

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Библиотека научных разработок и проектов МГСУ

---

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КОНТРАВЕРСНЫХ ТЕЧЕНИЙ

*Под редакцией профессора,  
доктора технических наук А.Л. Зуйкова*

---

Москва 2012

УДК 532.517:519.635:621.4:626.01:627.838  
ББК 30.123  
М 33

СЕРИЯ ОСНОВАНА В 2008 ГОДУ

Р е ц е н з е н т ы:

доктор технических наук *А.Е. Асарин*, главный эксперт отдела водного хозяйства и охраны окружающей среды ОАО «Институт Гидропроект»;  
доктор технических наук *Н.В. Ханов*, профессор кафедры гидравлики  
Московского государственного университета природообустройства

Авторы:

**В.К. Ахметов, В.В. Волшаник, А.Л. Зуйков, Г.В. Орехов**

*Монография рекомендована к публикации  
научно-техническим советом МГСУ*

**М 33    Моделирование и расчет контрвихревых течений** : монография /  
В.К. Ахметов и [др.] ; под ред. А.Л. Зуйкова ; М-во образования и науки  
Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – Москва :  
МГСУ, 2012. – 252 с.

**ISBN 978-5-7264-0618-3**

Рассматривается движение спутных коаксиальных циркуляционно-продольных потоков жидкости со взаимно противоположным вращением. Такое течение называется контрвихревым и применяется в современных технологиях микробиологической и химической промышленности, в гидротехнике, гидроэкологии, энергетике, двигателестроении. Рассмотрены вопросы математического и численного моделирования контрвихревых течений, а также гидравлика таких потоков, в том числе методики гидравлических расчетов сооружений и оборудования, основанных на их использовании.

Для научных и инженерно-технических работников, аспирантов и студентов старших курсов.

**УДК 532.517:519.635:621.4:626.01:627.838**  
**ББК 30.123**

ISBN 978-5-7264-0618-3

© ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2012

*Светлой памяти нашего друга  
Анатолия Павловича Мордасова  
посвящается*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная монография представляет собой введение в теорию и практику контрвихревых течений. Эти течения весьма распространены: их используют в камерах сгорания промышленных топок, ракетных и авиадвигателей, теплообменниках, гасителях механической энергии, смесителях, аэраторах и других технологических устройствах, о чем подробнее говорится во введении.

Монография ориентирована на специалистов практиков и научных работников. Рассмотренные в ней теоретические и практические методы расчета контрвихревых течений, сооружений и оборудования будут полезны инженерам и конструкторам, сталкивающимся с необходимостью решать сложные задачи расчета этих течений, а реальные возможности показанных методов позволят принимать наиболее оптимальные решения.

Эксперименты, которым будет посвящена следующая монография, несомненно, будут являться большим подспорьем для инженеров и конструкторов, однако постановка физических экспериментов обходится весьма дорого, и предварительный расчет поля течения с помощью математических моделей, численных методов, а также методов гидравлики в значительной мере способствуют удешевлению разработок и снижению эксплуатационных расходов. Комбинируя экспериментальные данные с теоретическими и численными гидродинамическими расчетами, можно значительно уменьшить продолжительность и стоимость разработок, а также повысить их качество.

Важность излагаемых вопросов и большой объем накопленных сведений побудили авторов на написание этой и последующей монографий. В них рассматриваются различные аспекты контрвихревых течений и их использования, в первую очередь характеристики поля течения. В первой главе, написанной в соавторстве А.Л. Зуйковым и Г.В. Ореховым, излагаются фундаментальные теоретические методы расчета контрвихревых течений, в том числе описываются поля скоростей, распределения функций тока, вихревые и тензорные поля, устойчивость контрвихревых течений. Вторая глава (авторы В.К. Ахметов, Г.В. Орехов) посвящена численным методам расчета контрвихревых течений, а третья глава авторов В.В. Волшаника, А.Л. Зуйкова, Г.В. Орехова — расчету контрвихревых течений, сооружений и оборудования методами инженерной гидравлики. Приводятся примеры расчетов. Таким образом, в данной монографии представлены все методы моделирования контрвихревых течений, кроме физического.

Монография была задумана как руководство для инженеров-исследователей, работающих в промышленности, проектных и научно-исследовательских организациях, специализирующихся в области гидродинамики, моделирования течений, массо- и теплообмена, контроля загрязнения окружающей среды, а также как учебник для аспирантов и студентов старших курсов. Предполагалось, что в этом случае необходимо поместить в монографию общие представления о гидродинамике и соответствующем математическом аппарате. Следовало создать надежный фундамент для тех, кто намерен сам вести теоретические и экспериментальные исследования контрвихревых течений, и в то же время дать адекватное и исчерпывающее, хотя и краткое, руководство для тех, кто занимается использованием контрвихревых течений в конкретных задачах.

Монография посвящена исключительно практическому использованию, прошлым и настоящим исследованиям контрвихревых течений, а также направлениям планируемых разработок. Что касается особых требований, связанных с новизной и полезностью, которым должна удовлетворять монография, то ее авторам, как и авторам любой узкоспециальной публикации, было необходимо отобрать, обобщить и выстроить материал так, чтобы он наилучшим образом подходил для иллюстрации основных принципов и методов в рассматриваемой области знания. В монографии конспективно представлены труды нескольких известных специалистов в этой области. В то же время ее отличительной особенностью является стремление привлечь внимание специалистов, желающих использовать для решения практических задач наиболее современные представления и методы, несмотря на сложность их восприятия.

Поскольку монография является первым опытом в обозначенном направлении, в ней неизбежны структурные просчеты и технические погрешности. Авторы будут чрезвычайно признательны читателям за замечания по содержанию книги.

Авторы хотели бы выразить свою признательность всем тем, кто сотрудничал с ними в исследованиях, в частности, проф. В.Я. Шкадову, проф. М. Данеку, Т.А. Ивановой, канд. техн. наук Е.В. Квятковской, канд. техн. наук Г.А. Чепайкину, канд. техн. наук Н.А. Елисееву, проф. С.М. Слисскому, проф. Ю.П. Правдивцу, канд. техн. наук А.В. Леванову, канд. техн. наук В. Рышлаву, канд. техн. наук Т.Ю. Кузнецовой, канд. техн. наук Х.М. Вескес.

Авторы благодарят рецензентов, чьи замечания способствовали улучшению издания. Авторы также благодарны коллективу сотрудников издательства МИСИ—МГСУ за большой вклад в обеспечение высокого качества издания.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	7
1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТРВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ .....	11
1.1. Гидродинамика циркуляционных течений .....	11
1.1.1. Особенности циркуляционного движения жидкости .....	12
1.1.2. Уравнения движения вязкой жидкости .....	17
1.1.3. Модели вязких циркуляционных течений .....	21
1.1.3.1. Винтовое течение. Поток Громеки—Бельтрами .....	22
1.1.3.2. Квазипотенциальное течение .....	24
1.1.3.3. Равномерное течение. Профиль Куэтта .....	31
1.1.3.4. Цилиндрическое течение .....	35
1.1.3.5. Ползущее течение .....	36
1.1.3.6. Вихрь Бюргерса—Бэтчелора .....	45
1.1.3.7. Вязкий вихрь по Фурье—Бесселю .....	50
1.2. Гидродинамика контрвихревых течений .....	60
1.2.1. Кинематическая структура течения в активной зоне .....	60
1.2.1.1. Распределение азимутальных скоростей .....	62
1.2.1.2. Распределение аксиальных скоростей .....	69
1.2.1.3. Распределение радиальных скоростей .....	89
1.2.1.4. Функция тока и области рециркуляции .....	92
1.2.2. Вихревая структура течения в активной зоне .....	94
1.2.3. Тензор вязких напряжений .....	98
1.2.4. Гидродинамическая устойчивость течения в активной зоне .....	103
2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТРВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ .....	114
2.1. Уравнения в переменных вихрь — азимутальная скорость — функция тока .....	114
2.2. Постановка задачи .....	118
2.3. Вычислительные алгоритмы .....	120
2.3.1. Метод решения уравнения Пуассона для функции тока .....	120
2.3.2. Аппроксимация конвективных членов в уравнениях переноса .....	128
2.3.3. Конечно-разностная схема для решения уравнений переноса .....	132
2.3.4. Аппроксимация граничных условий для завихренности .....	136
2.4. Результаты расчетов полей течения .....	138
2.5. Верификация расчетов по экспериментальным данным .....	147
2.6. Взаимодействие соосных закрученных потоков в контрвихревом гасителе .....	152

3. ГИДРАВЛИКА КОНТРВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ, СООРУЖЕНИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ .....	180
3.1. Общая гидравлическая схема контрвихревого устройства .....	180
3.2. Гидравлика локальных завихрителей .....	185
3.2.1. Конструкции локальных завихрителей .....	185
3.2.2. Гидравлическое сопротивление локальных завихрителей .....	189
3.2.3. Пропускная способность локальных завихрителей .....	194
3.2.4. Характеристики потока на входе и выходе завихрителя .....	201
3.2.5. Плавно изменяющееся движение безнапорного кольцевого закрученного потока в цилиндрическом канале .....	203
3.2.6. Особенности расчета безнапорных локальных завихрителей .....	213
3.3. Гидравлика активной зоны .....	218
3.3.1. Расчет характеристик течения на выходе активной зоны .....	218
3.3.2. Расчет длины активной зоны .....	222
3.4. Обратная задача гидравлического расчета контрвихревых сооружений и оборудования .....	226
3.4.1. Основы проектирования контрвихревых систем .....	226
3.4.2. Особенности расчета аэраторов и эжекторов .....	229
3.4.3. Особенности расчета смесителей и водосбросов .....	234
Библиографический список .....	239