

**Сведения о соискателе, диссертации, научном консультанте, официальных  
оппонентах, ведущей организации**

**Соискатель: Любимов Дмитрий Александрович**

Диссертация: «Анализ турбулентных струйных и отрывных течений в элементах ТРД комбинированными RANS/LES-методами высокого разрешения» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация принята к защите «24» апреля 2014г, протокол №3.

Члены комиссии по приему диссертации к защите: Змитренко Н.В., Головизнин В.М., Якубовский М.В.

**Научные консультанты**

**1. Научный консультант – Секундов Александр Николаевич**

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное унитарное предприятие «ЦИАМ им. П.И. Баранова», отделение «Газовая динамика и теплообмен», начальник сектора.

Адрес: 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д.2.

**Официальные оппоненты**

**1. Козубская Татьяна Константиновна**

доктор физико-математических наук, с.н.с., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, заведующая сектором.

Адрес: 125047, Москва, Миусская пл., 4

Ilya Abalakin, Pavel Bakhvalov and tatiana Kozubskaya. Edge-based reconstruction schemes for prediction of near field flow region in complex aeroacoustic problems // International Journal of Aeroacoustics. 2014. V.13, №3&4, 2014, P. 207-234.

И.В.Абалакин, Т.К.Козубская. Схема повышенной точности на основе реберно-ориентированной квазиодномерной реконструкции переменных для решения задач аэродинамики и аэроакустики на тетраэдральных сетках // Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 8. С. 109-136.

Абалакин И.В., Бахвалов П.А., Горобец А.В., Дубень А.П., Козубская Т.К. Параллельный программный комплекс NOISETTE для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики // Вычислительные методы и программирование. 2012. Т. 13. С. 110-125.

А.П. Дубень, Т.К. Козубская, М.А. Миронов, Численное исследование резонаторов в волноводе // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2012. № 1. С. 146-156.

А.П. Дубень, Т.К. Козубская, С.И. Королев, В.П. Маслов, А.К. Миронов, Д.А. Миронова, В.М. Шахпаронов, Исследования акустического течения в горле резонатора // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 1. С. 80-92.

A.P.Duben, T.K.Kozubskaya, S.I.Korolev, V.P.Maslov, A.K.Mironov, D.A.Mironova, V.M.Shakhporonov, Investigation of acoustic flow in the resonator throat: experiment and computational modeling. // Acoustical Physics. 2012. V.. 58. № 1. P. 69-80.

П.А. Бахвалов, Т.К. Козубская, Е.Д. Корнилина, А.В. Морозов, М.В. Якововский, Технология расчетов акустических пульсаций в дальнем поле течения // Математическое моделирование. 2011. Т. 23, № 11. С. 33-47.

P.A.Bakhvalov, T.K.Kozubskaya, E.D.Kornilina, A.V.Morozov, M.V.Jakobovskii,  
Technology of predicting acoustic disturbances in flow far field // *Mathematical  
Models and Computer Simulations*. 2012. V. 4. № 3. P. 363–373.

И.В.Абалакин, А. Дервье, Т.К.Козубская, Х.Уввар. Методика повышения  
точности при моделировании переноса акустических возмущений на  
неструктурированных сетках // *Ученые записки ЦАГИ*. 2010. Т.XLI, № 1.

## **2. Гайфуллин Александр Марксович**

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН ФГУП «ЦАГИ»  
(Центральный аэрогидродинамический институт) им. проф. Н.Е. Жуковского»,  
главный научный сотрудник НИО-2.

Адрес: 140180, Московская обл. г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1.

Гайфуллин А.М., Свириденко Ю.Н. Математическая модель аэродинамики  
самолета в вихревом следе // *Ученые записки ЦАГИ*. 2010. Т. XLI. № 4. С. 3-16.

Гайфуллин А.М., Свириденко Ю.Н. Вихревой след за пассажирским самолетом //  
*Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 4. Ч. 3. С.  
697–699.

Гайфуллин А.М. К задаче о взаимодействии вихря с плоскостью // *Изв. АН МЖГ*.  
2013. №6. С. 72-80.

Гайфуллин А.М., Судаков Г.Г., Воеводин А.В., Судаков В.Г., Петров А.С.,  
Свириденко Ю.Н. Влияние удлинения фюзеляжа на аэродинамику  
магистрального самолета на больших углах атаки // *Труды МФТИ*. 2014. Т.6. № 1.  
С. 101-111.

## **3. Никитин Николай Васильевич**

доктор физико-математических наук, Государственное учебно-научное  
учреждение Научно-исследовательский институт механики Московского  
государственного университета имени М.В. Ломоносова, заведующий  
лабораторией общей аэродинамики

Holzner M., Guala M., Luthi B., Liberzon A., Nikitin N., Kinzelbach W., Tsinober A.  
Viscous tilting and production of vorticity in homogeneous turbulence. *Physics of  
Fluids*, 22(6), 061701, 2010.

Nikitin N. Four-dimensional turbulence in a plane channel. *Journal of Fluid Mechanics*,  
680, 67-79, 2011.

Ванг Х.Л., Никитин Н.В., Чернышенко С.И. Идентификация ламинарно-  
турбулентной границы в частично турбулентном течении. *Изв. РАН, МЖГ*, №6,  
с.69-75, 2011.

Никитин Н.В. Турбулентное течение в плоском канале в четырех  
пространственных измерениях. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И.  
Лобачевского*, 2011, № 4, часть 5, с. 2387 – 2389. Н. Новгород: Изд-во ННГУ им.  
Н.И. Лобачевского.

Краснопольский Б.И., Никитин Н.В. О теплообмене в трехмерной прямоугольной  
каверне, ориентированной под углом к набегающему потоку. *Изв. РАН, МЖГ*,  
№3, с.29-38, 2012.

Водопьянов И.С., Никитин Н.В., Чернышенко С.И. Снижение турбулентного  
сопротивления боковыми колебаниями оребренной поверхности. *Изв. РАН, МЖГ*,  
№4, с.46-56, 2013.

Demekhin E. A., Nikitin N. V., Shelistov V. S. Direct numerical simulation of electrokinetic instability and transition to chaotic motion. *Physics of Fluids*, 25(12), 122001, 2013.

### **Ведущая организация**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича» СО РАН

Адрес: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1

Сайт: <http://www.itam.nsc.ru>

Отзыв на диссертацию подписали: **Запрягаев Виктор Иванович**, заведующий лабораторией экспериментальной аэрогазодинамики; доктор технических наук, профессор; **Кудрявцев Алексей Иванович**, с.н.с. лаборатории вычислительной аэродинамики, кандидат физико-математических наук.

Фомин В. М., Запрягаев В. И., Локотко А. В., Волков В. Ф. Влияние распределенного вдува газа на аэродинамические характеристики тела вращения в сверхзвуковом потоке. // ПМТФ. 2012. Т.53, №.3. С. 30-37.

Запрягаев В.И., Киселев Н.П., Губанов Д.А. Экспериментальное исследование влияния вихрегенераторов и подвода жидкости на шум высокоскоростных струй. // Уч. Зап. ЦАГИ. 2012. Т.43, №.4. С. 57-68.

Fomin V.M., Zapryagaev V.I., Lokotko A.V., Volkov V.F. Effect of distributed gas injection on aerodynamic characteristics of a body of revolution in a supersonic flow. // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. - 2012. - Vol.53, No.3. - P. 333-339.

В.И. Запрягаев, А.В. Солотчин, И.Н. Кавун, Д.А. Яровский. Натекание сверхзвуковой недорасширенной струи на преграды различной проницаемости // ПМТФ, 2011, Т. 52, № 5, с. 60-67.

В. И. Запрягаев, И. Н. Кавун, Н. П. Киселев. Структура течения на начальном участке сверхзвуковой струи, истекающей из сопла с шевронами // ПМТФ. 2010. - Т. 51, № 2, - С. 71-80.

В.М. Бойко, А.В. Достовалов, В.И. Запрягаев, И.Н. Кавун, Н.П. Киселев, А.А. Пивоваров. Исследование структуры сверхзвуковых неизобарических струй // Уч. Зап. ЦАГИ. 2010. - Т. 41, № 2. - С. 44-58.

Kudryavtsev N. and Shershnev A.A. Numerical simulation of microflows using direct solving of kinetic equations with WENO schemes // *Journal of Scientific Computing*, Vol. 57, No. 1, 2013, pp. 42-73.

Шоев Г.В., Бондарь Е.А., Хотяновский Д.В., Кудрявцев А.Н., Марута К., Иванов М.С. Численное исследование входа и распространения ударной волны в микроканале. // Теплофизика и аэромеханика. - 2012. - Т.19, No.1. - С. 19-34.

Kudryavtsev A.N., Epstein D.B. Hysteresis phenomenon at interaction of shock waves generated by a cylinder array. // *Shock Waves*. - 2012. - Vol.22, No.4. - P. 341-349.

А.А. Шершнёв, А.Н. Кудрявцев, Е.А. Бондарь. Численное моделирование сверхзвукового течения газа около плоской пластины на основе кинетических и континуальных моделей // *Вычислительные Технологии*, т.16, №6, стр. 93–104, 2011.

А.Н. Кудрявцев, А.Ю. Овсянников. Численное исследование взаимодействия акустических волн со скачком уплотнения // *Ученые записки ЦАГИ*, 2010. - Т. 41, № 1. - С. 37-43.

MASLOV A.A., MIRONOV S.G., KUDRYAVTSEV A.N., POPLAVSKAYA T.V., TSYRYULNIKOV I.S. Wave processes in a viscous shock layer and control of fluctuations // J. Fluid Mech. –2010. – V. 650. – P. 81–118.

### **Отзывы на автореферат и диссертацию**

#### **1. Из ФАЛТ МФТИ**

Адрес: 140180, Московская обл, г. Жуковский ул. Гагарина, д. 16

Сайт: <http://www.mipt/dafe/>, E-mail: shalaev@falt.ru

Отзыв составил **Шалаев Владимир Иванович**, доктор физико-математических наук,

должность – профессор кафедры теоретической и прикладной аэромеханики ФАЛТ МФТИ. В отзыве указано .....

#### **2. ИЗ СПбГУ ГА**

Адрес: 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38

Отзыв составил **Исаев Владимир Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор,

должность – заведующий лабораторией фундаментальных исследований СПбГУ ГА.

#### **3. Из ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН**

Адрес: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1

Сайт: <http://www.itam.nsc.ru> Отзыв составил Курбацкий Альберт Феликсович, доктор физико-математических наук, профессор,

должность – главный научный сотрудник лаборатории аэрофизических исследований дозвуковых течений ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН.

#### **4. Из федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

Адрес: 198005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1.

Сайт: <http://www.voenmeh.ru/>

Отзыв составили: **Емельянов Владислав Николаевич** доктор технических наук, профессор,

должность – заведующий кафедрой плазмогазодинамики и теплотехники и **Волков Константин Николаевич**, доктор физико-математических наук.

#### **5. Из ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет»**

Адрес: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Сайт: <http://www.spbstu.ru/>

Отзыв составил: **Смирнов Евгений Михайлович**, доктор физико-математических наук,

должность – зав. кафедрой гидроаэродинамика.

#### **6. Из федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

Адрес: 198005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1.

Сайт: <http://www.voenmeh.ru/>, E-mail: [tsrknv@bstu.spb.su](mailto:tsrknv@bstu.spb.su); [Yury-Tsirkunov@rambler.ru](mailto:Yury-Tsirkunov@rambler.ru)

Отзыв составил: **Циркунов Юрий Михайлович** доктор физико-математических наук, профессор,  
должность: профессор кафедры плазмогазодинамики и теплотехники, руководитель группы по исследованию двухфазных течений Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

### Результаты публичной защиты

Дата защиты 13.11.2014

Соискатель: Любимов Дмитрий Александрович

Диссертация «Анализ турбулентных струйных и отрывных течений в элементах ТРД комбинированными RANS/LES-методами высокого разрешения».

Заседание ведет: Четверушкин Борис Николаевич, председатель диссертационного совета.

На заседании присутствуют 18 членов совета, из них 7 специалистов по профилю рассматриваемой диссертации:

ЧЕТВЕРУШКИН Б.Н.	д.ф.-м.н.	05.13.18
ТИШКИН В.Ф.	д.ф.-м.н.	01.01.07
КАЛИТКИН Н.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
ЗМИТРЕНКО Н.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
АБРАМОВ А.А.	д.ф.-м.н.	01.01.07
ВАСИЛЕВСКИЙ Ю.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
ГОЛОВИЗНИН В.М.	д.ф.-м.н.	01.02.05
ЕЛИЗАРОВА Т.Г.	д.ф.-м.н.	01.02.05
КАРАМЗИН Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	01.02.05
ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
МАЖУКИН В.И.	д.ф.-м.н.	05.13.18
МИЛЮКОВА О.Ю.	д.ф.-м.н.	01.01.07
ПЕТРОВ И.Б.	д.ф.-м.н.	01.02.05
ФЛЁРОВ Ю.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
ЯКОВОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял следующее заключение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03 НА БАЗЕ  
ИНСТИТУТА ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им. М.В. Келдыша РАН НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 13 ноября 2014 г. № 10

О присуждении Любимову Дмитрию Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Анализ турбулентных струйных и отрывных течений в элементах ТРД комбинированными RANS/LES-методами высокого разрешения» по специальности 01.02.05– механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 24 апреля 2014г протокол № 3 диссертационным советом Д 002.024.03 на базе Федерального государственного учреждения науки Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл. д.4, приказ № 766-356 от 23 апреля 2010 года.

Соискатель Любимов Дмитрий Александрович, 1956 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка эффективных комбинированных RANS/LES-методов для расчета сложных турбулентных струй» защитил в 2008 году, в диссертационном совете, созданном на базе ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», работает начальником сектора «Инновационные численные технологии для исследования физических процессов в элементах СУ» отделения «Газовая динамика и теплообмен» ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

Диссертация выполнена в отделении «Газовая динамика и теплообмен» Федерального государственного унитарного предприятия «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

Научный консультант – доктор технических наук, Секундов Александр Николаевич, начальник сектора «Моделирование турбулентности и физических

процессов» отделения «Газовая динамика и теплообмен», ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» г. Москва,

Официальные оппоненты:

1. Козубская Татьяна Константиновна, Россия, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующая сектором отдела №16 в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва.
2. Гайфуллин Александр Марксович, Россия, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник НИО-2, ФГУП «ЦАГИ» (Центральный аэрогидродинамический институт) им. проф. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский Московской области.
3. Никитин Николай Васильевич, Россия, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией общей аэродинамики Государственного учебно-научного учреждения Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва.

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича» СО РАН, г. Новосибирск в своём положительном заключении, подписанном заведующим лабораторией экспериментальной аэрогазодинамики; доктором технических наук, профессором Запрягаевым Виктором Ивановичем и, старшим научным сотрудником лаборатории вычислительной аэродинамики, кандидатом физико-математических наук Кудрявцевым Алексеем Ивановичем, указала что:

«Диссертационная работа Д.А. Любимова выполнена на актуальную тему и посвящена численному моделированию сложных высокоскоростных турбулентных течений. В работе развивается и применяется подход, основанный на совместном использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-

Стокса (в английской терминологии – RANS, Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) и метода крупных вихрей (LES, Large Eddy Simulation) ... Комбинированный RANS/LES подход представляется сейчас наиболее мощным и работоспособным инструментом моделирования сложных турбулентных течений, встречающихся в современной технике. Поэтому важность и актуальность работы Д.А. Любимова несомненна ... Хотя в отечественной науке есть исследователи, работающие в данном направлении на очень высоком уровне (в первую очередь нужно назвать группу М.Х. Стрельца из СПбГПУ), в целом здесь наблюдается определенное отставание российской науки от мирового уровня. Настоящая диссертация – это важный шаг в преодолении данного отставания, она является крупным вкладом в разработку методологии использования современных методов численного моделирования турбулентных течений при решении практических задач и в создании соответствующих вычислительных инструментов. Одновременно в ней получено большое количество важных конкретных результатов по аэродинамике струйных и внутренних отрывных течений в различных элементах современных авиационных турбореактивных двигателей (ТРД) ... Степень апробации полученных результатов представляется вполне достаточной, они опубликованы в большом количестве статей, рассказывались на престижных отечественных и зарубежных научных форумах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации ... Считаем, что диссертация Любимова Д.А. полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», и ее автор, Любимов Дмитрий Александрович, безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.»

Соискатель имеет 60 опубликованных работ, из них по теме диссертации опубликовано 56 научных работ общим объемом 16.7 печатных листа, из них 15 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, а также 21 работа в зарубежных научных изданиях.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Любимов Д. А. Возможности использования прямых методов для численного моделирования турбулентных струй // *Аэромеханика и газовая динамика*. – 2003. – № 3. – С. 14-20.
2. Любимов Д.А. Разработка и применение эффективного RANS/ILES-метода для расчета сложных турбулентных струй // *ТВТ*. – 2008. – Т.46. – № 2. – С. 271-282.
3. Любимов Д.А. Исследование с помощью комбинированного RANS/ILES-метода влияния геометрии сопла и режима истечения на характеристики турбулентности выхлопных струй // *ТВТ*. – 2009. – Т.47. – № 3. – С. 412-422.
4. Любимов Д.А. Применение комбинированного RANS/ILES-метода для исследования отрывных пространственных турбулентных течений в криволинейных диффузорах // *ТВТ*. – 2010. – Т.48. – № 2. – С. 279-289.
5. Любимов Д.А. Исследование влияния струй с нулевым массовым расходом на течение в криволинейном диффузоре // *ТВТ*. – 2011. – Т.49. – № 4. – С. 557-567.
6. Любимов Д.А. Разработка и применение метода высокого разрешения для расчета струйных течений методом моделирования крупных вихрей // *ТВТ*. – 2012. – Т.50. – № 3. С. 450-466.
7. Любимов Д.А. Исследование влияния пилона и крыла с закрылками на течение в выхлопной струе двухконтурного турбореактивного двигателя методом моделирования крупных вихрей // *ТВТ*. – 2013. – Т.51. – № 1. – С. 120-137.

На автореферат диссертации поступили отзывы от:

1. Шалаева В. И., доктора физико-математических наук, профессора кафедры теоретической и прикладной аэромеханики ФАЛТ МФТИ. Отзыв положительный, замечание: «...частое и неоправданное использование английской аббревиатуры различных понятий, которые имеют совершенно ясный смысл в русском языке, что затрудняет чтение и понимание изложенных результатов...».

2. Емельянова В.Н., доктора технических наук, профессор, заведующего кафедрой плазмогазодинамики и теплотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» и Волкова К.Н., доктора физико-математических наук, Senior Lecturer Faculty of Science, Engineering and Computing, Kingston University, Friars Avenue, Roehampton Vale, London. Отзыв положительный, содержит следующие замечания. «... В автореферате не приведен исходный вид уравнений, которые решаются численно ... Из текста автореферата непонятно одна или разные системы уравнений используются при расчете сжимаемых и несжимаемых течений ... Не приведены результаты расчетов на последовательности расчетных сеток, позволяющие определить реальный порядок точности разностных схем ... Автор не высказал мнения о месте разработанных им средств численного моделирования среди других технологий и средств численного моделирования турбулентных течений...».

3. Исаева С.А., доктора физико-математических наук, профессора кафедры механики СПбГУ ГА, отзыв положительный, в нём отмечено, что «...Нет упоминания о предшествующих работах других авторов по теме диссертации ... Не указаны пределы применимости по числам Рейнольдса, Маха, Прандтля и др. ... Не указаны граничные условия на стенке ... Мало тестов и сравнения с известными в литературе результатами».

4. Курбацкого А.Ф., доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника лаборатории аэрофизических исследований дозвуковых течений ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск. Отзыв положительный, содержит рекомендацию присудить Любимову Д.А. степень доктора наук, замечаний не содержит.

5. Смирнова Е.М., доктора физико-математических наук, зав. кафедрой гидроаэродинамика ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет». Отзыв положительный, в нём, в частности, сказано « ...Не расшифрована фраза «Для расчета несжимаемых течений предложен вариант метода DES». Чем предложенный вариант отличается от формулировки Спэларта

и др. 1997г? ... Формальное обнуление расстояния до стенки, приводящее к нулевой турбулентной вязкости в зоне ILES вряд ли можно расценивать как модификацию модели Спэларта-Аллмараса ... Неудачное использование термина «нерегулярные сетки» ... Недостаточно точно определено понятие «численного перехода» ... Нет детальных параметров нестационарного пограничного слоя на срезе сопла при расчетах с помощью WMILES ... Из текста реферата неясно, наблюдалась ли прецессия азимутальных неоднородностей в кольцевом диффузоре ...».

6. Циркунова Ю. М., доктора физико-математических наук, профессор, профессора кафедры плазмогазодинамики и теплотехники, руководителя группы по исследованию двухфазных течений Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Отзыв положительный, приведем замечания « ... Автор использует при замыкании уравнений Рейнольдса (в RANS-подходе) модель турбулентности Спаларта–Алмараса, правильно отмечая, что эта модель хорошо описывает пристеночные пограничные слои и проста в реализации. Однако во многих внутренних течениях, особенно когда происходит отрыв потока и образование слоев смешения, значительно чаще используются другие модели и, прежде всего,  $k-\omega$  SST-модель Ментера [частное сообщение представителей компании Pratt&Whitney]. То же относится и к течению в выхлопных струях. В этой связи интересно было бы сравнить полученные в работе результаты с расчетами по другим моделям. Кстати, подобное пожелание относится и к сравнению используемой автором SGS-модели для подсеточной вязкости в LES-подходе с другими моделями ... Основным же вопросом, который, на мой взгляд, все же остается в определенной мере открытым – это вопрос о том, что же с точки зрения газодинамики течений принципиально не позволяет (кроме, конечно, спектров турбулентности и акустического излучения) моделировать RANS-подход в рассмотренных задачах и почему. И в каких случаях требуется обязательное обращение к LES и DNS-подходам?».

Выбор официальных оппонентов обоснован их высокой компетенцией в вопросах исследования сложных турбулентных течений, которые были рассмотрены в диссертации. Выбор ИТПМ СО РАН в качестве ведущей организации обоснован тем, что этот институт хорошо известен своими численными и экспериментальными исследованиями в области турбулентных течений различных типов, именно эта организация способна определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: **разработаны** по сути два новых оригинальных метода моделирования турбулентности, применяемых в численном моделировании сложных многомерных течений в ТРД ( для расчета несжимаемых течений предложен новый вариант метода DES, для сжимаемых течений созданы RANS/ILES- и WMILES-методы с неявной подсеточной моделью турбулентности); **предложена** численная реализация граничных условий в дальнем поле затопленных струй, позволившая повысить точность расчетов и сократить радиальные размеры расчетной области; **доказана** перспективность использования разработанных RANS/LES- и WMILES-методов высокого разрешения для расчета сложных течений в элементах ТРД, впервые **получен** ряд важных фундаментальных и прикладных результатов в аэромеханике;

**применение** совместного расчета течения в сопле и струе обеспечило приемлемое совпадение с экспериментальными данными по параметрам течения и турбулентности при расчетах до- и сверхзвуковых струй из сопел разных типов; **установлено**, что при расчете дозвуковых струйных течений RANS/ILES-метод с предложенной автором схемой пятого порядка аппроксимации обеспечивает достаточную для практических приложений точность расчетов, а для сверхзвуковых течений со скачками уплотнения применение схемы автора девятого порядка позволяет ещё раз значительно улучшить точность расчетов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: **доказана** эффективность **применения** RANS/LES-методов для расчета сложных турбулентных течений в элементах ТРД, особенности которых определяются

крупными турбулентными вихрями, которые не удастся описать с достаточной точностью с помощью RANS с традиционными моделями турбулентности; был описан «переворот осей» в прямоугольной струе и трансверсальное растекание пристеночной струи, вытекающей из круглого сопла, получены значения корреляций скорости для указанных струй, **разработаны и апробированы** оригинальные подходы к заданию граничных условий на входе в сопло с помощью турбулизации потока, получающейся при обтекании обратного уступа, что позволило повысить точность расчета течения в слое смешения струи около среза сопла, **доказана** неустойчивость отрывных турбулентных течений в диффузорах в элементов ТРД, перехода двумерного течения на входе в него в трехмерное на выходе из диффузора, **доказана** эффективность моделирования генератора синтетических струй с помощью модифицированного граничного условия на стенке диффузора при исследовании влияния синтетических струй на отрывные турбулентных диффузоры в элементах ТРД.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** вихреразрешающие подходы: для расчета несжимаемых течений метод DES в сочетании с методом искусственной сжимаемости, а для дозвуковых и сверхзвуковых течений RANS/ILES метод высокого разрешения; **изложены** основные факторы влияния компоновки на течение в выхлопной струе двухконтурного ТРД, влияния малых отклонений геометрии сопла от симметрии на течение в его выхлопной струе, физический механизм воздействия «аэродинамических шевронов» на течение в струе из двухконтурного сопла ТРД, особенности влияния неоднородного полного давления на входе в диффузоры с отрывом потока на течение в нем, **подтвержден** механизм влияния синтетических струй на отрывные турбулентные течения в диффузорах; **раскрыта** непригодность использования RANS и традиционных моделей турбулентности для расчета ряда практически значимых течений в элементах ТРД, особенности которых определяются крупными турбулентными вихрями: течения в свободной струе из прямоугольного сопла и в пристеночной струе из круглого сопла, отрывных турбулентных течений в диффузорах; **раскрыта** причина подъема

шума на высоких частотах в шевронных соплах определенного типа, который наблюдался в эксперименте; **изучено** влияние режимных параметров и геометрии сопел, том числе и при наличии компоновки, на течение и параметры турбулентности в струях из них, **изучена** эффективность применения синтетических струй для управления отрывными турбулентными течениями в диффузорах; **проведена модернизация** метода Роу, позволившая снизить его схемную вязкость, повысившая эффективность RANS/ILES-метода при расчетах на грубых сетках.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: **разработаны** эффективные вихререзающие технологии: вариант метода DES, RANS/ILES-, WMILES-методы, позволившие проводить на экономичных сетках расчеты сложных турбулентных течений в элементах ТРД, с достаточной для практических приложений точностью; **определено** влияние малых изменений геометрии сопла двухконтурного ТРД на течение и параметры турбулентности в выхлопной струе из него, **определены** границы применимости синтетические струи для подавления отрыва в диффузорах в элементах ТРД; **создана** эффективная модель для описания генератора синтетических струй с помощью модифицированных граничных условий на стенке диффузора, что позволило избежать затратного расчета течения в полости генератора синтетических струй, простая и эффективная модель для создания турбулентного течения на входе в сопло; **представлены** рекомендации по выбору геометрии, положения щелей для выхода синтетических струй и их режимных параметров, позволившие улучшить характеристики течения в криволинейных диффузорах с отрывом потока в элементах ТРД, в том числе в укороченном «агрессивном» кольцевом межтурбинном диффузоре.

Оценка достоверности результатов исследования **базируется** на использовании физически обоснованных методов математического моделирования турбулентных течений жидкости и газа, применением эффективных численных методов, проведением тестовых и методических расчетов, корректной постановкой граничных условий, отражающих особенности

исследуемых течений; **использованы** результаты сравнения разработанных методов с экспериментальными данными для струйных течений разных типов: пристеночных струйных течений, дозвуковых и нерасчетных сверхзвуковых струй из сопел разных типов, для отрывных течений в криволинейных диффузорах, типичных для элементов ТРД, с расчетами других авторов, выполненных с помощью LES и RANS/LES-методов; **установлено**, что результаты расчетов для всех исследованных течений хорошо согласуются с экспериментальными данными. Сравнение с результатами расчетов других авторов, выполненных с помощью LES или RANS/LES-методов, **показало**, что в большинстве случаев удается достигнуть такой же точности на сетках с числом ячеек в несколько раз меньше, при этом точность расчета параметров турбулентности предложенными методами в большинстве случаев выше.

**Личный вклад соискателя** состоит в: **разработке** методов RANS для расчета несжимаемых и сжимаемых течений, которые были положены в основу DES и RANS/ILES и WMILES-методов, представленных в диссертации, создании и отладке компьютерных кодов, выполнении тестовых расчетов, **обосновании** выбора элементов численного моделирования уравнений Навье-Стокса и скалярных уравнений переноса при создании варианта метода DES, RANS/ILES- и WMILES-методов, написании и отладке кодов, их тестировании для большинства струйных течений, а также отрывных течений в диффузорах и исследовании влияния синтетических струй на отрывные течения в элементах ТРД. Анализ и трактовка представленных в диссертации результатов выполнены лично соискателем. Научные публикации были подготовлены лично соискателем, либо в составе авторского коллектива на паритетной основе.

На заседании 13 ноября 2014 года диссертационный совет принял решение присудить Любимову Дмитрию Александровичу ученую степень доктора физико-математических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов наук по специальности представленной диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек,

входящих в состав совета, проголосовали: за 18, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель диссертационного совета

Четверушкин Борис Николаевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

Змитренко Николай Васильевич

14 ноября 2014 года