

На правах рукописи



ЯКИМОВА Оксана Анатольевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ
В КАНАЛАХ СО ВСТАВКАМИ И В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ
ВРАЩАЮЩИМСЯ ЦИЛИНДРАМИ ПРИ МАЛЫХ
ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2011

Работа выполнена в Тюменском филиале Института теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор **Зубков Павел Тихонович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Вакулин Александр Анатольевич

доктор физико-математических наук,
профессор **Баянов Шльмир Масуилович**

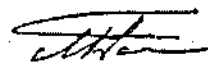
Ведущая организация: ГОУ ВПО Пермский государственный
университет

Защита диссертации состоится « 15 » сентября 2011 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 при Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан « _____ » августа 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук, доцент



Мусакаев Н.Г.

2011А
15255

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

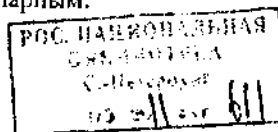
Актуальность работы

Исследованы важные классы течений, встречающихся в прикладных задачах, – течения в каналах со вставками и в зазоре между вращающимися цилиндрами. Теоретически показана возможность измерения расхода жидкости в канале путем помещения тепловыделяющей вставки в центр потока по значению температуры лишь в одной точке в канале либо на нагревательном элементе. Предлагаемый метод позволяет работать в условиях, в которых другие методы оказываются неприменимы. Также найдено и исследовано стационарное решение уравнений движения вязкой жидкости, при котором за плохообтекаемым телом существует обособленная турбулентная область, в то время как основной поток является ламинарным. Показано, что при этом интегральные характеристики потока, такие как суммарное трение и перепад давления на участке трубы, отличаются от тех же характеристик для ламинарного и турбулентного течения. Исследовано течение в зазоре между вращающимися цилиндрами, которое часто встречается во вращающихся частях механизмов.

Цель работы

Изучить возможность определения расхода жидкости в трубе путем измерения температуры в точках потока или на нагревательном элементе, расположенном на оси трубы. Показать, что достаточно измерения температуры лишь в одной точке жидкости либо на нагревательном элементе, чтобы определить расход жидкости в канале.

Исследовать течение в канале со вставкой. Показать, что существует решение системы уравнений движения вязкой жидкости, в рамках которого за плохообтекаемым телом существует обособленная турбулентная область, в то время как основной поток остается ламинарным.



Исследовать тепловыделение в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами за счет вязкой диссипации при вращении внутреннего цилиндра со скоростью 3000 об/мин и 6000 об/мин. Исследовать течение в зазоре при одномерной и двумерной постановках задачи при различных угловых частотах вращения.

Научная новизна

- Численно исследована зависимость температуры в нескольких выбранных точках в потоке и на нагревательном элементе, расположенном в центре трубы, от числа Рейнольдса. Получено, что, используя результаты работы, для каждой из выбранных точек можно построить обратную зависимость числа Рейнольдса от температуры и тем самым определять расход жидкости, измеряя температуру лишь в одной точке жидкости либо на нагревательном элементе. Предлагаемый метод позволяет работать в условиях, в которых другие методы оказываются неприменимы.

- Изучено влияние вставки на изменение режимов течения жидкости в канале при различных числах Рейнольдса в диапазоне значений $Re=800 - Re=1700$. Установлено, что уравнения движения вязкой жидкости допускают решения, соответствующие полностью ламинарному течению, полностью турбулентному течению, а также течению, при котором за вставкой существует обособленная турбулентная область, в то время как основной поток остается ламинарным.

- Исследовано течение жидкости в узком зазоре между неподвижным и вращающимся цилиндрами. Показано, что рассмотренная модель турбулентности позволяет получить только ламинарное установившееся решение в случае 3000 об/мин и 6000 об/мин. При 12000 об/мин численно обнаружены оба режима течения – ламинарный и турбулентный. При этом ламинарный режим колебательный. Значения осредненной вязкой диссипации: при 3000 об/мин – 216 Вт/м, при 6000

об/мин – 1140 Вт/м, при 12000 об/мин – 5580 Вт/м для ламинарного течения и 8806 Вт/м для турбулентного течения. Тем самым показано, что режим течения оказывает существенное влияние на тепловыделение за счет вязкой диссипации.

Практическая значимость

Результаты исследований могут быть использованы при расчетах приборов контроля температуры и расхода жидкости в каналах и трубопроводах, а также в качестве входных данных для расчетов повышения температуры во вращающихся механизмах за счет трения между неподвижным и вращающимся цилиндрами.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием общих законов и уравнений механики сплошной среды и широко используемой модели турбулентности, надежно протестированной на различных течениях.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006); на IV Российской национальной конференции по теплообмену, (Москва, 2006); на V международной конференции по обратным задачам (Казань-Москва, 2007), а также в публикациях в рецензируемых журналах.

Публикации

По материалам, изложенным в диссертации, опубликовано пять печатных работ, список которых представлен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения; содержит 92 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 84 наименований. Объем диссертации составляет 105 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность проблемы, определены цели исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы. Приведено краткое содержание работы.

В главе 1 диссертационной работы проводится анализ литературных источников с точки зрения современного состояния проблем существования различных режимов течения в каналах, а также использования различных моделей турбулентности для численных расчетов подобных течений. Также приведен краткий обзор работ по проблеме течения в зазоре между вращающимися цилиндрами.

В главе 2 рассматривается возможность определения расхода жидкости в круглой трубе при помощи измерения температуры на нагревательном элементе в центре трубы (Рис. 1).

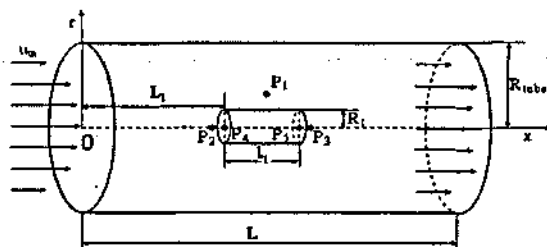


Рис. 1. Постановка задачи

Численно исследуется зависимость температуры в нескольких выбранных точках в потоке и на нагревательном элементе от числа Рейнольдса (Рис. 2). Используя результаты этого исследования, для каждой из выбранных точек можно построить обратную зависимость числа Рейнольдса от температуры и тем самым определять расход жидкости, измеряя температуру лишь в одной точке жидкости либо нагревательного элемента.

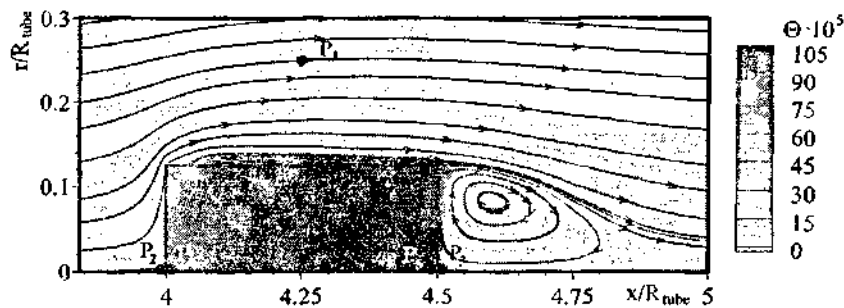


Рис. 2. Функция тока и распределение безразмерной температуры при $Re = 500$

Точка P_1 находится в потоке, над нагревательным элементом, в радиальном направлении она удалена от поверхности нагревательного элемента на расстояние, равное его радиусу. Точки P_2 и P_3 расположены также в потоке, но в непосредственной близости от нагревательного элемента – точка P_2 находится спереди от нагревательного элемента, то есть в набегающем потоке, точка P_3 находится за тыльной стороной нагревательного элемента. Точки P_4 и P_5 находятся вблизи точек P_2 и P_3 , соответственно, но не в потоке, а на поверхности нагревательного элемента.

При 34 значениях расхода получено 34 соответствующих значений безразмерной температуры в указанных точках. В качестве примера на Рис. 2 показаны линии тока и безразмерное поле температуры при $Re=500$. Видно, что за тыльной стороной нагревательного элемента образуется вихрь. Этот вихрь тем больше, чем меньше число Рейнольдса, и он является одной из причин более высокой температуры в этой области.

Решение было получено при значениях числа Рейнольдса от 50 до 10000, где число Рейнольдса было определено на основе радиуса трубы

$$Re = \frac{\rho u_{av} R_{tube}}{\mu_l}. \text{ Число Прандтля было взято равным } 5,4.$$

Задача считалась численно с помощью метода контрольного объёма и алгоритма SIMPLER. Использовалась равномерная сетка в 2560×64 контрольных объёмов по x и r соответственно. Расчёты проводились методом установления.

Глава 3 посвящена исследованию ветвления турбулентных течений в каналах со вставками (Рис. 3). Показано, что система уравнений движения вязкой жидкости допускает решения, соответствующие ламинарному режиму течения, турбулентному, а также такому установившемуся течению, при котором основной поток ламинарный, но за вставкой существует обособленная турбулентная область. Чтобы на него было легче ссылаться, последний режим течения для удобства назван в работе «среднетурбулентным».

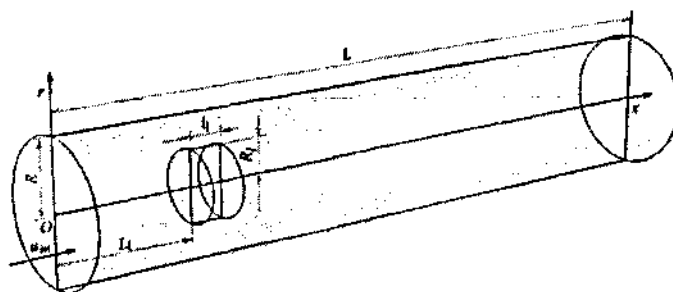


Рис. 3. Круглая труба с цилиндрической вставкой

Для получения ламинарного режима течения: в качестве граничного условия на входе задан установившийся одномерный ламинарный профиль скорости (профиль Пуазейля); в качестве начального условия во всей области использован тот же одномерный ламинарный профиль.

Для «среднетурбулентного» режима в качестве граничного условия на входе и в качестве начального условия во всей области взят тот же ламинарный профиль, что и в первом случае, но, кроме этого, внутри области задано ненулевое начальное приближение для турбулентной

кинетической энергии и ее диссипации. Картины течения для всех рассмотренных чисел Рейнольдса показаны на Рис. 4 – 8. Кроме линий тока показано также распределение безразмерной турбулентной характеристики – отношения эффективной вязкости к ламинарной. В ламинарной области течения эта величина равна единице, в турбулентной – превышает единицу. Видно, что картина течения изменяется по сравнению с ламинарным режимом. Особенно это заметно при увеличении числа Рейнольдса: вихрь за вставкой увеличивается в длину, таким образом, увеличивается область зауженного сечения потока жидкости над вставкой, и точка отрыва пограничного слоя на стенке трубы смещается вниз по течению. При числах Рейнольдса 800 и 900 турбулентная область сохраняется только в вихревой зоне за вставкой, а в остальной области течения турбулентные характеристики затухают. В частности, турбулентность исчезает и в вихре у стенки.

При $Re=1200$ турбулентная область еще ограничена вихрем, но уже распространяется и до оси трубы. Начиная с $Re=1500$, турбулентная область выходит за пределы вихря и распространяется вдоль оси, но основная часть потока при этом все равно остается ламинарной.

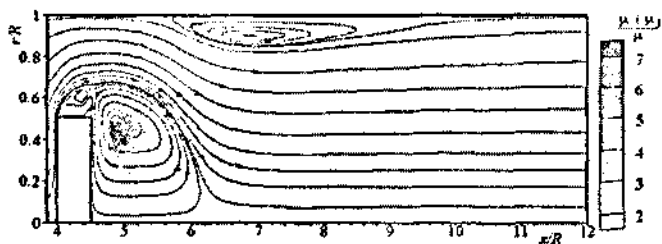


Рис. 4. Линии тока и поле безразмерной эффективной вязкости при «среднетурбулентном» режиме течения при $Re=800$

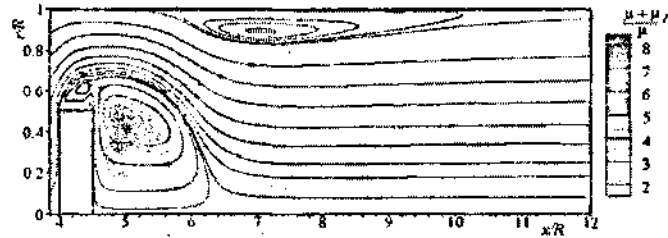


Рис. 5. Линии тока и поле безразмерной эффективной вязкости при «среднетурбулентном» режиме течения при $Re=900$

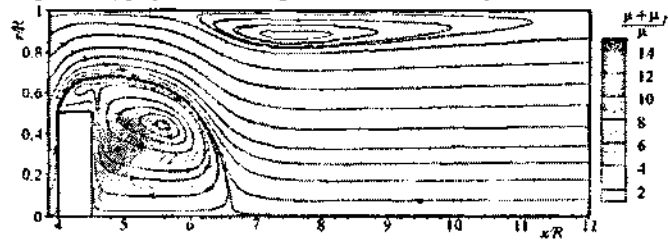


Рис. 6. Линии тока и поле безразмерной эффективной вязкости при «среднетурбулентном» режиме течения при $Re=1200$

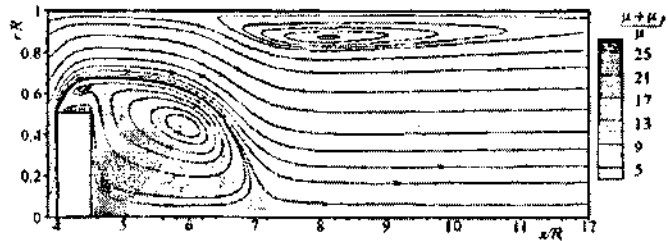


Рис. 7. Линии тока и поле безразмерной эффективной вязкости при «среднетурбулентном» режиме течения при $Re=1500$

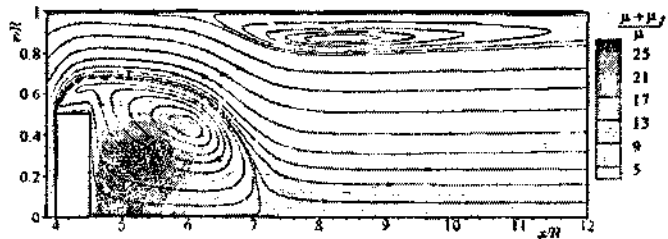


Рис. 8. Линии тока и поле безразмерной эффективной вязкости при «среднетурбулентном» режиме течения при $Re=1700$

И, наконец, для полностью турбулентного в качестве граничного и начального условий задан установившийся турбулентный профиль скорости, полученный из численного решения одномерной задачи, а также ненулевые турбулентные характеристики, вычисленные для этого профиля по формулам:

$$k = 5 \cdot 10^{-3} u(r)^2$$

$$\varepsilon = 2,5 \cdot 10^{-4} \frac{u(r)^3}{R_{\text{tube}}}$$

Задача считалась численно с помощью метода контрольного объёма и алгоритма SIMPLER. Использовалась равномерная сетка в 2560×64 контрольных объёмов по x и r соответственно. Расчёты проводились методом установления.

В главе 4 исследован вопрос о возможности существования турбулентного течения в узком зазоре между неподвижным и вращающимся цилиндрами (Рис. 9).

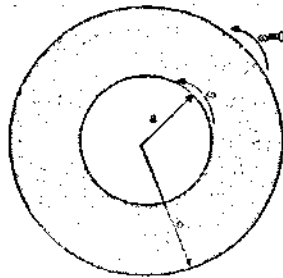


Рис. 9. Зазор между двумя коаксиальными цилиндрами, внутренний цилиндр вращается

На Рис.10 – 12 координата u отсчитывается от внутреннего цилиндра.

При частотах 3000 об/мин и 6000 об/мин (Рис. 10) турбулентные характеристики быстро затухают, и установившееся течение – только ламинарное.

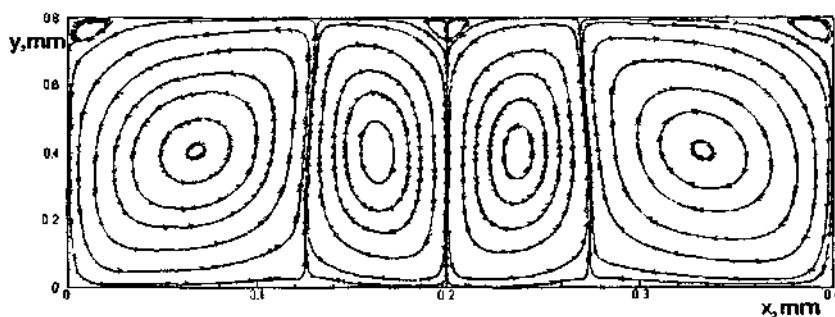


Рис. 10. Картина течения при 6000 об/мин

Была исследована также частота 12000 об/мин. При этой частоте на сетке 500×100 были получены следующие режимы течения и значения вязкой диссипации:

- установившееся турбулентное течение, осредненная вязкая диссипация равна 8806 Вт/м (Рис. 11),
- осциллирующее ламинарное течение, осредненная вязкая диссипация равна 5580 Вт/м (Рис. 12).

При ламинарном течении система вихрей колеблется, наклоняясь то к одной, то к другой торцевой стенке. На Рис. 12 показана некоторая фаза этого колебательного процесса.

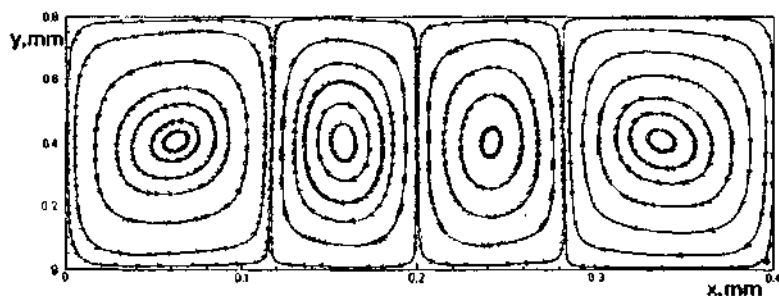


Рис. 11. Картина течения при 12000 об/мин, турбулентный случай

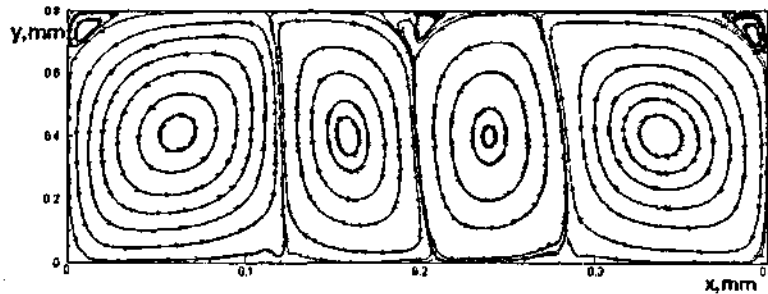


Рис. 12. Картина течения при 12000 об/мин, ламинарный случай

Показано, что режим течения оказывает существенное влияние на тепловыделение за счет вязкой диссипации.

Задача считалась численно с помощью метода контрольного объема и алгоритма SIMPLER. Для двумерной задачи использовалась равномерная сетка в 500×100 и 1000×200 контрольных объемов по x и r , соответственно. Расчёты проводились методом установления.

В заключении представлены основные результаты исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

Численно исследованы различные режимы течений вязкой жидкости в канале со вставкой и в зазоре между неподвижным и вращающимся цилиндрами.

- Теоретически показана возможность определения расхода жидкости в трубе путем измерения температуры на нагревательном элементе, расположенном на оси трубы (в дальнейшем результаты были использованы при расчете модели расходомера).

- Для течения в круглой трубе с цилиндрической вставкой уравнения движения вязкой жидкости допускают решения, соответствующие полностью ламинарному, полностью турбулентному течению, а также течению, при котором за вставкой существует

обособленная турбулентная область, в то время как основной поток остается ламинарным.

- Исследовано течение в малом зазоре между неподвижным и вращающимся цилиндрами. Показано, что при 3000 об/мин и 6000 об/мин существует лишь ламинарное установившееся течение. При 12000 об/мин получено ламинарное колебательное и установившееся турбулентное течение. Исследовано тепловыделение за счет вязкой диссипации. Показано, что на ее значение существенное влияние оказывает режим течения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шелковый Г.М., Якимова О.А. Влияние вставки на режимы течения жидкости в трубе // Тез. докл. IX Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 22 – 28 августа 2006). Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2006, С. 183.
2. Зубков П.Т., Шелковый Г.М., Якимова О.А. Влияние подогреваемой вставки на течение в трубе // Труды четвертой Российской национальной конференции по теплообмену: В 8 томах. Т.2. М.: Издательский дом МЭИ, 2006, С. 116-119.
3. Sviridov E.M., Zubkov P.T., Yakimova O.A. Flowrate Determination in a Pipe By Means of a Temperature Measurement at a Heating Element // Proc. of 5th International Conference "Inverse problems: Identification, Design, and Control" [Электронный ресурс] (Kazan – Moscow, May 10 – May 17, 2007).
4. Шелковый Г.М., Якимова О.А. Влияние вставок на течение жидкости в трубе // Сб. статей «Теплофизика, гидродинамика, теплотехника». Выпуск 4. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2008, С. 81-89.
5. Зубков П.Т., Якимова О.А. Определение расхода жидкости в круглой трубе при ламинарном течении при помощи измерения температуры на нагревательном элементе // Теплофизика высоких температур, 2009, Т. 47, №6, С. 957-960.

Подписано в печать 10.08.2011.

Формат 60x84/16. Печ. л. 1. Печать ризограф.

Тираж 100. Зак. № 865.

Типография «Печатник»

Тюмень, ул. Республики, 148 корп. 1/2.

Тел. (3452) 20-51-13, тел./факс (3452) 32-13-86

204A
15255

11-15255