

Министерство образования Московской области

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ  
«ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 004.35  
№ госрегистрации АААА-А15-115120850115-4  
Инв. №



УТВЕРЖДАЮ  
Директор «МГОТУ»

Г.Е. Старцева

«15» 12 2015г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Приказ от «01» декабря 2015 г. № 01-04/367

по теме:

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРОВ, ИСПОЛЗУЕМЫХ В КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ  
(заключительный)

Руководитель НИР,  
д.э.н., к.т.н., профессор


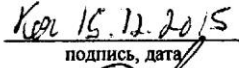

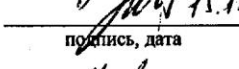

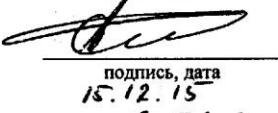
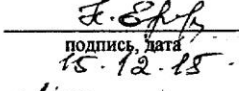
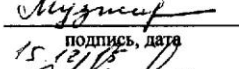
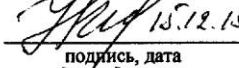
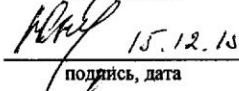
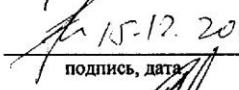

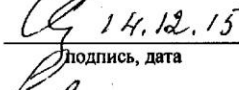
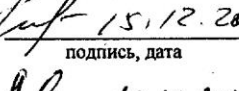
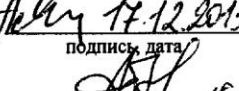
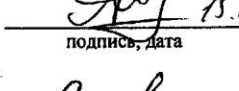
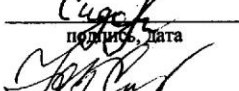
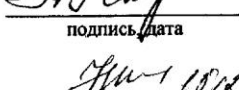
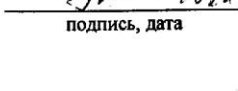
  
\_\_\_\_\_

подпись, дата

В.Я. Вилисов

Королев 2015

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

|   |  |   |
|---|--|---|
| Руководитель темы,<br>Зам. зав. каф. МЕНД,<br>д.э.н., к.т.н.  | <br>15.12.15<br>подпись, дата     | В.Я. Вилисов (2.3, 4.2, 4.3,<br>Введение, Заключение) |
| Ведущий программист отдела<br>Программного обеспечения<br>Зам. руководителя темы,<br>Проректор по ИТ,<br>к.т.н., доцент | <br>15.12.2015<br>подпись, дата   | Р.М. Коптилин (3.2)                                   |
| К.ф.-м.н., доцент, зав. каф.<br>МЕНД  | <br>15.12.15<br>подпись, дата     | А.Ю. Щиканов (3.1)                                    |
| К.т.н., доцент каф. МЕНД  | <br>15.12.15<br>подпись, дата     | О.Н. Борисова (1.1)                                   |
| Доцент кафедры МЕНД   | <br>15.12.15<br>подпись, дата     | И.В. Бугай (1.1)                                      |
| К.х.н., доцент каф. МЕНД  | <br>15.12.15<br>подпись, дата     | А.Д. Донской (1.1)                                    |
| Старший препод. каф. МЕНД   | <br>15.12.15<br>подпись, дата     | Н.И. Ерохина (1.2)                                    |
| К.т.н., доцент каф. МЕНД  | <br>15.12.15<br>подпись, дата    | Г.И. Муджири (1.2)                                    |
| К.ф.-м.н., доцент каф. МЕНД   | <br>15.12.15<br>подпись, дата   | Н.П. Мацнев (1.2)                                     |
| К.ф.-м.н., доцент каф. МЕНД   | <br>15.12.15<br>подпись, дата   | Ю.И. Пастухова (2.2)                                  |
| К.ф.-м.н., доцент каф. МЕНД   | <br>15.12.2015<br>подпись, дата | В.И. Переяславский (1.3)                              |
| К.т.н., доцент каф. МЕНД  | <br>15.12.15<br>подпись, дата   | С.Е. Сабо (1.4)                                       |
| Д.ф.-м.н., проф. каф. МЕНД  | <br>14.12.15<br>подпись, дата   | К.Л. Самаров (2.1)                                    |
| Старший препод. каф. МЕНД   | <br>15.12.2015<br>подпись, дата | И.В. Сидоренкова (4.1)                                |
| Старший препод. каф. МЕНД   | <br>17.12.2015<br>подпись, дата | А.Б. Яцкевич (4.1)                                    |
| К.т.н., доцент, зам. зав. каф.<br>ИТУС  | <br>15.12.2015<br>подпись, дата | Т.С. Аббасова (4.2)                                   |
| К.т.н., доцент каф. ИТУС, зам.<br>декана ИТФ  | <br>подпись, дата               | Н.П. Сидорова (4.3)                                   |
| Д.т.н., проф. каф. ИТУС   | <br>подпись, дата               | Ю.В. Стреналук (4.3)                                  |
| К.т.н., доцент каф. ИТУС  | <br>15.12.15<br>подпись, дата   | Н.Н. Теодорович (4.2)                                 |

## СОДЕРЖАНИЕ

|  | Стр. |
|--|------|
| Введение .....   | 8    |
| 1. Типы расходомеров и принципы их действия .....  | 10   |
| 1.1. Принципы действия расходомеров .....  | 10   |
| 1.2. Конструкция вихревых расходомеров .....   | 17   |
| 1.2.1. Принцип действия вихревого расходомера .....                                      | 17   |
| 1.2.2. Способы генерации неоднородностей в потоке .....                                  | 23   |
| 1.2.3. Варианты конструкции вихревых расходомеров .....                                  | 26   |
| 1.3. Алгоритм расчета расхода по данным измерения физических параметров<br>потока .....  | 36   |
| 2. Математические модели свойств потока в рабочей области вихревого<br>расходомера ..... | 38   |
| 2.1 Подходы к описанию гидродинамики в рабочей области вихревого<br>расходомера .....    | 38   |
| 2.1.1 Модель Биркгофа-Косинса .....  | 39   |
| 2.1.2 Модель Герарда .....   | 40   |
| 2.1.3 Модель Ямасаки .....   | 41   |
| 2.1.4 Модель Панканина .....   | 42   |
| 2.1.5 Численные модели .....   | 44   |
| 2.2 Математическое описание вихреобразования .....                                       | 45   |
| 2.2.1. Уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости .....                             | 46   |
| 2.2.2. Краевые условия для уравнений термогидродинамики .....                            | 47   |
| 2.2.3. Некоторые аналитические решения краевых задач .....                               | 50   |
| 2.2.4. Математическое описание турбулентных течений .....                                | 53   |
| 2.3. Современные модели турбулентности .....   | 56   |
| 3. Средства испытаний, отработки и поверки вихревых расходомеров .....                   | 65   |
| 3.1. Натурные испытательные стенды и оборудование .....                                  | 65   |
| 3.2. Программные средства моделирования физических процессов в ВРМ .....                 | 73   |
| 3.2.1. Программный комплекс Flow Vision .....  | 74   |
| 3.2.2. Программный комплекс Ansys CFX .....  | 88   |
| 3.2.3. Программный комплекс OpenFOAM .....   | 104  |
| 3.2.4. Другие программные средства моделирования гидродинамики .....                     | 112  |
| 3.2.5. Сравнительный анализ программных средств моделирования .....                      | 115  |
| 4. Задачи моделирования и исследования вихревых расходомеров .....                       | 117  |
| 4.1. Целевые направления моделирования ВРМ .....   | 117  |
| 4.1.1. Задачи оценочного моделирования .....   | 117  |
| 4.1.2. Задачи проектного моделирования .....   | 118  |
| 4.2. Факторные модели вихревых расходомеров .....  | 119  |
| 4.2.1. Показатели вихревых расходомеров .....  | 120  |
| 4.2.2. Факторы, влияющие на показатели качества ВРМ .....                                | 124  |
| 4.2.3. Регрессионные многофакторные модели .....   | 126  |
| 4.2.4. Многокритериальные оценки вариантов конструкции ВРМ .....                         | 135  |

|   |     |
|---|-----|
| 4.3. Методы оптимального планирование эксперимента на BPM и их моделях .....                  | 144 |
| 4.3.1. Оптимальное планирование факторных экспериментов .....                                 | 144 |
| 4.3.2. Методы планирования эксперимента для выбора оптимального варианта<br>конструкции ..... | 154 |
| 4.3.3. Комплексное использование математических моделей при разработке и<br>анализе BPM ..... | 158 |
| Заключение .....  | 161 |
| Список использованных источников .....  | 163 |