

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.....	5
1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА НА ОСНОВЕ ОСРЕДНЕННЫХ ПО РЕЙНОЛЬДСУ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА .....	8
<b>1.1 Выбор направления исследования и его обоснование.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 Принципы применения методов математического моделирования ..</b>	<b>12</b>
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЕРЦИОННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА КРУПНЫХ ВИХРЕЙ ...	13
<b>2.1 Основные уравнения.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Граничные условия.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Приведение уравнений к безразмерному виду .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4 Численный алгоритм решения с использованием компактных схем</b>	<b>16</b>
<b>2.5 Расчет поля концентрации .....</b>	<b>21</b>
<b>2.6 Результаты моделирования.....</b>	<b>25</b>
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ ПРИ ДРЕНАЖЕ В ВЕРХНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ RANS МЕТОДА.....	41
<b>3.1 Осредненное по Рейнольдсу уравнение Навье-Стокса .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2 Математическая модель.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3 Модель турбулентной атмосферы.....</b>	<b>57</b>
<b>3.4 Расчет поля вектора скорости.....</b>	<b>63</b>
<b>3.5 Расчет температуры и концентрации .....</b>	<b>70</b>
<b>3.6 Результаты численного моделирования .....</b>	<b>73</b>
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	102

## НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертационной работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7.1-84 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическое описание документа. Общие требования и правила оформления.

ГОСТ 7.9-95 (ИСО214-76) Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация. Общие требования.

ГОСТ 7.12-93 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращения слов на русском языке. Общие требования и правила.

ГОСТ 7.32-2001 Межгосударственный стандарт. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 8.417-81 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$u_r, u_\varepsilon, u_\theta$	компоненты скорости в физической области
$u'_r, u'_\varepsilon, u'_\theta$	пульсационные составляющие скорости
$u_1, u_2, u_3$	компоненты скорости в вычислительной области
$u'_i$	пульсационные составляющие скорости
$\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3$	осредненные компоненты скорости
$p$	Давление
$\mu$	кинематическая вязкость
Re	число Рейнольдса
$t$	Время
$\tau$	безразмерное время
$\Delta\tau$	шаг по времени
$\delta_{ij}$	символ Кронекера
$\tau_{i,j}$	тензор скоростей деформации
$C_S$	коэффициент Смагоринского
$\Delta$	характерная длина фильтра
$\Delta x_1, \Delta x_2,$	шаг по вычисляемой сетке в направлении соответствующей оси $(x_1, x_2, x_3)$
$N_1, N_2, N$	количество узлов в направлении соответствующей оси $(x_1, x_2, x_3)$
$r, \varepsilon, \theta$	координаты физической области
$r$	Радиус
$\varepsilon$	радиальный угол
$\theta$	кольцевой угол
$R$	радиус кривизны
$x_1, x_2, x_3$	координаты вычислительной области
$\Phi$	диссипативная функция
$\nabla$	оператор набла
$\phi$	произвольный скаляр
$U$	произвольный вектор
$\Pi_{x_i x_j}$	Оператор
$\mathcal{Q}_{x_i x_j}$	Оператор
$H$	Высота

## 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 vedy, 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.