

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Казахский национальный университет имени аль-Фараби

УДК 519.6: 532.517.4

На правах рукописи

ЖУБАТ КУАНЫШ ЖАЙЛАУБАЙУЛЫ

**Численное моделирование крупных динамических неоднородностей
техногенного происхождения в атмосфере**

Диссертация на соискание академической степени доктора философии (PhD)
в области математики по специальности – математическое и компьютерное
моделирование

Научные руководители:
доктор технических наук,
профессор, академик
Жумагулов Б.Т.,
доктор физико-математических
наук,
профессор Абдибеков У.С.,
доктор PhD Жакебаев Д.Б.
доктор естественных наук,
профессор Кемо Ханжалик

Республика Казахстан
Алматы, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА НА ОСНОВЕ ОСРЕДНЕННЫХ ПО РЕЙНОЛЬДСУ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА.....	8
1.2 Принципы применения методов математического моделирования.....	8
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЕРЦИОННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА КРУПНЫХ ВИХРЕЙ.....	13
2.1 Основные уравнения.....	13
2.2 Граничные условия.....	14
2.3 Приведение уравнений к безразмерному виду.....	14
2.4 Численный алгоритм решения с использованием компактных схем...16	16
2.5 Расчет поля концентрации.....	21
2.6 Результаты моделирования.....	25
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ ПРИ ДРЕНАЖЕ В ВЕРХНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ RANS МЕТОДА.....	41
3.1 Осредненное по Рейнольдсу уравнение Навье-Стокса.....	41
3.2 Математическая модель.....	56
3.3 Модель турбулентной атмосферы.....	57
3.4 Расчет поля вектора скорости.....	63
3.5 Расчет температуры и концентрации.....	70
3.6 Результаты численного моделирования.....	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	102

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы. Данная работа посвящена математическому и численному моделированию процессов генерации и эволюции крупномасштабных неоднородностей в средней атмосфере и созданию программных комплексов для прогнозирования воздействия техногенных возмущений на динамику стратосферы.

Актуальность проблемы. Ракетно-космическая деятельность (РКД), которая в последние годы так интенсивно развивается в Республике Казахстан, породила огромное количество проблем и стала привлекать внимание не только специалистов, но и широкие слои населения. Как известно, негативным моментом РКД относится, прежде всего, загрязнение окружающей среды отделяющимися деталями ракетносителей, а также токсическими компонентами ракетного топлива (гептил и его производные, азотный тетраоксид и др.). При этом происходят сверхмощные пиковые воздействия, залповые выбросы тепловой энергии и опасных веществ, загрязнение окружающей среды ракетно-космическим мусором и ядовитым ракетным топливом, причем, как жидким, так и твердым.

Все стадии цикла РКД, могут представлять экологическую опасность, что зачастую определяет очень большие, фактически, глобальные, масштабы проблемы. В первую очередь, это непосредственное загрязнение окружающей среды токсичными компонентами самого ракетного топлива, а также продуктами его горения. Так при запуске ракетносителя «Протон» только плановый выброс в атмосферу остатков неотработанного гептила из 1-й и 2-й ступеней составляет 2,7 тонны, а в случае аварии ракетносителя в атмосферу выбрасываются десятки тонн этого высокотоксичного горючего. В приземном слое атмосферы высотой до 1 километра, выбросы, образующиеся при стартах космических кораблей, могут приводить к токсичному загрязнению облаков, выпадению кислотных дождей и изменениям погодных условий в районе старта на территории до 200 квадратных километров. При этом сильные турбулентные потоки в атмосфере приводят к быстрому перемешиванию выброшенных химических компонентов с большими объемами воздуха и распространению их на большие расстояния.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые реализованы полуэмпирические модели для пульсационных составляющих и корреляций полей концентрации, температуры и динамического поля.

В работе получены следующие новые результаты:

– проведено моделирование инерционного турбулентного распространения примеси в направлении движения ракетносителя с учетом образования аэрозольного облака на основе метода крупных вихрей;

– проведено численное моделирование на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса распространения примеси в средней атмосфере в следе ракетносителя. На основе моделирования определено влияние динамического поля на стратосферу;

- проведено моделирование турбулентного распространения остаточного ракетного топлива первой ступени ракетносителя при дренаже в верхней стратосфере на основе комбинированного RANS/LES метода;
- разработан модифицированный метод дробных шагов при использовании компактных схем с разностями против потока на разнесенной сетке;
- реализована полуэмпирическая модель турбулентности для замыкания уравнений Рейнольдса в присутствии внешних сил;
- разработан численный алгоритм решения уравнения динамики атмосферы.

Предмет исследования. В работе изучаются закономерности изменения параметров атмосферы – крупномасштабные возмущения в средней атмосфере, появляющиеся в результате взаимодействия этих слоев с продуктами горения ракетного топлива.

Цель исследования – разработка математических моделей генерации и эволюции крупномасштабных неоднородностей в средней атмосфере; моделирование влияния внешних факторов и техногенных возмущений на динамические процессы в стратосфере. Моделирование крупных динамических неоднородностей техногенного происхождения в атмосфере. Моделирование распространения компонентов ракетного топлива в средней атмосфере в следе ракетносителя на базе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса; моделирование распространения остаточного ракетного топлива первой ступени ракетносителя при дренаже в верхних слоях атмосферы, с целью определения зоны его распространения на основе метода крупных вихрей.

Задачи исследования:

- моделирование инерционного распространения аэрозольного облака на основе метода крупных вихрей;
- моделирование распространения остаточного ракетного топлива первой ступени ракет-носителей при дренаже в верхней стратосфере на основе комбинированного RANS/LES метода;
- моделирование распространения примеси в средней атмосфере в следе ракетносителя на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса.

Объектом исследования является влияние крупных атмосферных неоднородностей техногенного происхождения на турбулентную структуру средней атмосферы.

Положения, выносимые на защиту:

- сформулирован и построен метод крупных вихрей для исследования инерционного турбулентного распространения примеси;
- математическая модель на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса распространения примеси в средней атмосфере в следе ракетносителя;
- математическая модель турбулентного распространения остаточного ракетного топлива первой ступени ракетносителя при дренаже в верхней стратосфере на основе комбинированного RANS/LES метода;
- модифицированный метод дробных шагов, с использованием компактных схем с разностями против потока на разнесенной сетке;

– полуэмпирическая модель турбулентности для замыкания уравнений Рейнольдса в присутствии внешних сил.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертационной работы определяется использованием фундаментальных законов сохранения количества движения, энергии, вещества и непрерывности при построении математических моделей, удовлетворительным согласием полученных результатов с известными экспериментальными и теоретическими данными.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Полученные в диссертации результаты увеличивают потенциальные возможности для моделирования турбулентных атмосферных течений, поскольку предложенный метод крупных вихрей позволяет исследовать турбулентные течения с существенно более высокими числами Рейнольдса, что особенно важно для задач космических исследований.

Предложен эффективный численный алгоритм с использованием компактных схем для конвективных и диффузионных членов уравнений динамики атмосферы. Полученные в работе результаты, используются для научной оценки экологических проблем связанных с эксплуатацией космодрома «Байконур» (Акт № 01-13/711 06.11.2013г.). Результаты исследований атмосферной турбулентности также могут быть использованы для прогнозирования влияния техногенных возмущений на динамические характеристики средней атмосферы.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

- Научно-практическая конференция «Актуальные проблемы естествознания, физико-математических наук, экологии и информационных технологий». – Атырау, 2010;
- Third Congress of the world mathematical society of Turkic countries. – Almaty, – Kazakhstan, – 2009;
- Научно-практическая конференция «Обеспечение экологической безопасности ракетно-космической деятельности». – Россия, – Москва, – 2011;
- Moderní vymoženosti vědy, MEZINÁRODNÍ VĚDECKO – PRAKTICKÁ KONFERENCE – Praha, – 2011, – №6, – С.11-16;
- European Turbulence Conference 14.– 2013.ENS Lyon, France.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 18 научных работах. В совместных работах Жумагулову Б.Т. принадлежат постановки задач и руководство работой.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения и списка использованных источников из 77 наименований. Работа изложена на 102 страницах, содержит 60 иллюстраций.