

На правах рукописи

Чепрасов Сергей Александрович

Разработка модели турбулентности и исследование особенностей моделирования течения и шума струй со скачками уплотнения на основе методов RANS и LES.

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2014

Работа была выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии « Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Секундов Александр Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Копьев Виктор Феликсович
кандидат физико-математических наук
Крюков Игорь Анатольевич

Ведущая организация: Московский физико-технический институт
(Государственный университет)

Защита состоится 16 октября 2014 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 002.240.01 при Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех) по адресу: Москва, проспект Вернадского д.101. к.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМех РАН

Автореферат разослан « ____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.240.01, к.ф.-м.н.

Сысоева Е.Я.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Моделирование течения в струях непосредственно связано с фундаментальной проблемой моделирования турбулентности. В настоящее время во многих институтах нашей страны ведутся научно исследовательские работы, направленные на развитие методов численного моделирования турбулентных течений: Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Центральный аэрогидродинамический институт им. Жуковского и аэроакустическое отделение ЦАГИ НИО-9, Московский физико-технический институт, Институт Механики МГУ, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Институт автоматизации проектирования, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Балтийский государственный технический университет и др.

Традиционный подход к моделированию турбулентных течений был заложен в конце XIX века в работах Рейнольдса, который основан на решении осредненных уравнений Навье - Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes или RANS), замкнутых полуэмпирической моделью турбулентности. В настоящее время сформировался круг наиболее часто применяемых полуэмпирических моделей турбулентности - модели «S-A», «Nut-92», «k-ε», «k-ω», «SST», «v²-f», «RSM» и др., каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки, и работы по уточнению моделей турбулентности продолжают. Одно из направлений по улучшению моделей турбулентности состоит в увеличении точности описания эффектов сжимаемости. Работы по развитию таких моделей ведутся с 70-х годов, с тех пор были разработаны модификации моделей турбулентности, которые позволили улучшить описания эффекта влияния числа Маха на процессы смешения и увеличить точность моделирования турбулентных течений со

скачками уплотнения. Но следует отметить, что в сверхзвуковых коаксиальных струях со слабыми скачками уплотнения (типичное струйное течение для современных двигателей), затухание интенсивности скачков уплотнения моделируется современными полуэмпирическими моделями турбулентности с большими погрешностями. В связи с этим требуется дальнейшее усовершенствование этих моделей.

Метод RANS наиболее востребован при оценке основных характеристик течения и турбулентности, но при расчете шума на основе RANS требуется большое количество предположений о механизмах излучения акустических волн турбулентным потоком. Значительно более свободными от гипотез о механизмах генерации шума являются подходы, основанные на применении метода моделирования крупных вихрей или LES. При этом подходе крупномасштабная турбулентность в струе и шум в ближнем акустическом поле моделируются на основе решения нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа, а для описания мелко масштабной турбулентности используется подсеточная модель (например, модель Смагоринского). Расчет характеристик дальнего акустического поля выполняется на основе пульсаций в ближнем акустическом поле с помощью интеграла по поверхности окружающей струю, например интегрального решения волнового уравнения FWH. Эта методика расчета шума развивается с конца 90-х годов, и сейчас её применяют многие группы во всём мире, но использование LES для расчета струй и шума осложнено трудностями описания турбулентности в пограничном слое внутри сопла и вблизи его среза. Простые оценки показывают, что для проведения такого моделирования потребуются миллиарды расчетных ячеек, а это практически не осуществимо в случае массовых расчетов, выполняемых в конструкторских бюро. Таким образом, современные методы численного моделирования течения и шума струй так же нуждаются в дальнейшем совершенствовании.

Необходимо отметить, что аккуратный расчет течения и шума струй – важная задача при разработке методов снижения шума выхлопных струй авиационных двигателей, а экологические характеристики авиационного транспорта являются важнейшими показателями, определяющими его конкурентоспособность на мировом рынке и возможность эксплуатации на международных авиалиниях.

Цель работы

Цель данной работы состоит в увеличении точности моделирования струй со скачками уплотнения на основе метода RANS, и повышении эффективности методики LES при расчете шума.

Основные задачи работы заключаются в следующем:

1. Тестирование популярных полуэмпирических моделей турбулентности на примере RANS моделирования струйных течений со скачками уплотнения малой интенсивности
2. Расчетное исследование особенностей взаимодействия скачка уплотнения и турбулентности в слое смешения на основе моделирования методом LES
3. Разработка модификации полуэмпирической модели турбулентной вязкости для увеличения точности описания методом RANS струй при наличии относительно слабых скачков уплотнения
4. Оценка погрешностей вычисления характеристик шума струй на основе метода LES в условиях массовых расчетов на грубых сетках
5. Применение приближенных подходов моделирования турбулентности внутри сопла при расчете шума струи на основе LES
6. Анализ возможностей аккуратного моделирования турбулентности вблизи кромки сопла

Научная новизна и практическая ценность

1. Разработана новая модификация полуэмпирической модели турбулентности, позволяющая увеличить точность RANS расчетов сложных струйных течений со скачками уплотнения характерных для выхлопных струй современных авиационных двигателей. Новизна полуэмпирической модели состоит в том, что впервые при описании струйных течений со скачками уплотнения методом RANS были учтены особенности взаимодействия турбулентности в слое смешения и падающего скачка уплотнения, путем введения различающихся турбулентных вязкостей в уравнения движения и уравнениях модели турбулентности.
2. Предложен подход к заданию начальной турбулентности внутри сопла, позволяющий снизить погрешности вычислений шума струй на основе LES без значительного увеличения вычислительных затрат, что представляет практическую ценность в условиях проведения массовых расчетов, характерных для конструкторских бюро авиационной отрасли. Впервые было показано, что применения турбулизаторов при расчете шума на основе LES, расположенных внутри сопла, позволяет увеличить точность расчетов шума струи без значительного увеличения вычислительных затрат.

Личное участие соискателя в получении научных результатов

Лично автором были проведены все расчеты, а разработка полуэмпирической модели турбулентности выполнялась при его непосредственном участии. Развитие идей о применении турбулизаторов внутри сопла для задания начальной турбулентности так же было выполнено лично автором.

Достоверность полученных результатов

Результаты моделирования сопоставляются с экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

1. Третья открытая всероссийская научно-практическая конференция « Вычислительный эксперимент в аэроакустике » (Светлогорск, 2010)
2. Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов « Новые решения и технологии в газотурбостроении ». (Москва, 2010)
3. 53-я научная конференция МФТИ « Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук » (Москва 2010)
4. X Съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород, 2011)
5. Международная научная школа молодых ученых « Волны и вихри в сложных средах » (Москва, 2012)
6. XXI Международная конференция «Не-За-Те-Ги-Ус» (Звенигород, 2014)
7. Доклад на семинаре по радиационной газодинамике в ИПМехе им. А.Ю. Ишлинского (Москва 2014)

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы изложены в семи публикациях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 96 наименований. Работа изложена на 92 страницах машинописного текста, включая 50 рисунков.

Содержание работы.

Во **введении** представлен обзор литературы по теме диссертационной работы, обоснована актуальность темы, ее научная и практическая значимость, сформулированы цель и основные задачи исследования. Дано краткое содержание глав.

Первая глава содержит описание методов численного моделирования течения и шума, которые применяются в диссертационной работе. В **разделе 1.1** даны общие сведения о возможностях пакета программ ANSYS Fluent 12 при моделировании турбулентности и шума струй, обоснован выбор параметров численного алгоритма при проведении расчетного исследования, изложены детали вычислительных методик. В **разделе 1.2** проведен анализ работоспособности численных схем при моделировании методами RANS и LES эффектов в струйных течениях, связанных со сжимаемостью газа (скачки уплотнения, ближнее акустическое поле). В **разделе 1.3** описаны особенности выбора в данной работе формы и положения поверхности интегрирования при расчете шума струй методом FWH, и сделаны оценки, возникающих при этом погрешностей. Завершается глава основными выводами.

В работе использовался довольно популярный пакет программ ANSYS Fluent 12. Отличительная особенность этого кода состоит в возможности широкого выбора параметров численного алгоритма и методов моделирования, причем возможности эти еще могут быть расширены, благодаря использованию дополнительных пользовательских процедур (User Defined Functions или UDF). Например, при выполнении данной работы UDF

применялись для проведения RANS расчетов с использованием полуэмпирической модели Nut-92, которой нет среди стандартного набора моделей турбулентности в программе ANSYS Fluent 12. Следует отметить и определенные недостатки готовых программ. Несмотря на многократные тесты при их разработке, они не являются идеальными и имеют ошибки и дефекты, которые не удаётся исправить без привлечения разработчиков. Кроме того методы и модели, используемые в программе, не всегда достаточно подробно описаны в документации, поэтому даже у опытного пользователя остаётся ощущение, что программа представляет собой «черный ящик» и не все её возможности использованы корректно. Окончательный выбор параметров численной реализации устанавливался в результате тестовых расчетов и анализе влияния качества расчетной сетки на результаты вычислений.

В ANSYS Fluent дискретизация определяющих уравнений производится методом конечных объемов. Для решения системы дискретных уравнений используется метод Гаусса-Зейделя в сочетании с алгебраическим многосеточным методом. Программа позволяет использовать как структурированные, так и неструктурированные сетки. В данной работе применялись блочно-структурированные сетки.

RANS расчеты струйных течений были выполнены на основе решения двумерных уравнений в случае осевой симметрии. Уравнения интегрировались по неявной схеме. Конвективные потоки вычислялись с применением процедуры Roe и противопоточной аппроксимации второго порядка точности совместно с ограничителями на основе принципа минимальной производной (TVD). Диффузионные потоки вычислялись с помощью центрально разностной аппроксимации второго порядка точности. Для решения уравнений модели турбулентности, как правило, использовалась противопоточная аппроксимация первого порядка точности. На входе в расчетную область задавались полные параметры и направление

потока, а так же параметры турбулентности. На выходе из расчетной области задавались статические параметры потока, а параметры турбулентности сносились из расчетной области. Для вычисления параметров течения и турбулентности в ячейках, прилегающих к поверхности сопла, использовались методы пристеночных функций и сгущение сетки к стенке, так что размер первой ячейки составлял $Y^+=10-100$. При выполнении расчетов моделирование проводилось на нескольких сетках, при этом на каждом этапе дробления сетки количество узлов в каждом направлении последовательно увеличивалось в 2, 4, и более раз в каждом направлении, до тех пор, пока влияние сетки на результаты расчетов интересующих параметров становилось незначительным (менее 5%).

В случае LES моделирования и расчета шума решались трехмерные нестационарные уравнения для сжимаемого газа. В качестве подсеточной модели использовалась модель Смагоринского, причем использовалось значение коэффициента $C=0.01$. При таком значении константы C численная диффузия разностной схемы превосходит подсеточную. Таким образом, в расчетах применялся так называемый неявный LES или MILES. При численном решении уравнений движения применялась методика интегрирования по фиктивному времени, а для установления на каждом временном слое производилось 7-10 итераций, при этом временной шаг выбирался равным $\Delta t=0.01-0.03 D/U$, где D - диаметр сопла, U средняя скорость на оси струи, число Куранта равнялось 1-2. Для получения осредненных параметров потока и турбулентности при LES моделировании, а так же для расчета шума набиралась статистика, временная протяженность которой составляла 300-1000 D/U . Все расчеты были проведены на вычислительном кластере с 48-ю ядрами. Типичное время расчета одного варианта течения составляло 1-2 месяца.

Расчет пульсаций давления в дальнем акустическом поле струи выполнялся с помощью интеграла FWH. Рассмотренные примеры влияния

положения поверхности интегрирования при расчете шума методом LES/FWH на результаты вычислений, показали, что ошибки, вносимые неудачным положением поверхности интегрирования, могут достигать 5 dB и более в области наиболее низких ($Sh < 0.1$) и высоких частот ($Sh > 2$). Применение поверхности интегрирования, расположенной приблизительно на расстоянии D от среднего положения поверхности струи и длиной $15D$, позволяет предсказывать шум в области средних частот ($0.1 < Sh < 2$) с приемлемой точностью.

Вторая глава посвящена разработке модификации модели турбулентной вязкости для увеличения точности метода RANS при моделировании струйных течений со слабыми скачками уплотнения. В **разделе 2.1** приведены результаты тестирования нескольких популярных полуэмпирических моделей турбулентности и поправок на сжимаемость на примере двух струйных течений со скачками уплотнения. **Раздел 2.2** содержит описание поисковой работы по разработке модификации модели турбулентности для увеличения точности моделирования рассмотренных течений методом RANS. В **разделе 2.3** проводится расчетный анализ методом LES поведения характеристик турбулентности в области отражения скачка уплотнения от слоя смешения. Получены новые данные о поведении корреляции пульсаций давления и дивергенции скорости. В **разделе 2.4** представлено описание окончательной версии модификации полуэмпирической модели турбулентной вязкости, позволяющую увеличить точность моделирования рассмотренных течений методом RANS.

Тестирование различных моделей турбулентности выполнялось для двух струйных течений. Одно из них соответствует наиболее простому течению в круглой затопленной струе с параметрами истечения $P^*/P_a = 2.5$, $T^*/T_a = 1$, $Re = 7 \times 10^5$. Другое струйное течение близко к течению в струе для реального авиационного двигателя в режиме взлета - струя в спутном потоке $M=0.3$ для двухконтурного сопла с центральным телом и следующими

параметрами истечения: в центральном сопле $(P^*/P_a)_1=2.3$, $T_1=759$ К, во втором контуре: $(P^*/P_a)_2=2.56$, $T_2=332$ К, температурой спутного потока $T_3=301$ К, при этом $Re=10^6$. Для тестирования были выбраны три довольно популярные модели турбулентности Nut-92, k- ω SST, и RSM, каждая из которых содержит поправки на сжимаемость.

Обобщая результаты тестирования (см. рис.1), необходимо сделать замечание о том, что ни одной модели турбулентности не удалось одновременно предсказать как характеристики смешения в струе, так и систему скачков уплотнения. Типичной ситуацией оказывалась такая, при которой модель переоценивала дальнобойность струи, но при этом удовлетворительно предсказывала систему скачков уплотнения, либо наоборот длина начального участка предсказывалась аккуратно, но при этом затухание скачков уплотнения оказывалось более быстрым, чем это наблюдалось в эксперименте. Таким образом, можно заключить, что все модели турбулентности, применяемые в расчетах методом RANS, требуют улучшения при моделировании струйных течений со скачками уплотнения.

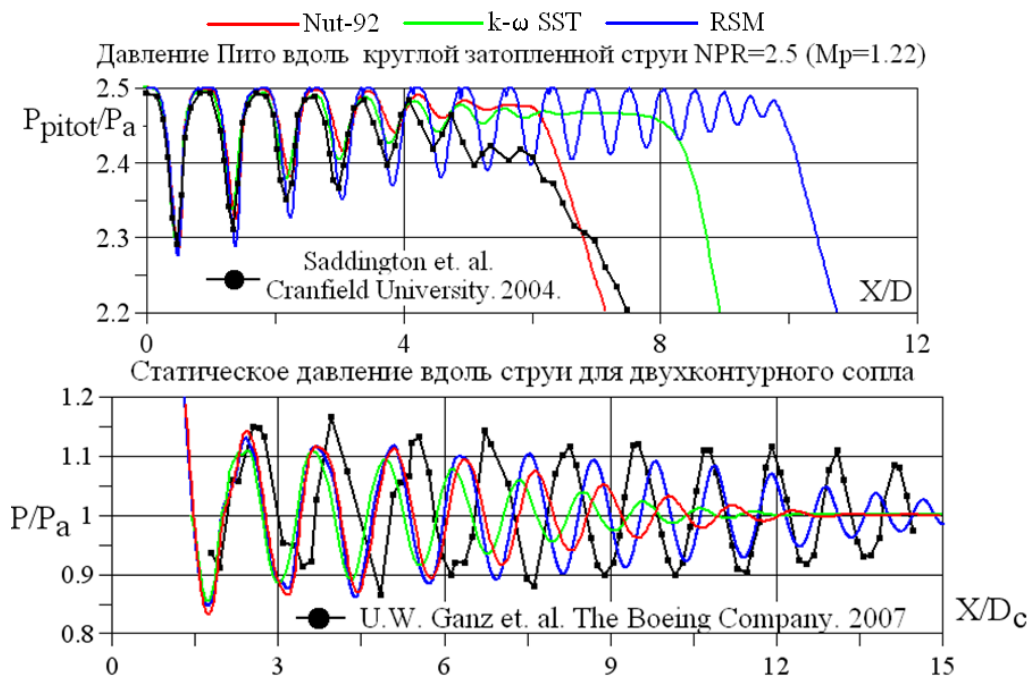


Рис.1. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для двух струйных течений

Наиболее популярный способ модификации моделей турбулентности для учета эффектов сжимаемости состоит в разработке приближенных соотношений для дополнительных слагаемых в уравнении баланса энергии турбулентности, одним из которых является корреляция $\langle p' \text{div} u' \rangle$. В ходе поисковой работы было перепробовано более 20 вариантов выражений для этого дополнительного слагаемого. В результате тестирования было установлено, что если величина этого слагаемого небольшая, то влияние поправок на результаты моделирования процессов смешения в струе и скачков уплотнения слабое. Увеличение значений этой поправки приводило к неблагоприятным эффектам, а именно к значительному уменьшению турбулентной вязкости в слоях смешения, и, как следствие, увеличению дальности струи, хотя при этом затухание интенсивности скачков уплотнения становилось более медленным и приближалось к экспериментальным данным. Наилучшие результаты показал вариант, в котором удалось минимизировать турбулентную вязкость в ядре потока, но все же при этом затухание скачков уплотнения в расчете было гораздо быстрее, чем в эксперименте.

Для того чтобы понять какая часть потока оказывает наибольшее влияние на распределение скачков уплотнения были проведены специальные расчеты. В этих расчетах уменьшалась турбулентная вязкость в различных частях струи, выделяемых геометрически. В результате чего было установлено, что только в случае, когда область с уменьшенным уровнем турбулентной вязкости попадает в область отражения скачка уплотнения от слоя смешения, наблюдается значительное влияние на распределение скачков уплотнения в струе. Но следует отметить, что даже когда вязкость уменьшалась только в узкой сверхзвуковой области смешения, это приводило к значительному влиянию на всю струю.

Таким образом, хотя в результате поисковой работы и не удалось улучшить модель турбулентности, было установлено два важных факта:

- 1) Основные процессы, влияющие на скачки уплотнения, происходят в области отражения
- 2) Не удастся локально влиять на скачки уплотнения, не изменив смешения, путем введения дополнительного слагаемого в уравнение баланса кинетической энергии

Для получения большего понимания об особенностях турбулентного переноса в области взаимодействия скачков уплотнения и турбулентности в струе было проведено расчетное исследование методом LES модельной задачи об отражении скачка уплотнения от слоя смешения. Нестационарная картина взаимодействия показывает (см. рис.2), что область больших градиентов, характеризующих скачок уплотнения, не глубоко проникает в слой смешения, и область взаимодействия сосредоточена в сверхзвуковой части смешения. Анализ результатов поведения характеристик турбулентности в области взаимодействия показывает (см. рис.3), что компоненты тензора напряжений Рейнольдса, и, следовательно, турбулентная вязкость в месте взаимодействия скачка уплотнения и слоя резко меняются, а корреляция $\langle \rho' \partial u'_i / \partial x_i \rangle$ ведёт себя сложным знакопеременным образом.

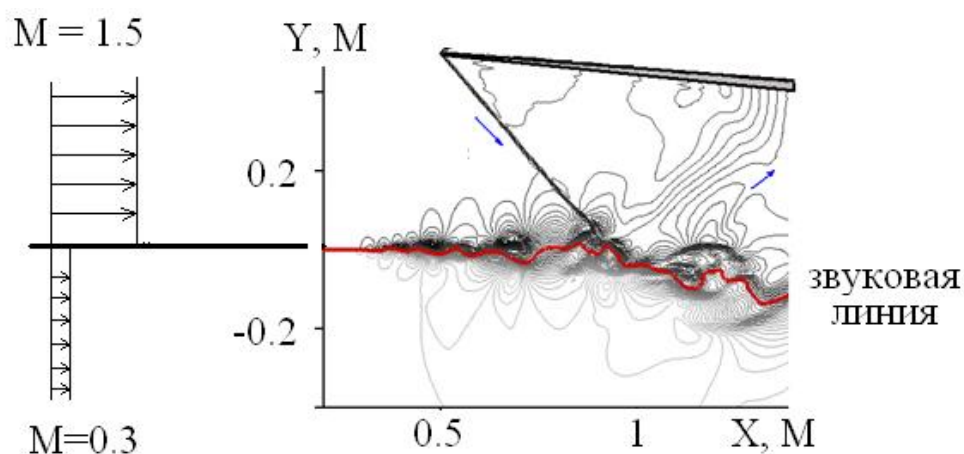


Рис.2. Нестационарная картина отражения скачка уплотнения от слоя смешения, полученная на основе LES

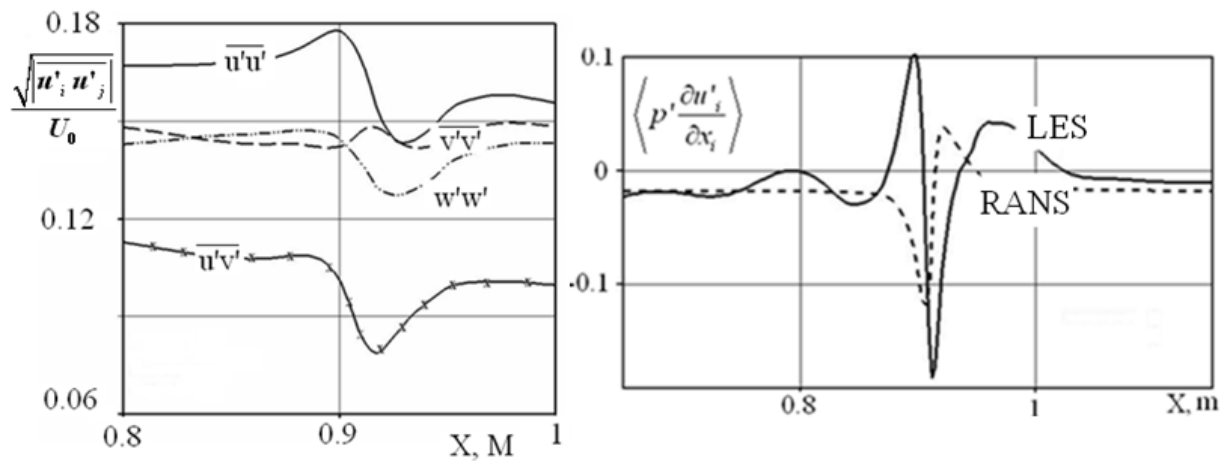


Рис.3. Поведение напряжений Рейнольдса и корреляции $\langle p' \operatorname{div} \mathbf{u}' \rangle$ в области взаимодействия скачка уплотнения и слоя смешения вдоль среднего положения звуковой линии

Учитывая эти особенности поведения характеристик турбулентности в области взаимодействия и фактов, полученных в ходе поисковой работы по модификации модели турбулентности, предлагается новая модификация модели турбулентности, в которой применяются различные коэффициенты турбулентных вязкостей: ν_t в уравнении движения и ν_t^* в уравнениях модели турбулентности. Причем, эти величины отличаются, главным образом, только в области взаимодействия скачков уплотнения (волн разрежения) и слоя смешения. Такой прием позволил смоделировать резкий рост турбулентной вязкости, а, следовательно, и напряжений Рейнольдса в области взаимодействия и имитировать знакопеременность корреляции $\langle p' \partial u'_i / \partial x_i \rangle$ не меняя практически процессов смешения (см. рис. 4). Окончательное выражение связи ν_t и ν_t^* следующее:

$$\nu_t = \nu_t^* \frac{1 - C_1}{1 + C_2}$$

$$C_1 = \min(D, 0) F(M) \quad C_2 = \max(D, 0) F(M)$$

$$D = \frac{p_\infty - p}{\rho V^2} \quad F(M) = 10 \max\{0, (M - 0.9)\}$$

где величина D характеризует область взаимодействия скачка уплотнения (волны разрежения) и слоя смешения, V – модуль скорости потока, $F(M)$ – функция от числа Маха, отражающая тот факт, что взаимодействие скачка уплотнения (волны разрежения) и слоя смешения локализовано вблизи сверхзвуковой части слоя смешения. Знакопеременность D и наличие переключателей C_1, C_2 , обеспечивают знакопеременное влияние скачков уплотнения и волн разрежения на турбулентную вязкость (Рис.4). Следует отметить определенные недостатки предложенного выражения, которое содержит неинвариантные величины, такие как давление на бесконечности P_∞ и модуль скорости V .

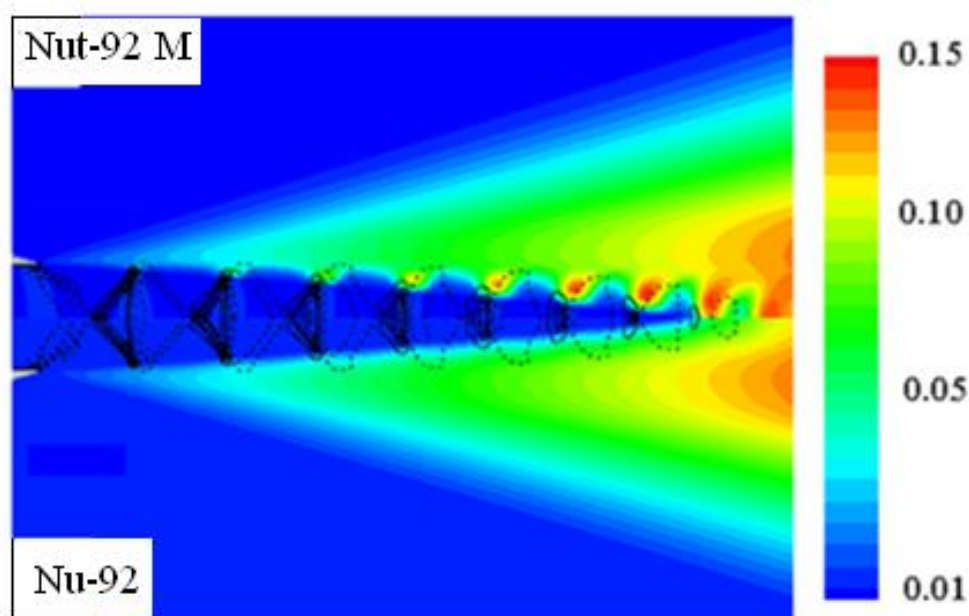


Рис.4 Поле турбулентной вязкости в круглой затопленной струе для стандартной модели Nut-92 и её модификации Nut-92 M

Как показано на рис.5 применение, предложенной в данной работе поправки к модели турбулентной вязкости Nut-92, позволяет увеличить точность вычислений распределения интенсивности скачков уплотнения (волн разрежения) в обоих струйных течениях, как в затопленной круглой струе, так и в коаксиальной струе в спутном потоке.

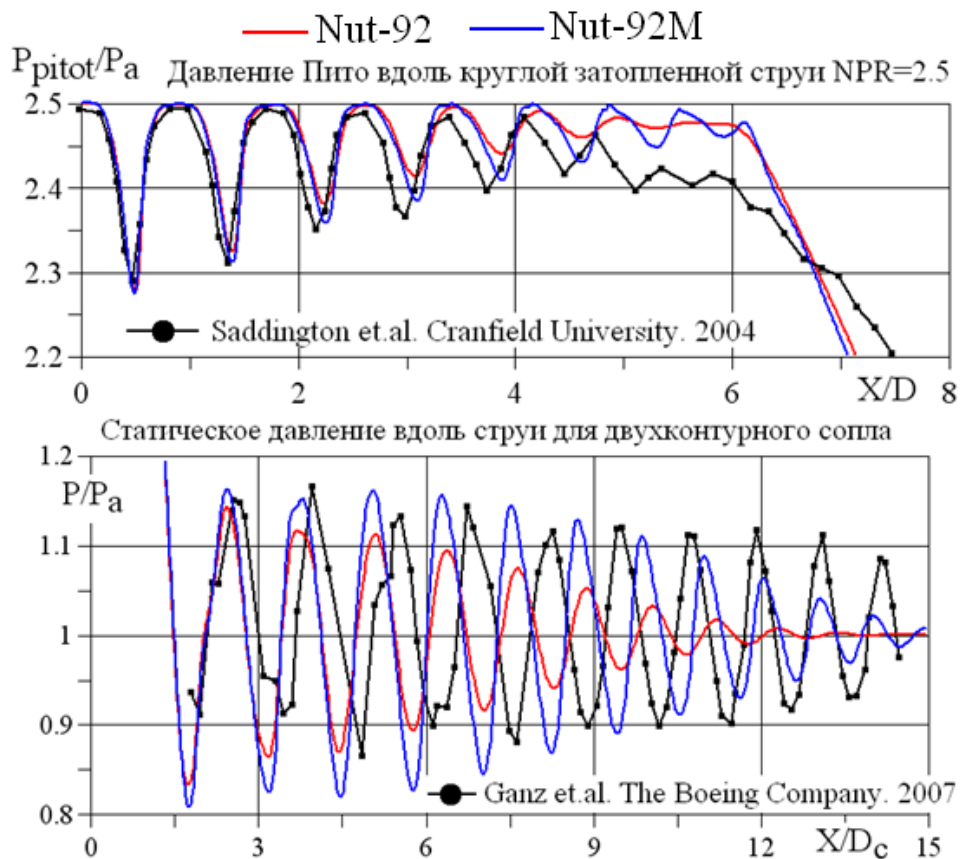


Рис.5 Сравнение расчетных с применением модификации модели турбулентности и экспериментальных данных для двух струйных течений

Третья глава посвящена анализу возможностей метода LES при проведении массовых расчетов шума струй на грубых сетках (расчетное исследование характерное для конструкторских бюро) и разработке приближенных подходов моделирования турбулентности внутри сопла. В **разделе 3.1** представлены примеры расчетов шума четырех струйных течений, и на основе сравнения с экспериментальными данными сделаны оценки погрешностей, возникающих при моделировании шума рассмотренных струй. В **разделе 3.2** продемонстрированы возможности применения приближенных подходов моделирования турбулентности внутри сопла при расчете течения и шума струй. В **разделе 3.3** проведен анализ перспектив точного моделирования характеристик турбулентности вблизи кромки сопла.

Применением и развитием метода LES и подхода FWH для расчета течения и шума струй занимаются многие группы во всем мире уже более 10 лет. Этот подход становится важнейшим инструментом для исследования особенностей течения и излучаемого шума. Для оценки типичных погрешностей этого метода, возникающих при расчете на относительно грубых сетках (5-8 млн.), было проведено моделирование шума для четырех струйных течений: дозвуковая струя ($M=0.9$) для круглого и шевронного сопла, струя со скачками уплотнения для конического сопла при малом ($P^*/P_0=2.5$) и умеренном сверхзвуковом перепаде ($P^*/P_0=4$).

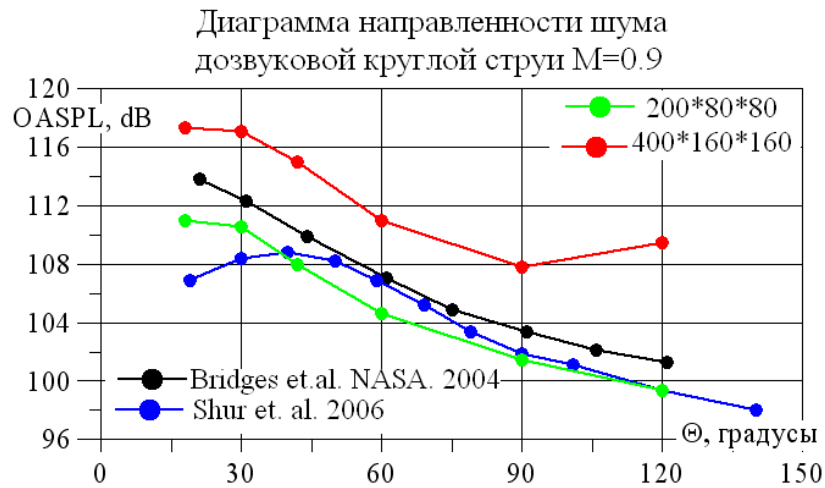


Рис.6. Сравнение результатов расчетов проведенных в данной работе на двух сетках, с результатами расчетов других авторов и экспериментальными данными.

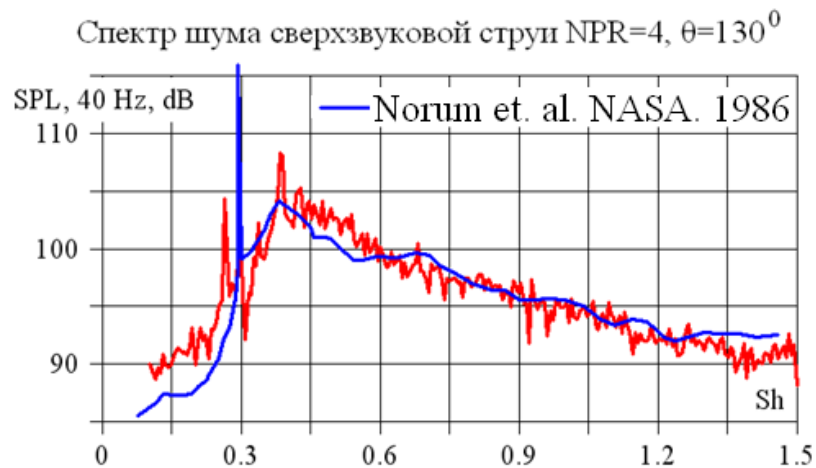


Рис.7. Сравнение результатов с экспериментальными данными.

Результаты, представленные на рис.6-7. показывают, что в случае формального применения метода LES/FWH без привлечения специальных вычислительных приемов и при использовании сравнительно грубых сеток, содержащих 5-8 млн. ячеек, возможности прямого численного метода расчета шума струи существенно ограничены. В представленных расчетах, удалось смоделировать важные качественные особенности излучения шума, таких как диаграмма направленности шума дозвуковой струи, широкополосный и тональный шум в струе со скачками уплотнения, но все-таки отличие результатов моделирования от результатов лабораторных экспериментов достигает 5 dB при вычислении OASPL, и 10 dB для SPL. Следует отметить, что прямой численный метод расчета шума не позволил предсказать тональную компоненту шума («Screech») для струи со скачками уплотнения при малом сверхзвуковом перепаде ($P^*/P_0=2.5$). Кроме того при всех режимах истечения высокочастотную часть спектра ($Sh>2$) описать в данных расчетах не удалось.

Одна из проблем моделирования методом LES турбулентных струй связана с тем, что течение в струе и излучаемый шум при небольших числах Рейнольдса ($Re < 10^4$), сильно отличается от течения и шума развитых турбулентных струй ($Re > 10^5$). А в случае применения относительно грубых сеток в LES расчетах удаётся моделировать лишь низко Рейнольдсовы струи. При этом основные трудности возникают при описании турбулентности внутри сопла и вблизи его среза. Увеличение точности метода LES/FWH в значительной мере связано с развитием компьютеров и совершенствованием методов численного решения уравнений газовой динамики, но наряду с преодолением вычислительных трудностей для развития прямого численного метода расчета шума необходима также и разработка специальных подходов задания начальной турбулентности внутри сопла.

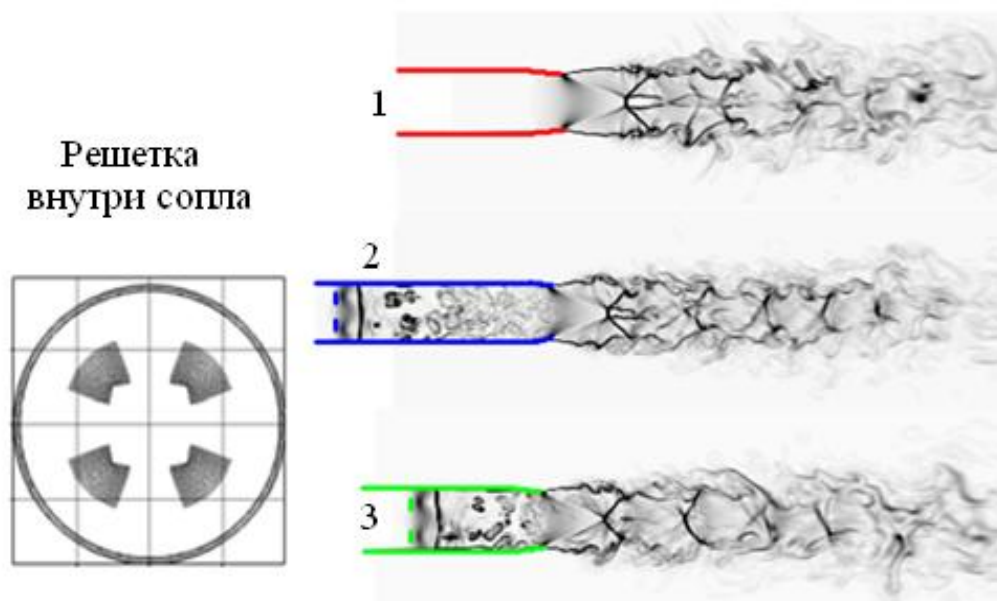


Рис.8. Сравнение течений внутри сопла и в струе для расчетов с использованием решетки внутри сопла (для двух положений решетки) и без неё. Струя со скачками уплотнения при умеренном сверхзвуковом перепаде давления.

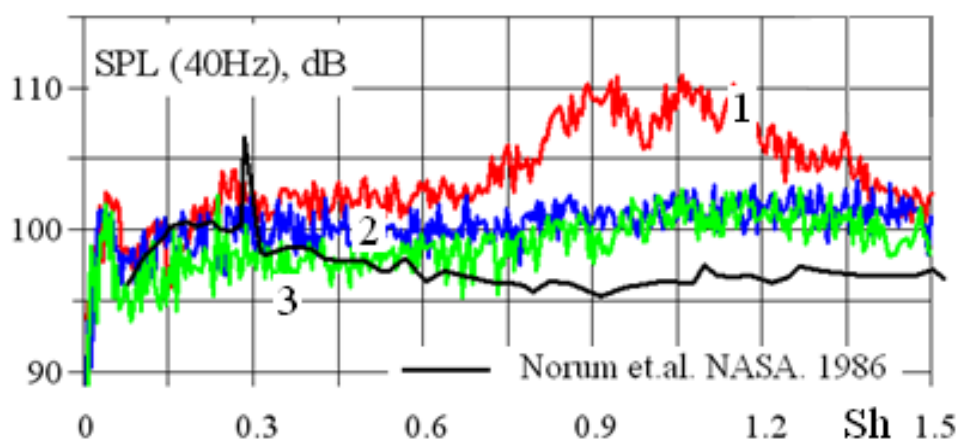


Рис.9. Сравнение расчетных с использованием решетки внутри сопла (для двух положений решетки) и без неё с экспериментальными данными.

В данной работе предлагается приближенный подход к моделированию турбулентности внутри сопла, при котором турбулентность в пограничном

слое и внутри сопла инициируется за счет использования турбулизирующих элементов (интерцепторов, решеток) (см. рис.8.). Анализ результатов расчета шума, представленный на рис.9, показывает, что применение решетки позволяет значительно снизить ошибки расчета спектра шума сверхзвуковой струи со скачками уплотнения. Следует отметить, что от положения решетки результаты расчетов слабо зависят. В работе так же были рассмотрены другие разновидности турбулизирующих элементов и продемонстрированы возможности их применения.

Наиболее затратным элементом в ходе проведения моделирования турбулентности внутри сопла является описание пристеночного слоя и течения вблизи кромки. Простые оценки и расчеты, показывают, что для разрешения крупномасштабной турбулентности пограничного слоя на стенке сопла и течения вблизи среза, потребуется не менее миллиарда расчетных ячеек. В настоящее время проведение подобных расчетов находится на грани возможностей современной вычислительной техники, но темпы развития суперкомпьютеров дают надежды, что проведение таких расчетов со временем станет более доступным. Поэтому сейчас важно попытаться сделать задел для проведения подобных расчетов в будущем. Для того чтобы проанализировать возможности моделирования методом LES течения вблизи кромки сопла, в данной работе представлены результаты моделирования модельной задачи о стекании турбулентного пограничного слоя с пластины. Качественные и количественные особенности этого течения близки к особенностям течения вблизи кромки сопла, но так как геометрия этой задачи гораздо проще, то при использовании умеренной сетки можно добиться более высокого разрешения пристеночной турбулентности.

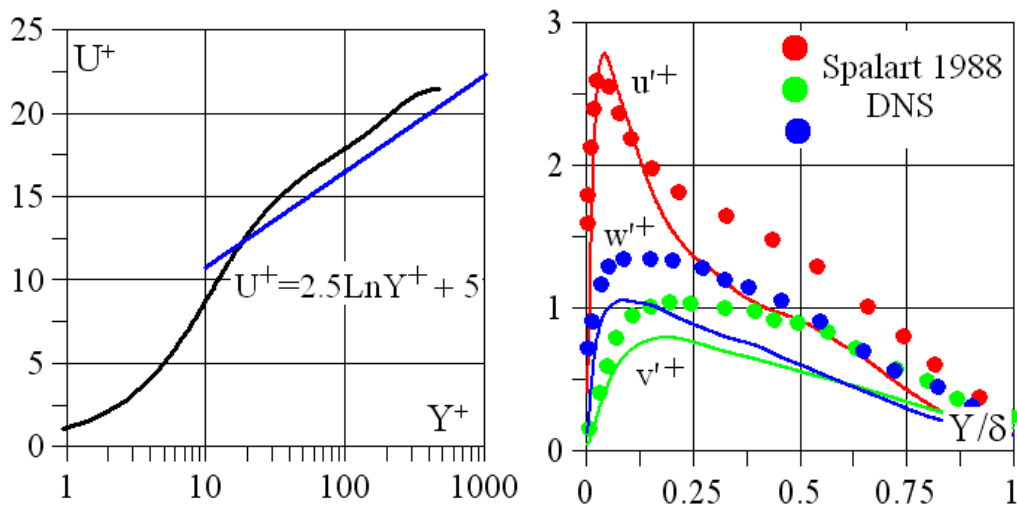


Рис.10. . Профили средней продольной скорости (слева) и пульсаций скорости (справа) в пограничном слое на кромке пластины $X=0$.

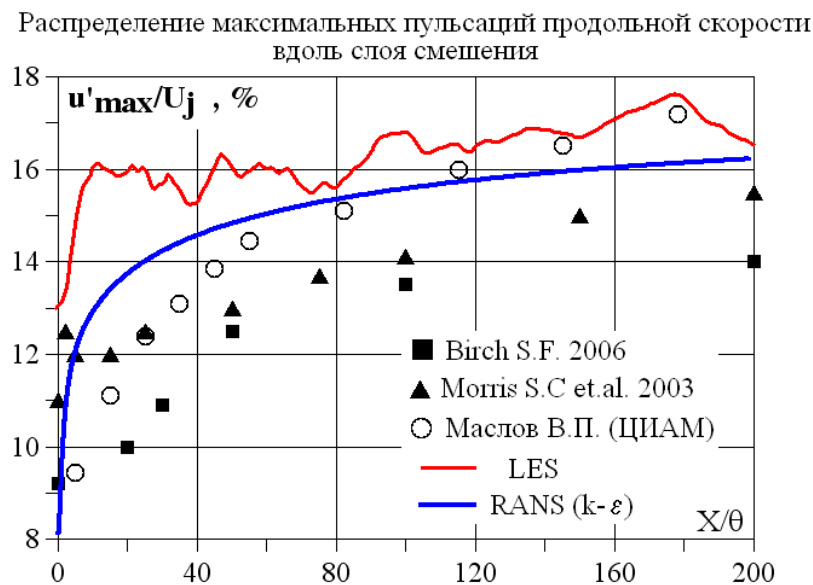


Рис.11. Распределение максимальных пульсаций продольной скорости вдоль слоя смешения. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Результаты вычислений параметров течения и турбулентности для задачи о стекании турбулентного пограничного слоя с пластины, представленные на рис.10, демонстрируют, что в расчете достаточно аккуратно предсказаны основные закономерности поведения осредненных

характеристик турбулентности в турбулентном пограничном слое – логарифмический участок, анизотропия пульсаций скорости. Но это как видно из анализа рис.11, описание основных характеристик турбулентного пограничного слоя не достаточно для аккуратного предсказания картины течения вблизи кромки пластины и поведения осредненных характеристик турбулентности. Таким образом, представленный анализ трудностей моделирования турбулентности в пристеночной области внутри сопла и на выходе вблизи его кромки показывает, что рост вычислительной техники в ближайшем будущем и использование расчетных сеток, содержащих миллиарды ячеек, вероятно, не решит полностью проблему моделирования методом LES турбулентности в непосредственной близости к кромке сопла. Ошибки предсказания характеристик турбулентности в пределах половины первого калибра течения в струе могут достигать 20-30%, не смотря на аккуратное моделирование турбулентного пограничного слоя на стенке сопла.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Разработана модификация полуэмпирической модели турбулентности для проведения RANS расчетов сложных струйных течений со скачками уплотнения. При разработке полуэмпирической RANS модели были учтены новые особенности взаимодействия турбулентности в слое смешения и падающего скачка уплотнения, путем введения различающихся турбулентных вязкостей в уравнения движения и уравнениях модели турбулентности. А именно, в ходе расчетного исследования впервые было установлено, что в области взаимодействия корреляция $\langle p' \text{div } u' \rangle$ имеет сложный знакопеременный вид, а турбулентные напряжения и вязкость резко меняются. Предложенная модель позволяет значительно увеличить точность расчета струй для реальных двухконтурных сопел на крейсерских режимах полёта современных гражданских самолетов.

2. Предложен приближенный подход к описанию начальной турбулентности внутри сопла при расчете шума струй на основе LES. Впервые было показано, что применение турбулизаторов, расположенных внутри сопла, позволяет увеличить точность расчетов шума струи без значительного увеличения вычислительных затрат при моделировании на основе LES. Таким образом, предложенный подход повышает эффективность методики расчета шума, что представляет практическую ценность в условиях проведения массовых расчетов, характерных для конструкторских бюро авиационной отрасли. Кроме того, показано, что рост вычислительной техники в ближайшем будущем и использование расчетных сеток, содержащих миллиарды ячеек, не решит проблему моделирования турбулентности в непосредственной близости к кромке сопла.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Чепрасов С.А. Численное моделирование турбулентной струи и её шума. Тезисы докладов. Третья открытая всероссийская научно-практическая конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике». г. Светлогорск 2010.
2. Чепрасов С.А. Численное моделирование турбулентной струи и её шума. Тезисы докладов. Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов « Новые решения и технологии в газотурбостроении». Москва 2010.
3. Cheprasov S.A., Lyubimov D.A., Secundov A.N., Yakubovsky K.Ya., Birch S.F. Computational modeling of the flow and noise for 3-D exhaust turbulent jets // Computational Fluid Dynamics. 2010/ Ed. A. Kuzmin. Berlin Springer. 2011. P. 897-902
4. Чепрасов С.А, Секундов А.Н. Моделирование шума турбулентных струй // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. №4(3). С. 1245-1247. **(ВАК)**

5. Секундов А.Н., Чепрасов С.А., Якубовский К.Я. Анализ возможностей методов расчета шума турбулентных струй. РАН. «Механика жидкости и газа». 2012, № 5, с. 126-136 **(ВАК)**
6. С.А. Чепрасов. «Моделирование трансзвуковых слабо недорасширенных турбулентных струй». РАН «Механика жидкости и газа», 2013, №5, с. 52-61 **(ВАК)**