

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ФГБОУ ВО  
«Национальный исследовательский  
университет «Московский энергетический  
институт»



Драгунов В.К.

“23” декабря 2016 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»**

**на диссертационную работу**

**Борисова Виталия Евгеньевича**

**«Разработка параллельного неявного метода решения задач динамики вязкого  
сжимаемого газа», представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 05.13.18 –  
«Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ»**

**Актуальность работы.** В настоящее время без численного моделирования невозможно решение практически любой значимой инженерной задачи газовой динамики. Постоянное усложнение математических моделей и рост возможностей вычислительных систем приводит к необходимости создания соответствующих численных методов, которые позволили бы находить решение за разумное время. Разработке одного из таких методов и посвящена данная диссертационная работа.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Работа представлена на 93 страницах, список литературы включает 99 наименований.

**Во введении** сформулированы цели работы, обоснована ее актуальность, представлены новизна и защищаемые положения. Дан краткий обзор литературы по теме диссертационной работы.

**В первой главе** представлена используемая для описания динамики вязкого сжимаемого газа математическая модель. Приведена система нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса URANS с источником членом в уравнении энергии, а также уравнение модели турбулентности Спаларта–Аллмараса. Представлена дискретизация уравнений математической модели, а также используемые и разработанные алгоритмы для их решения. В частности, подробно описан неявный метод на основе алгоритмов LU-SGS и BiCGStab.

**Вторая глава** посвящена описанию разработанного и реализованного автором программного комплекса, предназначенного для работы на высокопроизводительных вычислительных системах. Представлены особенности программной реализации параллельных алгоритмов. В качестве валидационных расчетов проведено:

- 1) Моделирование трансзвукового обтекания крыла ONERA M6. Показано соответствие с данными натурального эксперимента.
- 2) Моделирование перехода между регулярным и маховским отражением ударных волн, генерируемых помещенными в сверхзвуковой поток газа симметричными клиньями. Переход инициировался лазерным импульсом, который моделировался автором с помощью энерговыделения в поток. Результаты расчетов сравнивались с данными, опубликованными в литературе.

На указанных задачах проведено исследование масштабируемости созданного программного комплекса, показана высокая эффективность разработанных параллельных алгоритмов.

**В третьей главе** приведены результаты применения созданного программного комплекса для численного моделирования различных режимов работы воздухозаборника прямого воздушного реактивного двигателя. Получены как стационарные, так и нестационарные типы течений. Показано существенное влияние толщины пограничного слоя на входе в воздухозаборник на положение ударно-волновой структуры в псевдоскачке. Проведено исследование влияния на течение инициируемого энерговыделением противодавления на выходе из воздухозаборника, смоделирован режим «незапуска воздухозаборника». При этом были разработаны и реализованы:

- 1) модель для построения характеристик пограничного слоя заданной толщины;
- 2) согласованная модель энергоисточника, отображающая работу камеры сгорания, основанная на расходе топлива и окислителя.

**В заключении** четко сформулированы основные результаты диссертационной работы, полученные в ходе ее выполнения.

**Научная новизна работы** состоит в разработанном параллельном неявном методе на основе алгоритмов LU-SGS и BiCGStab для системы URANS с источником в уравнении энергии, для замыкания которой использована модель турбулентности Спаларта–Аллмараса. Разработан и реализован параллельный программный комплекс для моделирования трехмерных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа, в том числе течений с энерговложением в поток, на высокопроизводительных вычислительных системах. В процессе расчетов подтверждены его эффективность и масштабируемость. В результате проведенного моделирования различных режимов работы воздухозаборника прямого воздушного реактивного двигателя показано существенное влияние толщины пограничного слоя на положение и характер ударно-волновой структуры в псевдоскачке, а также влияние инициируемого энерговложением противодавления на возможность выхода на нерасчётные режимы работы воздухозаборника.

**Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов** обеспечены строгостью использованного математического аппарата и подтверждены результатами численного моделирования, их согласованностью с данными работ других авторов и данными экспериментальных исследований.

**Практическая и научная ценность работы** определяется тем, что разработанные автором неявный метод и параллельный программный комплекс использованы при решении современных задач газовой динамики, обладающих сложной структурой и большой размерностью. Результаты работы могут быть использованы в теоретических и прикладных исследованиях, проводимых в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова, Национальном исследовательском университете «МЭИ», Центральном институте авиационного

моторостроения им. П.И. Баранова, ИППИМ им. С.А. Христиановича СО РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана и других организациях, в которых решаются задачи по теме данной диссертационной работы. Кроме того, результаты диссертации могут быть включены в специализированные учебные курсы по разностным схемам для задач газовой динамики.

В то же время по диссертационной работе следует сделать несколько **замечаний**:

1) Следовало бы более полно мотивировать выбор использованной автором математической модели URANS уравнений и модели турбулентности Спаларта–Аллмараса для рассматриваемого класса задач.

2) Недостаточное внимание уделено описанию псевдо-временной переменной, ее назначению и конкретным значениям при проведении расчетов.

3) Было бы желательно более подробно описать структуру используемых расчетных сеток и геометрию соответствующих ячеек, используемых при дискретизации уравнений.

Подчеркнем, что указанные замечания не снижают научной значимости и практической ценности полученных в работе результатов. Диссертация выполнена на весьма высоком научном уровне.

В данной диссертационной работе присутствуют все компоненты математического моделирования, такие как построение и модификация моделей, разработка численных алгоритмов, их реализация и проведение вычислительных экспериментов. Диссертант показал свою высокую научную квалификацию математика и программиста, успешно выполнив поставленные задачи. Диссертационная работа посвящена актуальной теме, ее результаты обладают научной новизной и практической значимостью.

Автореферат полно отражает основное содержание диссертации.

Все результаты диссертационной работы были опубликованы в ведущих научных изданиях, соответствующих требованиям ВАК РФ, а также прошли апробацию на многих конференциях и научно-технических семинарах.

Таким образом, диссертационная работа Борисова В.Е. является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем

требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Борисов Виталий Евгеньевич, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором Амосовым А.А.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры математического моделирования «НИУ «МЭИ» 22 декабря 2016 г., протокол №4.

Заведующий кафедрой  
математического моделирования  
ФБГОУ ВО «НИУ «МЭИ»  
д.ф.-м.н., профессор  
[AmosovAA@mpei.ru](mailto:AmosovAA@mpei.ru)



Амосов Андрей Авенирович

Ученый секретарь  
к.ф.-м.н., доцент  
[VestfalskyAY@mpei.ru](mailto:VestfalskyAY@mpei.ru)



Вестфальский Алексей Евгеньевич

111250, Москва, Красноказарменная ул. 14,

Тел. +7 495 362-77-72