|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  **«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ**  **(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»** | | | | |
| **Журнал практики** | | | | |
| Институт № 8 | «Компьютерные науки и прикладная математика» | | | | |
|  |  | | | | |
| Кафедра | 806 | | Учебная группа | М8О-207М-23 | | |
|  |  | |  |  | | |
| ФИО обучающегося | | Садаков Александр Александрович \_ | | |
|  | |  | | |
| Направление подготовки/  специальность | | \_\_02.04.02 Фундаментальная информатика и информационные технологии \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | | |
|  | | *шифр, наименование направления подготовки/специальности* | | |
|  | |  | | |
| Вид практики | | \_преддипломная \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | | |
|  | | *учебная, производственная, преддипломная или другой вид практики* | | |
| Оценка за практику | | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | | |

Москва

2025

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1. **Место и сроки проведения практики:** | | |
| Наименование организации: | \_\_кафедра 806\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | |
| Сроки проведения практики |  | |
| дата начала практики: | 10.02.2025 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | |
| дата окончания практики: | 10.05.2025 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | |
| 1. **Инструктаж по технике безопасности:** | | |
| \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | /\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/ | \_ \_ \_\_ \_\_ 2025 г. |
| *подпись проводившего* | *расшифровка подписи* | *дата проведения* |
| 1. **Индивидуальное задание обучающегося:** | | |
| Разработка программы для моделирования течения спутных струй газа и интеграция в неё системы химических уравнений горения газа. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | | |
| 1. **План выполнения индивидуального задания обучающегося:** | | |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **Место проведения** | **Тема** | **Период выполнения** |
| 1 | Кафедра 806 | Инструктаж | 10.02.2025-18.02.2025 |
| 2 | Кафедра 806 | Анализ математической модели турбулентного потока | 19.02.2025-10.03.2025 |
| 3 | Кафедра 806 | Разработка модуля для моделирования турбулентных течений | 11.03.2025-9.04.2025 |
| 4 | Кафедра 806 | Тестирование на модельных задачах | 10.04.2025-14.04.2025 |
| 5 | Кафедра 806 | Интеграция разработанного модуля решателя хим. кинетики | 15.04.2025-19.04.2025 |
| 6 | Кафедра 806 | Оформление диплома | 20.04.2025-04.05.2025 |
| 7 | Кафедра 806 | Оформление отчётов | 05.05.2025-10.05.2025 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Утверждаю** | | |
| \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | /\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/ | \_ \_ \_\_ \_\_ 2025 г. |
| *подпись руководителя от МАИ* | *расшифровка подписи* | *дата утверждения* |
| \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | /\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/ | \_ \_ \_\_ \_\_ 2025 г. |
| *подпись руководителя от организации/предприятия* | *расшифровка подписи* | *дата утверждения* |
| **Ознакомлен** | | |
| \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | / / | \_ \_ \_\_ \_\_ 2025 г. |
| *подпись обучающегося* | *расшифровка подписи* | *дата ознакомления* |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1. **Отзыв руководителя практики от организации/предприятия:** | | |
| В представленную дипломную работу включены задачи решения моделирования течения спутных струй газа с использованием дифференциальных уравнений в частных производных с известными начальными значениями. Турбулентность остается одним из наиболее сложных объектов исследования механики жидкости и газа. За почти столетнюю историю ее изучения предложены десятки различных подходов, почти всегда отражающие наиболее активно развиваемые перспективные направления математики и физики соответствующего периода времени. Статистическая физика и теория вероятности, теория размерности, математический анализ и прямые численные методы, теория динамических систем, теория фракталов — вот далеко не полный перечень областей науки, которые давали основные идеи исследователям турбулентности. Несмотря на многообразие примененных в работе численных методов, в работе можно усмотреть некоторые недостатки. Например, парсер входных параметров для задачи не обладает достаточной автоматизацией. Так же присутствуют некоторые алгоритмические ошибки в итерационном решателе задач. В работе также не хватает отлаженных связей с базой данных химических компонент и химических реакций. Работа заслуживает оценки отлично.\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | | |
| \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | /\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/ | 202 г. |
| *подпись руководителя от организации/предприятии* | *расшифровка подписи* | *дата* |

|  |
| --- |
| 1. **Отчет обучающегося по практике:** |

Объектом разработки является программа, позволяющая моделировать турбулентные и ламинарные течения с неравновесным химическим процессом.

Цель работы – разработка и отладка программы, выбор оптимальных методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений и моделирования турбулентных течений.

В процессе работы были использованы явные и неявные методы Рунге-Кутты, метод QR и LU разложения матрицы, методы итераций, Зейделя и Ньютона для решения систем нелинейных алгебраических уравнений, метод Кранка-Николоса.

В результате работы была создана программа, позволяющая моделировать газодинамические процессы, а так же решать уравнения химической кинетики и решать СДУ при помощи большой коллекции методов.

Для аппроксимации исходной системы уравнений [6; 7] при моделировании течения спутных струй выбран неявный шеститочечный шаблон типа Кранка-Николсона с весами. Решение полученной системы нелинейных алгебраических уравнений определяется методом Гаусса.

Обыкновенные дифференциальные уравнения и системы дифференциальных уравнений широко используются для математического моделирования процессов и явлений [1] в различных областях науки и техники. Переходные процессы в радиотехнике, динамика биологических популяций, модели экономического развития, движение космических объектов и так далее исследуются с помощью ОДУ и СДУ.

Для корректного моделирования струйных течений необходимо точное задание начальных профилей параметров потока на входе в расчетную область. В работе используется ступенчатый профиль [5; 8]. Ввод данных происходит посредством чтения таблицы профильных величин из тестового файла и чтения нулевых значений для перевода из профильных величин в физические. Сами по себе профильные величины позволяют уменьшить вероятность возникновения ошибки при вычислении больших значений, а значит — повысить стабильность схемы, что будет продемонстрировано в следующем разделе во время тестирования. Стоит отметить, что данный приём используется для параболизованной системы уравнений. Для полной системы Навье-Стокса при прямом вычислении все переменные записываются сразу в физических величинах.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана и реализована параболизированная модель струйных течений, позволяющая существенно сократить вычислительные затраты при сохранении приемлемой точности расчетов. Показано, что в области развитого течения (x/d > 10) погрешность модели не превышает 5 − 8% по сравнению с полной системой уравнений Навье-Стокса и экспериментальными данными;
2. Создано программное обеспечение, дополненное модулями для расчета химической кинетики. Программа обеспечивает:
   1. Моделирование многослойных струйных течений;
   2. Учет сложных механизмов химических реакций;
   3. Визуализацию полей скорости, температуры и концентраций;
3. Проведена верификация модели на ряде тестовых случаев, включая:
   1. Сравнение с экспериментальными данными по структуре турбулентных струй;
   2. Анализ чувствительности к параметрам турбулентности и химической кинетики;
   3. Оценку погрешностей в различных областях течения;
4. Выявлены границы применимости параболизированного подхода:
   1. Модель дает хорошие результаты для дальнего поля струи (x/d > 10);
   2. Требует осторожного применения в зонах с обратными течениями;
   3. Эффективна для инженерных расчетов при ограниченных ресурсах;
5. Разработан пользовательский интерфейс для отображения результатов в удобном виде.

Отдельно стоит уделить внимание модулю для работы с СДУ при 56 помощи множества методов семейства Рунге-Кутты [2; 3; 4]. В работе реализовано 62 схемы со 2 по 6 порядок точности. Из них 18 явных со 2 по 6 порядок точности, 9 вложенных, включая схему Дормана-Принса 4(5) порядка, 22 неявных, в том числе схемы Радо, Гаусса и Лобатто для полных и неполных матриц. Помимо этого, протестирован один L-стабильный диагональный метод. Для неявных схем используются схемы решения САУ первого порядка (простой итерации, Зейделя) и второго порядка (метод Ньютона), причём для обращения матрицы применялся метод LU-разложения. Для дифференцирования функции при построении матрицы Якоби для метода Ньютоны использовались формулы с 4 порядком точности. При необходимости можно использовать формулы с меньшим порядком.

Перспективы дальнейших исследований:

* Внедрение более точных моделей турбулентного горения;
* Учёт радиационного теплообмена;
* Оптимизация вычислительных алгоритмов для работы с большими химическими механизмами;
* Разработка гибридных методов, сочетающих параболизированный подход с полным CFD-моделированием в критических областях.

Практическая значимость работы заключается в создании инструмента для инженерных расчетов реактивных струй, который может быть использован при проектировании двигательных установок, систем сгорания и других устройств, где важны точные прогнозы параметров течения с химическими реакциями.

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует возможность эффективного моделирования сложных неравновесных процессов в струйных течениях при разумных вычислительных затратах, что открывает перспективы для дальнейшего совершенствования методов численного анализа в этой области.

1. Hairer E., Norsett S., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems. Т. 8. — 01.1993. — ISBN 978-3-540-56670-0. — DOI: 10.1007/978-3-540-78862-1.
2. Пошивайло И. П. Жёсткие и плохо обусловленные нелинейные модели и методы их расчета // Инноватика - 2020 : сборник материалов XVI Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 23-25 апреля 2020 г., г. Томск, Россия. Томск. — 2014.
3. Леонов В. В. Самохина С. И. Исследование на жесткость системы обыкновенных дифференциальных уравнений, соответствующей математической модели деформационного упрочнения сплавов со сверхструктурой L12 // Инноватика - 2020 : сборник материалов XVI Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 23-25 апреля 2020 г., г. Томск, Россия. Томск. — 2020. — С. 384—387.
4. John C. Butcher. Numerical methods for ordinary differential equations: early days // The Birth of Numerical Analysis / под ред. A. Bultheel, R. Cools. — World Scientific, 2009. — С. 35—44. — DOI: 10 . 1142 / 9789812836267 \ \_0003. — URL: https://doi.org/10.1142/9789812836267%5C\_0003.
5. Шец Дж. Турбулентное течение. Процессы вдува и перемешивания.— М., Мир, 1984. — С. 241. — DOI: 10.7868/S0044466915030114.
6. Hairer E., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations II. Stiff and Differential-Algebraic Problems. Т. 14. — 01.1996. — DOI: 10.1007/978-3-662-09947-6.
7. Скворцов Л. М. Диагонально-неявные методы Рунге–Кутты для жестких задач // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. — 2006. — Т. 46, № 12. — С. 2209—2222. — DOI: 10.1134/S0965542506120098.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. —М.,Наука,1974.—С.711.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | / Садаков А.А. / | 2025 г. |
| *подпись обучающегося* | *расшифровка подписи* | *дата* |