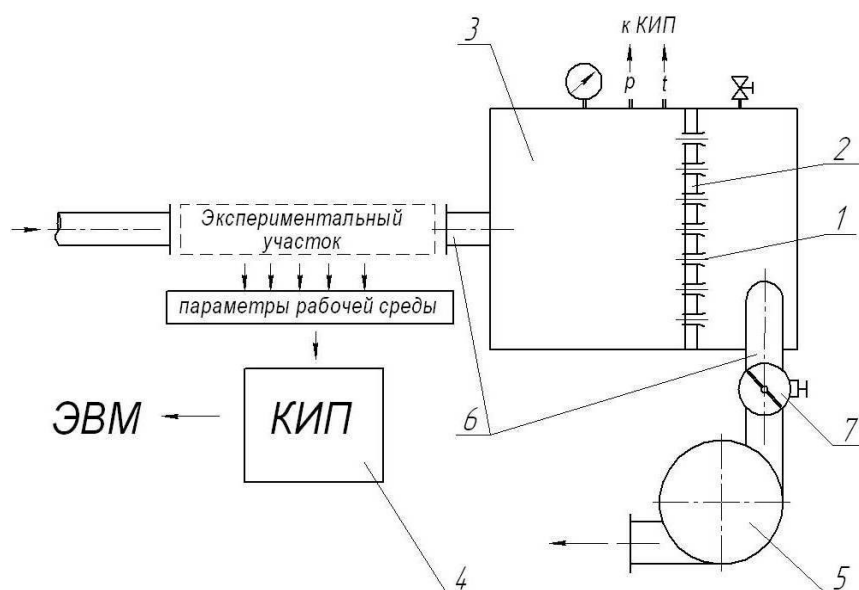


Рис.1. Схема экспериментальной установки

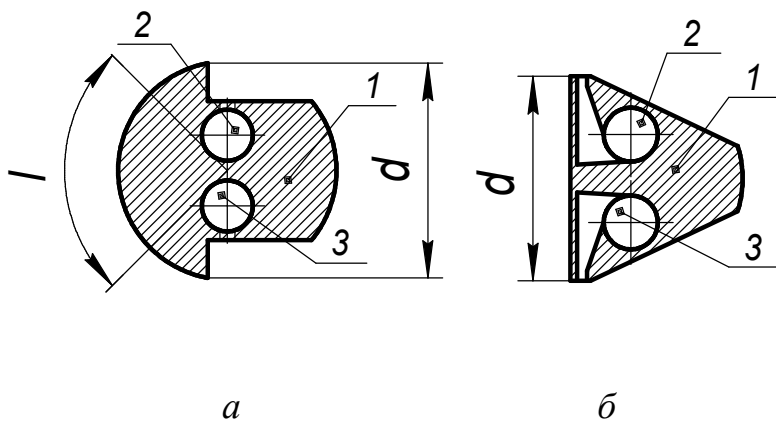


Рис.2. Форма поперечного сечения обтекаемого тела вихревого расходомера: 1 – тело; 2, 3 – каналы перетока



Рис.3. Вид загрязненной лобовой поверхности обтекаемого тела вихревого расходомера

исследований представляло собой либо поперечно обтекаемый цилиндр с фиксированной линией отрыва потока в виде кромки уступа, выполненного (фрезерованного) по всей длине цилиндра (рис.2,а), либо призматическое тело с плоской лобовой поверхностью (рис.2,б). Характерные поперечные размеры тел d составляли 14,3 мм для $D_y = 50$ и 35 мм для $D_y = 150$ мм ($d/D_y = 0,29$ и $0,23$ соответственно). При исследовании влияния турбулизации пограничного слоя на лобовой поверхности тела на ее центральную часть (зона l на рис.2, а) или на всю лобовую поверхность наносилась искусственная шероховатость. Шероховатость моделировала загрязненность этой поверхности, которая в условиях эксплуатации расходомера занимает область $l/d=0,2...0,25$ в центральной части лобовой поверхности тела и соответствует максимальной высоте бугорков $R_{\max} = 0,1...0,3$ мм (рис.3). В экспериментах использовалась и заведомо большая (по сравнению с условиями эксплуатации) степень шероховатости, которой в первом варианте соответствовала $R_{\max} \approx 0,85$ мм, во втором – $R_{\max} \approx 0,5$ мм, а в третьем – $R_{\max} \approx 0,25$ мм.

Частота вихреобразования за телом в значительной части проводимых экспериментов определялась по сигналу детектора вихрей расходомера (нити термоанемометра, расположенной в канале перетока самого тела), таким образом, объект исследований одновременно являлся и средством измерения. Такой подход позволил обеспечить погрешность определения частоты вихреобразования не более 1% в исследуемом диапазоне изменения расхода (чисел Рейнольдса): $Q = 12,3...259$ нм³/ч, $Re_D = U_0 D_y / \nu = 4,8 \times 10^3 ... 1,03 \times 10^5$ ($Re_d = U_1 d / \nu = 2,1 \times 10^3 ... 4,5 \times 10^4$) – для $D_y = 50$ мм и $Q = 61,6...2854$ нм³/ч, $Re_D = 10^4 ... 4,6 \times 10^5$ ($Re_d = 2,7 \times 10^4 ... 1,26 \times 10^5$) – для $D_y = 150$ мм. Здесь U_0 – среднерасходная скорость потока в канале, U_1 – среднерасходная скорость потока в зазоре между обтекаемым телом и стенками канала; d – поперечный размер обтекаемого тела расходомера; ν – кинематическая вязкость воздуха. Варьирование уровнем турбулентности набегающего потока проводилось при помощи перфорированной пластины или флажкового генератора турбулентности.

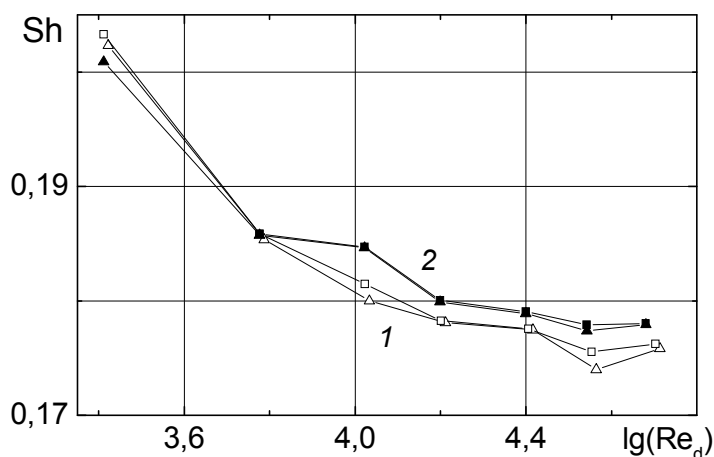


Рис.4. Зависимость частоты вихреобразования за обтекаемым телом цилиндрической формы с фиксированной линией отрыва потока от числа Рейнольдса: 1 – $Tu = 2,2...4\%$; 2 – $8...11,2\%$.

Степень турбулентности изменялась в диапазоне от $2,2...4\%$ до $8...11,2\%$. Представлены данные о профилях скорости и интенсивности ее турбулентных пульсаций перед обтекаемым телом расходомера в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса при использовании различных генераторов турбулентности.

Установлено, что увеличение степени турбулентности потока в исследуемом диапазоне приводит к росту частоты вихреобразования за телом. Смещение градуировочной характеристики в сторону более высоких значений Sh при $Re_d > 5 \times 10^3$ составляет $1,5...2\%$ (рис.4). Полученный результат объясняется усилением массообмена между отрывной областью и внешним потоком, в результате чего изменяются параметры, определяющие частоту вихреобразования за обтекаемым телом: уменьшается поперечный размер отрывной области (следа) и скорость на ее внешней границе.

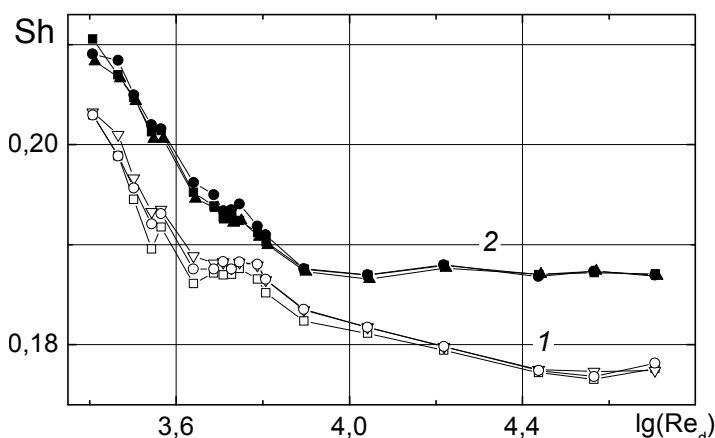


Рис.5. Зависимость частоты вихреобразования за обтекаемым телом цилиндрической формы: 1 – гладкая лобовая поверхность; 2 – лобовая поверхность с песочной шероховатостью

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования процесса вихреобразования за поперечно обтекаемым цилиндром с фиксированной линией отрыва ($d = 14,3$ мм) в составе вихревого расходомера при варьировании уровня внешней турбулентности. Эксперименты проводились в развитом турбулентном трубном течении и при близком к равномерному профилю скорости набегающего потока.

Четвертая глава включает результаты исследования влияния искусственно созданной шероховатости лобовой поверхности тела на частоту формирования регулярных вихрей за обтекаемыми телами с фиксированной линией отрыва потока цилиндрической ($d = 14,3$ и 35 мм) и призматической форм ($d = 14,3$ мм). Установлено, что в случае цилиндрического обтекаемого тела ($d = 14,3$ мм) песочная шероховатость лобовой поверхности вызывает существенное

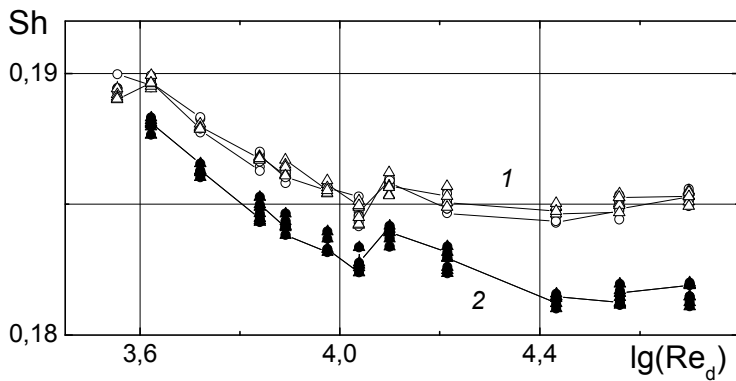


Рис .6. Зависимость частоты вихреобразования за обтекаемым телом призматической формы: 1 – гладкая лобовая поверхность; 2 – лобовая поверхность с песочной шероховатостью

увеличение частоты вихреобразования, достигающее 3...5% по сравнению с телом, имеющим гладкую лобовую поверхность (рис.5). Песочная шероховатость на лобовой поверхности призматического тела приводит к противоположному эффекту – частота вихреобразования снижается на 1,5...2% в основном диапазоне измерений (рис.6).

Предложена физическая модель, объясняющая полученные эффекты от воздействия рассматриваемых турбулизирующих факторов (повышенной турбулентности внешнего потока и степени шероховатости лобовой поверхности тела) на процесс вихреобразования за обтекаемым телом. Она основана на взаимосвязи поперечных размеров следа за телом и скорости на его внешней границе при поперечном обтекании тела ограниченным потоком. Зависимость частоты f срыва вихрей с обтекаемого тела от поперечных размеров следа d_1 за телом и скорости на его внешней границе U_1 может быть представлена в виде:

$$f = \text{Sh } U_1 / d_1, \quad (1)$$

Под влиянием турбулизирующих факторов происходит интенсификация массообмена между отрывной областью (следом) за телом и внешним потоком и, как следствие, уменьшение поперечных размеров следа. Одновременно увеличивается зазор между следом и ограничивающей поток поверхностью (стенками канала), что приводит к снижению скорости потока на внешней границе следа (рис.6).

Для обтекаемого тела расходомера, расположенного в канале круглого поперечного сечения диаметром D , скорость U_1 и размер следа d_1 можно связать между собой, используя условие равенства объемного расхода в канале перед обтекаемым телом и расхода в зазоре между границами следа и стенками канала:

$$U_1 = U_0 \frac{\pi D^2 / 4}{\frac{\pi D^2}{4} - \frac{D^2}{2} \left(\arcsin \frac{d_1}{D} + \frac{d_1}{D} \cos(\arcsin \frac{d_1}{D}) \right)} \quad (2)$$

Подставляя значение скорости U_1 в выражение (1), можно в явном виде получить зависимость частоты вихреобразования за обтекаемым телом от поперечного размера следа:

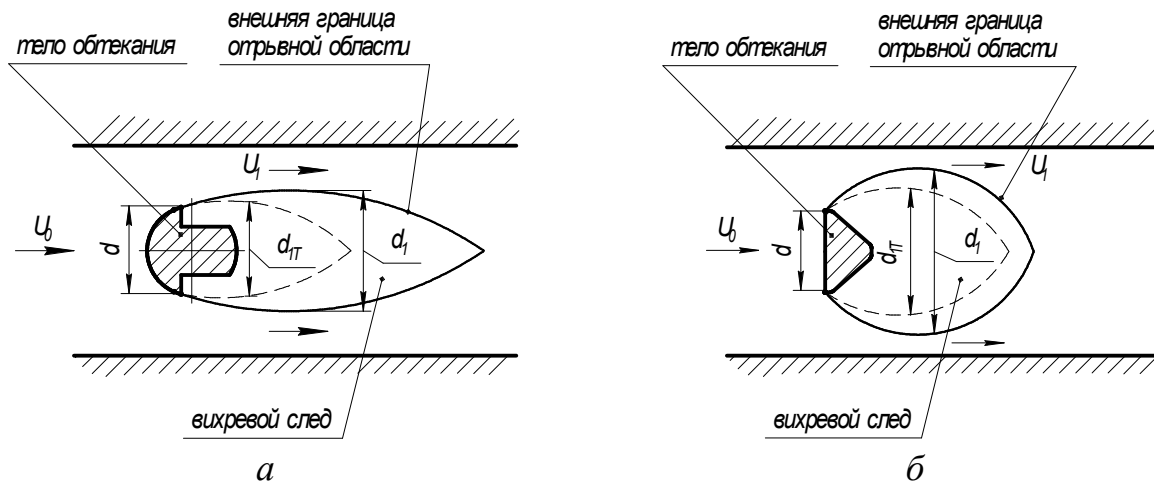


Рис.7. Влияние турбулизирующих факторов на размер следа за обтекаемым телом: *а* – цилиндрическое тело с фиксированной точкой отрыва потока; *б* – призматическое тело; d_{1T} – поперечный размер следа в турбулированном потоке

$$f = ShU_0 \left[\frac{\pi D^2 / 4}{\frac{\pi D^2}{4} - \frac{D^2}{2} \left(\arcsin \frac{d_1}{D} + \frac{d_1}{D} \cos \left(\arcsin \frac{d_1}{D} \right) \right)} \right] d_1 \quad (3)$$

Зависимость $f/f_1 = F(d_1/d)$, имеет экстремум (рис.8). Здесь f_1 – частота вихреобразования за телом при равенстве поперечных размеров следа и тела ($d_1 = d$). В случае цилиндрического тела размер следа d_1 , хотя и больше поперечного размера тела (рис.7,*а*), но находится слева от минимума функции $F(d_1/d)$. Уменьшение поперечного размера следа за счет воздействия турбулизирующих факторов приводит к росту частоты вихреобразования за телом, что и подтверждается в экспериментах (рис.4 и 5). При обтекании призмы поперечный размер следа d_1 существенно больше размера тела d (рис.7,*б*) и расположен справа от минимума функции $F(d_1/d)$. В этом случае уменьшение размера следа под влиянием турбулизирующих факторов

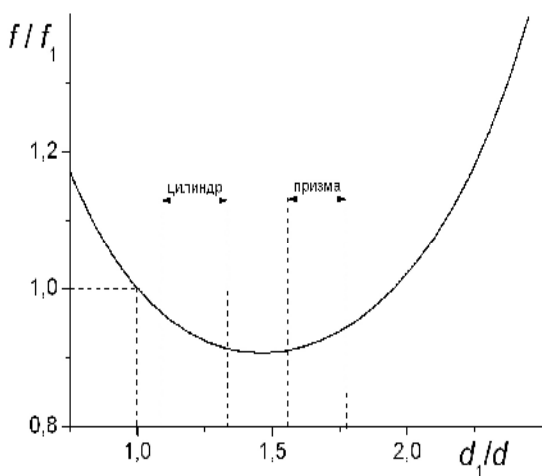


Рис.8. Зависимость частоты вихреобразования за обтекаемым телом в ограниченном потоке от поперечных размеров следа за телом

приводит к снижению частоты вихреобразования, что также соответствует полученным экспериментальным данным (рис.6). Более детальное исследование влияния турбулизации пограничного слоя на лобовой поверхности тела на частоту формирования вихрей Кармана было выполнено с использованием цилиндрического обтекаемого тела (рис.2,*а*) с поперечным размером $d=35$ мм в канале $D_y=150$ мм. В этих экспериментах варьировалась как степень шероховатости лобовой поверхности тела, так и размер участка лобовой

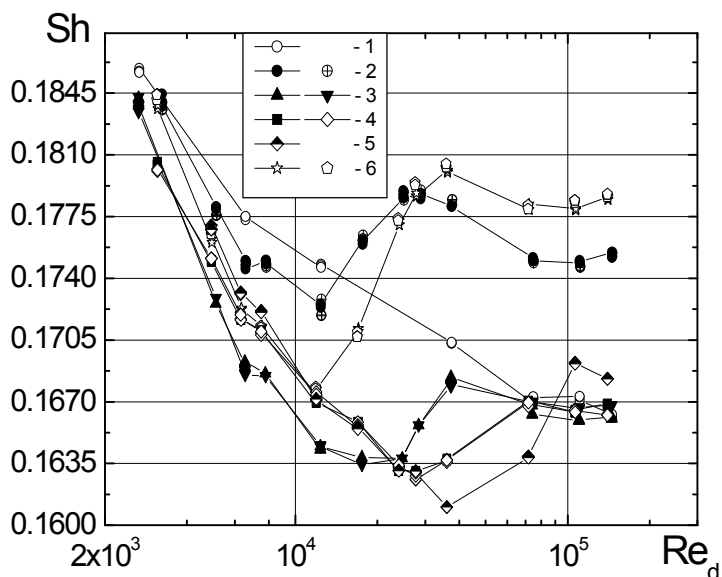


Рис.9. Градуировочные зависимости вихревого расходомера: 1 – тело с гладкой лобовой поверхностью; 2 – $R_{\max}=0,85$ мм; 3 – 0,5 мм; 4 – 0,25 мм; 5 – пленка (все – уступ); 6 – $R_{\max}=0,85$ мм (сглаженный уступ).

наклеенной на нее пленкой характерный размер тела d оставался неизменным.

Установлено, что шероховатость лобовой поверхности приводит к увеличению частоты вихреобразования за телом. В случае повышенной шероховатости *всей* лобовой поверхности тела существенный рост частоты вихреобразования начинается с некоторого числа Рейнольдса, значение которого уменьшается с увеличением степени шероховатости (рис.9). Наибольший прирост Sh (5...9%) наблюдается при $Re_d > 2 \times 10^4$ для $R_{\max} \approx 0,85$ мм. Уменьшение степени шероховатости до величины, соответствующей $R_{\max} \approx 0,5$ и 0,25 мм, приводит к росту значений Sh на 1,5...2% по сравнению с исходным вариантом при $3,5 \times 10^4 < Re_d < 8 \times 10^4$, а в области $Re_d > 8 \times 10^4$ величина Sh становится близкой соответствующим значениям для исходного варианта тела. Выявленные особенности связаны, по-видимому с ламинарно-турбулентным переходом в пограничном слое на лобовой поверхности тела, который, с одной стороны, находится под влиянием сильного отрицательного градиента давления, способствующего сохранению ламинарного режима течения, с другой – дестабилизирующего действия шероховатости поверхности.

Повышенная степень шероховатости ($R_{\max} \approx 0,85$ мм) *ограниченного участка* лобовой поверхности тела ($l/d = 0,28$ и 0,57) приводит к росту безразмерной частоты вихреобразования во всем исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса (рис.10). При $l/d = 0,57$ наибольший прирост Sh составил 2,5%, а при $l/d = 0,28$ – не более 1%. Полученный результат применительно к вихревым расходомерам с обтекаемым телом в форме цилиндра с фиксированной линией отрыва потока свидетельствует, что при области

поверхности l с повышенной степенью шероховатости (рис.2). Для исключения влияния толщины «подложки» наждачной бумаги, с помощью которой моделировалась шероховатость поверхности, полученные значения частоты формирования вихрей Кармана за телом с шероховатой лобовой поверхностью сопоставлялись с данными для тела с наклеенной на его лобовую поверхность гладкой пленкой, толщина которой соответствовала толщине «подложки» (исходный вариант). В случае тела с шероховатостью всей лобовой поверхности или с

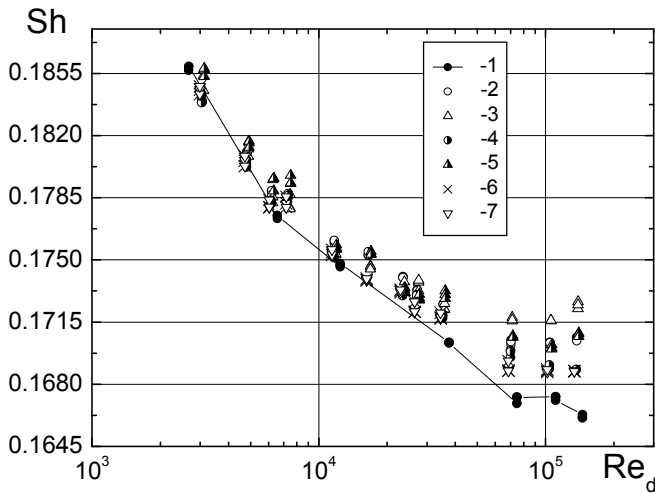


Рис.10. Градуировочные характеристики расходомера: 1 – обтекаемое тело с гладкой лобовой поверхностью; 2 – пленка ($l/d = 0,57$, сглаженный уступ); 3 – $R_{\max} = 0,85$ мм ($l/d = 0,57$, уступ); 4 – пленка ($l/d = 0,57$, сглаженный уступ); 5 – $R_{\max} = 0,85$ мм ($l/d = 0,57$, сглаженный уступ); 6 – $R_{\max} = 0,85$ мм ($l/d = 0,28$, уступ); 7 – $R_{\max} = 0,85$ мм ($l/d = 0,28$, сглаженный уступ).

потока, приводит к более значительным изменениям частоты вихреобразования (рис.9), чем в случае сглаживания этого уступа при ограниченном размере области шероховатости лобовой поверхности (рис.10).

Достоверность предложенного физического механизма влияния турбулизирующих факторов на процесс вихреобразования за обтекаемыми телами различной формы в ограниченном потоке подтверждается результатами измерения коэффициента сопротивления давления c_p цилиндрического и призматического обтекаемых тел с гладкой и шероховатой лобовой поверхностью (рис.11). Увеличение степени шероховатости цилиндрического тела приводит к росту значений c_p , а в случае призматического тела – к снижению этих значений.

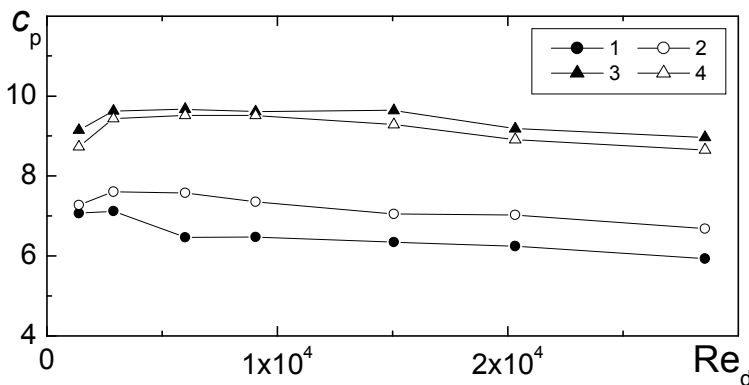


Рис.11. Зависимость сопротивления давления обтекаемого тела от числа Рейнольдса: 1 и 3 – тело с гладкой лобовой поверхностью; 2 и 4 – с шероховатой лобовой поверхностью. 1 и 2 – цилиндр, 3 и 4 – призма.

загрязнения лобовой поверхности не более 28% характерного размера тела следует ожидать появления дополнительной погрешности измерений, не превышающей 1%, т.е. не выходящей за пределы основной относительной погрешности измерения расхода вихревым расходомером.

Анализ результатов измерений, приведенных в четвертой главе, показал, что наибольшее влияние на частоту вихреобразования оказывают возмущения в окрестности точки отрыва пограничного слоя на лобовой поверхности обтекаемого тела. Сглаживание уступа, образованного наждачной бумагой или пленкой в окрестности точки отрыва

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований структуры потока в ближнем следе за цилиндрическим обтекаемым телом вихревого расходомера ($D_y = 150$ мм, $R_{\max} \approx 0,85$ мм) в условиях турбулизации потока на всей лобовой поверхности тела. Выполнены измерения профиля скорос-

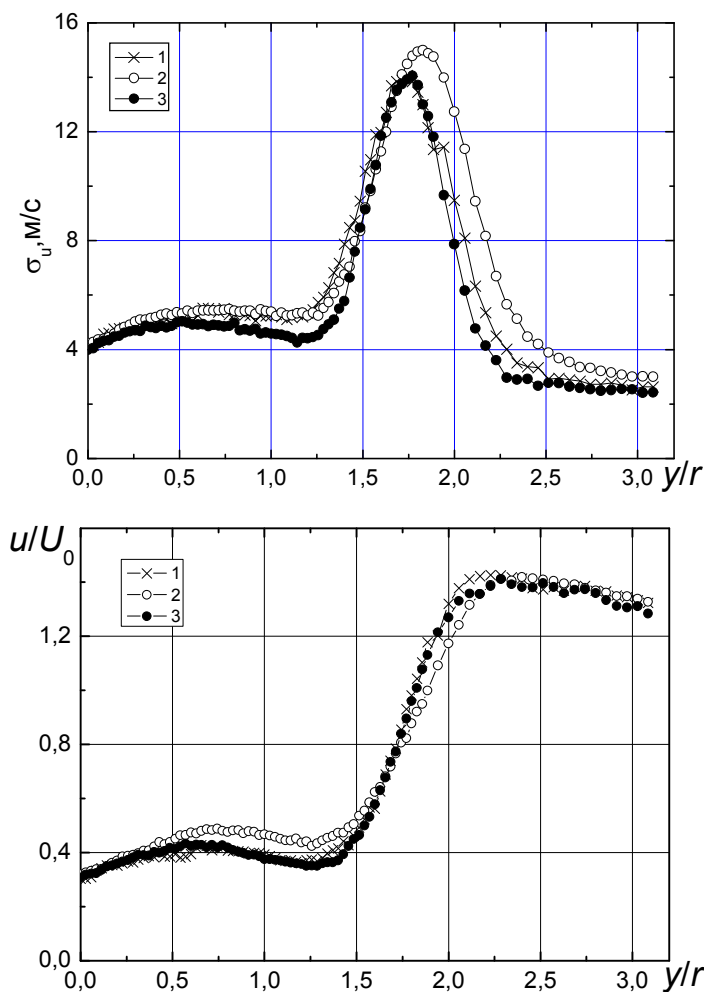


Рис.12. Профили: *а* – пульсаций скорости, *б* – скорости: 1 - тело с гладкой лобовой поверхностью, 2 - с пленкой, 3 – с шероховатой лобовой поверхностью.

влияния турбулизирующих факторов на процесс вихреобразования за обтекаемым телом с фиксированной линией отрыва в ограниченном потоке.

В главе 5 представлены также результаты исследования влияния загромождения потока обтекаемым телом на нижний предел существования регулярной вихревой дорожки в следе за телом. Эксперименты проводились в трубе $D_y = 50$ мм путем измерения мгновенной локальной скорости потока в следе за обтекаемым телом цилиндрической формы с фиксированной линией отрыва потока. Существование регулярной дорожки Кармана оценивалось по добротности спектра пульсаций скорости в окрестности границы следа (в области максимальных значений среднеквадратичных пульсаций скорости по радиусу трубы) на расстоянии 30 мм от оси тела.

Установлено, что при соотношении диаметров $d/D=0,16$ нижний предел вихреобразования соответствует $Re = 380$, а для $d/D=0,29$ – $Re = 1000$ (рис.13). Таким образом, снижение степени загромождения в 1,8 раза позволяет уменьшить нижний предел существования регулярной дорожки Кармана за телом в 2,6 раза.

ти и ее турбулентных пульсаций в трех поперечных сечениях ближнего следа на расстояниях $x/d = 0,71; 1,43$ и $2,1$ вниз по потоку от оси тела *а* при трех значениях числа Рейнольдса: $Re_d = 8,34 \times 10^4$, $2,78 \times 10^4$ и $0,921 \times 10^4$.

Установлено, что в условиях турбулизации пограничного слоя на поверхности тела поперечный размер следа и значения скорости на его внешней границе (в зазоре между следом и телом) уменьшаются во всем исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса (рис.12).

б Поперечный размер следа оценивался по положению максимума среднеквадратичных пульсаций скорости потока в следе за телом по радиусу трубы. Полученные данные подтверждают обоснованность предложенной в главе 4 физической модели

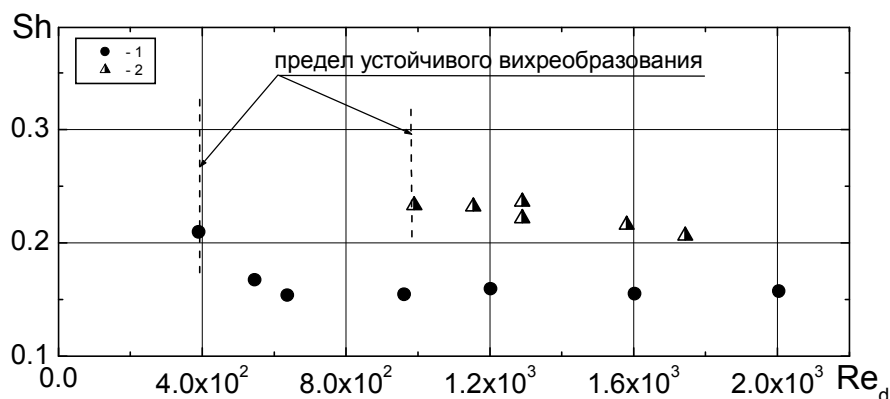


Рис.13. Зависимость предела устойчивого вихреобразования за цилиндрическим обтекаемым телом от числа Рейнольдса и степени загромождения: 1 – $d/D=0,16$, 2 – $d/D=0,29$.

В заключении сформулированы основные выводы:

1. Установлено, что в ограниченном потоке при увеличении внешней турбулентности и в условиях турбулизации пограничного слоя на лобовой поверхности обтекаемого тела вихревого расходомера частота вихреобразования за телом цилиндрической формы с фиксированной линией отрыва потока возрастает, а за телом призматической формы – снижается.

2. Увеличение частоты срыва вихрей с цилиндрического тела вихревого расходомера при возрастании степени турбулентности набегающего потока от 2.2...4% до 8...11.2% достигает, в зависимости от числа Рейнольдса, 1.5...2%, а в случае нанесения на лобовую поверхность тела песочной шероховатости – 3...9%. Снижение частоты срыва вихрей с обтекаемого тела призматической формы с шероховатой лобовой поверхностью составляет 1.5...2% и также зависит от числа Рейнольдса.

3. Предложена физическая модель влияния турбулизирующих факторов на частоту вихреобразования за обтекаемым телом вихревого расходомера, основанная на взаимосвязи поперечных размеров следа за телом и скорости на его внешней границе при поперечном обтекании тела ограниченным потоком. Достоверность модели подтверждена независимыми измерениями коэффициента сопротивления давления тел и результатами исследования структуры течения в ближнем следе за телом в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

4. Выявлено влияние степени шероховатости лобовой поверхности тела и размеров участка повышенной шероховатости на частоту вихреобразования за обтекаемым телом вихревого расходомера. Показано, что при типичном для условий эксплуатации расходомера загрязнении только центральной части лобовой поверхности обтекаемого тела и относительной доле загрязненного участка 28%, увеличение частоты вихреобразования не превышает 1%. Это дает основание рекомендовать вихревые расходомеры с обтекаемым телом в качестве средства измерения расхода газа низкой степени очистки.

5. Определено влияние степени загромождения поперечного сечения расходомера обтекаемым телом на нижний предел существования регулярной вихревой дорожки Кармана. Установлено, что снижение отношения диаметров тела и измерительного участка с 0,29 до 0,16 позволяет уменьшить число Рейнольдса, соответствующее нижнему пределу вихреобразования за телом в 2,6 раза.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертации:

1. *Еронин М.В.* Вихри Кармана за плохообтекаемым телом в ограниченном турбулизированном потоке и при турбулизации пограничного слоя на теле / О.В.Дунай, М.В.Еронин, Д.В.Кратиров, Н.И.Михеев, В.М.Молочников // Изв. РАН. МЖГ. 2010.– №4. С.97-106..

Работы, опубликованные в других изданиях:

2. *Еронин М.В.* Термоанемометрия и визуализация потока в канале с элементами дискретной шероховатости на ламинарном и переходном режимах течения // Паерелий А.А., Занько Ф.С., Еронин М.В.// Сборник материалов XVII Международной Школы-семинара «Модели и методы аэродинамики» Евпатория, 4 - 13 июня 2008 г. М.:МЦНМО. 2008 С.112-113.
3. *Еронин М.В.* Измерение расхода вихревым расходомером при повышенной степени турбулентности потока / Еронин М.В., Фасхутдинов Р.Э., Кратиров Д.В., Франов А.Н. // Сборник материалов VI Школы-семинара молодых ученых и специалистов акад. В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Казань, 16 - 18 сентября 2008 г. С.133-136.
4. *Еронин М.В.* Снижение влияния неравномерности и неизотермичности потока при измерении расхода текучих сред / Фасхутдинов Р.Э., Еронин М.В., Михеев Н.И. // Материалы VI Школы-семинара молодых ученых и специалистов акад. В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Казань, 16 - 18 сентября 2008 г. С.149-152.
5. *Еронин М.В.* Влияние параметров набегающего потока на формирование регулярных вихрей за плохообтекаемым телом в ограниченном потоке / Еронин М.В., Фасхутдинов Р.Э., Кратиров Д.В. // Материалы Девятой Международной Школы-семинара «Модели и методы аэродинамики» Евпатория, 4 - 13 июня 2009 г. М.:МЦНМО. 2009 С.78-80
6. *Еронин М.В.* Измерение расхода теплоносителей вихревым расходомером при повышенной степени турбулентности потока / Еронин М.В., Фасхутдинов Р.Э., Молочников В.М., Михеев Н.И., Кратиров Д.В.// Материалы XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях» Жуковский, 25-29 мая 2009. С.82-85.
7. *Еронин М.В.* Процесс вихреобразования за плохообтекаемыми телами при турбулизации пограничного слоя на их лобовой поверхности/ М.В.Еронин, В.М.Молочников, Д.В. Кратиров // Материалы Десятой Международной Школы-семинара «Модели и методы аэродинамики» Евпатория, 3 - 12 июня 2010 г. М.:МЦНМО. 2010 С.67-68
8. *Еронин М.В.* Вихри Кармана при турбулизации пограничного слоя на плохообтекаемом теле / Кратиров Д.В., Молочников В.М., Дунай О.В. // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену в 8 томах. Т. 2.- М. Издательский дом МЭИ, 2010. С.118-122.