ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Московский государственный строительный университет

На правах рукописи

Орехов Генрих Васильевич

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОАКСИАЛЬНЫХ

ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Специальность 05.23.16 - гидравлика и инженерная гидрология

Диссертация

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант

доктор технических наук

Зуйков Андрей Львович

Москва-2014г.

2

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ . 7

1 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОНТРВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ ... 19

1.1 Гидродинамика циркуляционных течений 19

1.1.1 Особенности циркуляционного движения жидкости 20

1.1.2 Уравнения движения вязкой жидкости 26

1.1.3 Модели вязких циркуляционных течений 31

1.1.3.1 Винтовое течение. Поток Громеки-Бельтрами 32

1.1.3.2 Квазипотенциальное течение 35

1.1.3.3 Равномерное течение. Профиль Куэтта 43

1.1.3.4 Цилиндрическое течение 48

1.1.3.5 Вихрь Бюргерса-Бэтчелора 50

1.1.3.6 Вязкий вихрь по Фурье-Бесселю 56

1.2 Гидродинамика контрвихревых течений 68

1.2.1 Кинематическая структура течения в активной зоне 68

1.2.1.1 Распределение азимутальных скоростей 70

1.2.1.2 Распределение аксиальных скоростей 79

1.2.1.3 Распределение радиальных скоростей 108

1.2.1.4 Функция тока и области рециркуляции 112

1.2.2 Вихревая структура течения в активной зоне 115

1.2.3 Тензор вязких напряжений 121

1.2.4 Гидродинамическая устойчивость течения в активной зоне 127

Выводы по первой главе 141

3

2 ГИДРАВЛИКА КОНТРВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ, СООРУЖЕНИЙ

И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ 146

2.1 Общая гидравлическая схема контрвихревого устройства 146

2.2 Гидравлика локальных завихрителей 153

2.2.1 Конструкции локальных завихрителей 153

2.2.2 Гидравлическое сопротивление локальных завихрителей 158

2.2.3 Пропускная способность локальных завихрителей 164

2.2.4 Характеристики потока на входе и выходе завихрителя 175

2.2.5 Плавно изменяющееся движение безнапорного кольцевого закру-ченного потока в цилиндрическом канале 178

2.2.6 Особенности расчета безнапорных локальных завихрителей 191

2.3 Гидравлика активной зоны 198

2.3.1 Расчет характеристик течения на выходе активной зоны 198

2.3.2 Расчет длины активной зоны 204

2.4 Обратная задача гидравлического расчета контрвихревых

сооружений и оборудования 209

2.4.1 Основы проектирования контрвихревых систем 209

2.4.2 Особенности расчета аэраторов и эжекторов 214

2.4.3 Особенности расчета смесителей и водосбросов 222

Выводы по второй главе 228

3 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТРВИХРЕВЫХ

ТЕЧЕНИЙ 231

3.1 Гидравлическое моделирование конрвихревых течений 231

4

3.1.1 Инспекционный анализ уравнений гидродинамики 233

3.1.2 Приближенное динамическое подобие контвихревых течений.

Автомодельность 240

3.1.3 Интегральные динамические критерии течения.Числа

Хигера-Бэра и Абрамовича 246

3.2 Экспериментальные исследования на лабораторных установках

низкого напора 255

3.2.1 Гидравлические исследования контрвихревых систем с напор-

ными завихрителями 255

3.2.1.1 Описание экспериментальной установки 255

3.2.1.2 Условия моделирования 256

3.2.1.3 Методика и средства измерения 266

3.2.1.4 Результаты гидравлических исследований 275

3.2.2 Гидравлические исследования конрвихревой системы с

безнапорными завихрителями 303

3.2.2.1 Описание экспериментальной установки и модели 303

3.2.2.2 Условия моделирования 306

3.2.2.3 Методика и средства измерения 313

3.2.2.4 Результаты гидравлических исследований 319

3.2.3 Гидро- и аэродинамические исследования контрвихревого

течения в активной зоне 330

3.2.3.1 Описание модели 331

3.2.3.2 Исследования на гидравлическом стенде 337

3.2.3.3 Исследования на аэродинамическом стенде 345

3.2.3.4 Анализ результатов исследований 363

3.3 Масштабный эффект при моделировании контрвихревых систем 368

5

3.3.1 Практические особенности моделирования вихревых и

контрвихревых водопропускных систем 368

3.3.2 Пропускная способность и эффективность гашения энергии 384

3.3.3 Кинематическая структура и энергообмен взаимодействующих закрученных потоков 402

3.3.4 Гидродинамические характеристики контрвихревых

гасителей энергии потока 415

3.4 Эжектирующая способность и аэрация в контрвихревых системах 423

3.4.1 Устройство и рабочий процесс контрвихревых аэраторов 423

3.4.2 Инженерный метод определения основных размеров контрвихревых аэраторов 436

3.4.3 Исследованные модели и состав испытаний 442

3.4. 4 Пропускная способность контрвихревого аэратора по воде 450

3.4.5 Коэффициент эжекции воздуха 454

3.4.6 Течение в камере смешения 462

3.5 Кавитационные исследования контрвихревых устройств 471

3.5.1 Кавитационные исследования масштабного ряда моделей контрвихревых гасителей 471

3.5.2 Кавитационная эрозия при пропуске закрученных потоков 486

3.5.2.1 Общие положения 486

3.5.2.2 Постановка задачи исследований 488

3.5.2.3 Состав исследований 489

3.5.2.4 Экспериментальные установки 490

3.5.2.5 Исследования модели контрвихревого гасителя

Рогунской ГЭС 492

6

3.5.2.6 Методика экспериментальных исследований модели

контрвихревого гасителя масштаба М1:40 493

3.5.2.7 Экспериментальные исследования модели

контрвихревого гасителя масштаба М1:12 496

3.5.3 Результаты экспериментальных исследований 499

3.5.4 Меры предотвращения разрушений контруктивных элементов контрвихревых гасителей 510

Выводы по третьей главе 513

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ 518

СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 529

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .

531

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Контрвихревые течения относятся к пространственным неравномерным течениям, не встречающимся в природе. Идея формирования в цилиндрической камере взаимодействия спутных коаксиальных противоположно закрученных циркуляционно-продольных двух и более потоков впервые появилась при ис¬следованиях гидротехнических водосбросов и быстро распространилась на дру¬гие отрасли. Характер и интенсивность гидро- и аэродинамических процессов, происходящих в контрвихревых устройствах, обеспечивают эффективность их использования в самых разных отраслях современной техники в целях переме¬шивания однофазных и многофазных сред, гашения избыточной механической энергии потока жидкости или газа, дезинтеграции конгломератов, создания го¬могенных сред, возбуждения механически колебаний и получения других тех¬нологических эффектов.

2. Обзор математических моделей вязких циркуляционно-продольных те-чений позволяет сделать вывод, что любое такое течение является комбинацией свободного (потенциального) и вынужденного (твердого) вихрей. Свободно-вынужденное вращение свойственно любому закрученному потоку вязкой жидкости. Это фундаментальное свойство всех циркуляционных течений, про¬слеживаемое по экспериментальным данным подавляющего большинства ис¬следователей. Трансформация циркуляционно-продольного течения вдоль про¬дольной оси водовода происходит путем перераспределения своботной и вы¬нужденной составляющих общего вихря в пользу последней. Таким образом, по мере продвижения потока по аксиальной координате его вращение становится все более вынужденным («твердым»). Переход к квазитвердому вращению го-ворит о вырождении циркуляции.

3. Особое практическое значение имеют математические модели квазипо-тенциального течения, при котором rotU = 0. Отмечается, что безвихревое те-чение несовместимо с вязкостью, другими словами, для вязкой (реальной) жид-

519

кости безвихревое (потенциальное) движение невозможно. Несмотря на это, на практике нередко реализуется именно это наиболее простое циркуляционно-продольное движение благодаря тому, что при больших скоростях течения или значительных габаритах сооружений или технологического оборудования чис¬ла Рейнольдса (Re) высоки и, следовательно, силы вязкости малы по сравнению с другими силами, воздействующими на течение Эта модель отражает свойства высокоскоростного турбулентного закрученного потока. Несмотря на упро-щенность описания движения жидкости, данная модель позволяет получить расчетные характеристики вихревых устройств и сооружений, хорошо соответ-ствующие результатам физических исследований.