На правах рукописи

Орехов Генрих Васильевич

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОАКСИАЛЬНЫХ

ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Специальность 05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2015 г

2

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образова-тельном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет».

Научный консультант - доктор технических наук Зуйков Андрей Львович

Официальные оппоненты:

Ханов Нартмир Владимирович, доктор технических наук, профессор, Фе¬

деральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА

имени К.А.Тимирязева», Институт природообустройства имени

А.Н.Костякова, заведующий кафедрой гидротехнических сооружений.

Петриченко Михаил Романович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высше¬го образования «Санкт-Петербугский политехнический университет Петра Ве¬ликого», Институт инженерно-строительный. заведующий кафедрой гидравли¬ки.

Коханенко Виктор Николаевич - доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высше¬го профессионального образования «Южно-Российский государственный поли¬технический университет (НПИ) имени М.И. Платова», Факультет физико-математический, профессор кафедры теоретической механики.

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений».

Защита диссертации состоится «30» июня 2015 года в 14 ч. 00 мин. на засе-дании диссертационного совета Д 212.138.03, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, Москва, Ярославское шоссе, дом 26, зал заседаний учѐного совета МГСУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте http//www.mgsu.ru ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет».

Автореферат разослан « » 2015 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Бестужева Александра Станиславовна

3

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Потребности практики, обусловленные ши-роким применением закрученных потоков жидкости и газа, выдвинули перед учеными задачи глубокого научного анализа этого сложного явления. В по-следние десятилетия значительное внимание уделяется разработке и исследо-ванию сооружений и оборудования, в основу которых положена идея создания в цилиндрической камере коаксиального течения двух или более спутных про¬тивоположно закрученных потоков жидкости или газа. Взаимодействие закру¬ченных потоков позволяет преобразовывать в энергию избыточной турбулент¬ности значительную или подавляющую часть их исходной механической энер¬гии. Проявление этого эффекта не зависит от внешних условий, поскольку оп¬ределяется полем массовых центробежных сил, формируемым самими закру¬ченными потоками.

Течение, сформированное вязким взаимодействием коаксиальных противо¬положно закрученных потоков, получило название контрвихревого, а устройст¬ва, реализующие его, называют контрвихревыми. Участок, на котором наблю¬дается контрвихревое течение, называют активной зоной.

Характер и интенсивность механических процессов, происходящих в контр¬вихревых устройствах, обеспечивают эффективность их применения в самых разных отраслях современной техники в целях перемешивания однофазных и многофазных сред, гашения избыточной механической энергии потока жидко¬сти или газа, дезинтеграции конгломератов, возбуждения механических коле¬баний и получения других эффектов.

Необходимость разработки теории течения в контрвихревых сооружениях и оборудовании и анализа результатов многочисленных экспериментальных ла¬бораторных исследований и натурных испытаний обусловливает научную и практическую актуальность выполненного исследования.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное обоснование эффек-тивности сооружений и технологического оборудования, использующих гидро¬динамические эффекты вязкого взаимодействия спутных коаксиальных проти¬воположно закрученных потоков.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель контрвихревого течения.

2. Выполнить методические экспериментальные исследования контрвихревых течений для обоснования и верификации математической модели.

3. Выполнить гидравлические и кавитационные испытания масштабных серий моделей контрвихревых гасителей и натурных образцов контрвихревых уст¬ройств.

4. Разработать рекомендации по расчѐту и проектированию контрвихревых сооружений и технологического оборудования.

Научная новизна результатов исследований.

1. Разработана оригинальная математическая модель контрвихревого течения, которая позволяет проследить динамику течения по длине активной зоны, опи-

4

сать радиально-аксиальное распределение его структурных характеристик. Мо¬дель описывает контрвихревые течения с различной степенью начальной за¬крутки в трубах, расположенных под произвольным углом наклона к го-ризонту; нормирование уравнений движения позволяет использовать получен¬ные решения для расчета потоков при изменении их линейных размеров и ско¬ростей движения.

2. Получены результаты гидравлических и аэродинамических исследований моделей контрвихревых устройств.

3. Получены результаты гидравлических и кавитационных испытаний мас¬штабной серии и натурных образцов контрвихревых устройств.

4. Разработано научное обоснование гидравлических расчѐтов и проектирова¬ния контрвихревых устройств различного назначения.

5. Выполнена верификация разработанной модели расчета вязких контрвихре¬вых течений и метода их гидравлического моделирования на основе экспери¬ментальных данных, полученных автором с использованием прецизионной из¬мерительной техники – бесконтактных лазерных доплеровских измерителей скорости LDA и системы трассерной лазерной визуализации потока PIV.

Достоверность научных положений, выводов и практических реко-мендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается их соответстви-ем установленным теоретическим и экспериментальным фактам, использовани¬ем апробированных теоретических положений, классических уравнений гидро¬механики, известных методов решения систем дифференциальных уравнений параболического и эллиптического типа и методов математического анализа, соблюдением законов гидравлического моделирования при проектировании и изготовлении гидроаэродинамических моделей и экспериментальных стендов, применением прецизионных средств измерений и обработки эмпирической ин¬формации, исключающих человеческий фактор, использованием современных методик проведения гидравлических исследований, соблюдением общеприня¬тых методов оценки точности эксперимента, непротиворечивостью полученных результатов экспериментов и их близостью к результатам, полученным други¬ми исследователями.

Практическая ценность результатов исследований:

1. Предложен принципиально новый класс гидроаэродинамических устройств, обеспечивающих повышение эффективности процессов гашения энергии, пе¬ремешивания, энерго- и массообмена в различных отраслевых приложениях.

2. Разработаны научно обоснованные рекомендации по расчѐту и проектиро-ванию контрвихревых сооружений и оборудования для практического исполь¬зования в различных областях техники и отраслях производства.

3. Полученные в диссертации результаты являются основой для развития тео¬рии контрвихревых течений, что позволит расширить масштабы использования высокотехнологичных гидроаэродинамических устройств.

4. Полученные в диссертации результаты являются основой для развития и со¬вершенствования преподаваемых в вузах дисциплин, таких как «Гидромехани¬ка», «Гидравлика», «Гидротехнические сооружения», «Гидроэнергетические

5

сооружения», «Эксплуатация водных объектов».

На защиту выносятся:

1. Разработанная математическая модель вязкого взаимодействия спутных ко¬аксиальных противоположно закрученных течений.

2. Результаты гидроаэродинамических и кавитационных исследований моде-лей, масштабных рядов моделей и натурных образцов контрвихревых уст-ройств.

3. Рекомендации по расчѐту и проектированию контрвихревых сооружений и оборудования для различных отраслей техники.

4. Результаты разработки типовых конструкций и рядов нормализованных об¬разцов контрвихревых устройств.

Личный вклад соискателя. Автором лично выдвинуты предложения об использовании контрвихревых устройств для гашения энергии потока при не-штатных ситуациях в системах добычи и транспортирования нефти, для дезин¬теграции конгломератов при добыче полезных ископаемых, для одновременно¬го перемешивания многих жидких ингредиентов. Автором лично разработаны отдельные разделы теоретического обоснования контвихревых устройств. Ав¬тором лично разработаны программы модельных и натурных эксперименталь¬ных исследований контрвихревых устройств, разработаны проекты модельных и опытно-промышленных образцов, проведены экспериментальные исследова¬ния, сформулированы выводы и рекомендации. Автором лично получены все обоснования защищаемых положений диссертации.

Рабочая гипотеза. Формирование в цилиндрической трубе течения жидко¬сти или газа, состоящего из взаимодействующих коаксиальных противополож¬но закрученных потоков, позволяет получить интегральное течение с очень вы¬соким уровнем искусственной турбулентности, обладающее уникальными свойствами диссипации энергии, перемешивания, динамического воздействия и другими, обуславливающими эффективность их использования в различных областях техники.

Создание математической модели и научный анализ результатов экспери-ментальных исследований и натурных испытаний контрвихревых устройств яв¬ляется основой дальнейшего совершенствования конструкций и повышения эффективности нового современного высокотехнологичного оборудования, развития соответствующих разделов гидромеханики и улучшения подготовки высококвалифицированных специалистов–гидравликов для народного хозяйст¬ва страны.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, ос-новных выводов, библиографии, включающей 255 наименований, в том числе 60 зарубежных. Работа изложена на 548 страницах машинописного текста, включает 151 рисунок и 16 таблиц.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 42 печатные работы, в том числе 18 работ в журналах и изданиях, рекомендованных ВАК, моногра-фия, авторское свидетельства и патент.

6

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на: 15-й научно-технической конференции по итогам НИР МИСИ 15-18 апреля 1986г. Москва; Всесоюзном научно-техническом совещании «Состояние и пер¬спективы развития гидроэнергетики», сентябрь 1988г., пос. Черѐмушки; 17-й научно-технической конференции по итогам НИР МИСИ, посвящѐнной 70-летию института, апрель 1991г., г. Москва; Международной конференции «Пе¬редовые технологии на пороге XXI века.», октябрь 1998г., Москва; Междуна¬родной научно-практической конференции «Критические технологии в строи¬тельстве», октябрь 1998г., г. Москва; Международной конференции «Инженер¬ная защита окружающей среды», январь 1999г., Москва; Международной науч¬но-практической конференции «Экология и жизнь», февраль 1999г., Пенза; Го¬родской научно-практической конференции «Потенциал московских вузов и его использование в интересах города», март 1999г., Москва; Международной научно-практической конференции-выставке «Строительство в XXI веке. Про¬блемы и перспективы», декабрь 2001г., г. Москва; Городской научно-практической конференции «Московские вузы – строительному комплексу Мо¬сквы для обеспечения устойчивого развития города», март 2003г., Москва; Ме-ждународной научно-технической конференции «Совершенствование турбо-установок методами математического и физического моделирования», сентябрь 2009г., г.Харьков, Украина; 10-я международная научно-практическая конфе¬ренция «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», МГСУ, Москва, 10-я международная межвузовская научно-практическая конференция «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» МГСУ, апрель 2007, Москва.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена краткая историческая справка по теме диссерта-ции и классификация вязких контрвихревых течений с указанием областей их практического применения, дана общая характеристика работы. Обоснована ак¬туальность выполненного исследования, сформулирована цель работы и задачи исследования, показаны научная новизна, практическая ценность результатов исследований, обоснована достоверность научных положений, выводов и прак¬тических рекомендаций, показан личный вклад соискателя, перечислены поло¬жения, выносимые на защиту, предложена рабочая гипотеза исследований.

Первая глава посвящена математическому моделированию вязкого взаи¬модействия спутных коаксиальных противоположно закрученных потоков -

контрвихревых. Характерные профили азимутальной щ и аксиальной их скоро¬стей в контрвихревом течении с двумя противоположно закрученными потока¬ми или слоями (периферийным и внутренним) показаны на рис. 1, здесь же да¬на схема гидродинамических параметров, определяющих структуру течения. Исследование таких течений ввиду их сложности до настоящего времени вы¬полнялось исключительно методами физического или численного моделирова-

7

ния, в диссертационной работе впервые это течение исследуется теоретически.

Сооружения и технологические системы, использующие эффект контрвих¬ревого взаимодействия потоков, состоят из двух или более локальных завихри-телей (рис.2), формирующих коаксиальные течения со встречным вращением, далее эти течения выводят в общую камеру смешения или взаимодействия по¬токов.

Рис.1 Структура контрвихревого течений

Таким образом, в контрвихревой системе есть участки с циркуляционно-продольными течениями (с вращением жидкости вокруг оси симметрии с цир-куляцией Г=27Г ив, где 27Гг- замкнутый круговой контур) и камера, где про-исходит их взаимодействие (активная зона).

Рис.2. Контрвихревой гидро¬технический водосброс: 1 – подводящий напорный водо-вод; 2 – спиральный локаль-ный завихритель; 3– поворот-ные лопатки; 4 – обтекатель;

5 – разделительная стенка;

6 – камера взаимодействия (смешения) потоков

8

Классические дифференциальные уравнения Навье-Стокса и Эйлера, опи¬сывающие движение вязкой несжимаемой жидкости, в цилиндрической систе¬ме координат r–9-x (рис.1) в общем случае имеют вид

ди ди

—- + и —- + и

ди ди

дх

2

Щ

Г

dt

гдв

2 1

дг

),

дщ гдв

ди

диа

-(--n) + f(V\-u-2 u

дг р г г дв

+ и

 + и

 + иа

dt

дг

дх

в- + и^ =

(1)

 + и

dt

гдв р ди

дг

 + и

ди

ди

ґдв

 + и

гдв х дх

A(L-U)+sv2 u дх р

+

+

d(rur) duQ ди

X

гдг гдв дх

О,

(2)

где иг - радиальная компонента вектора местной скорости U

U = ^u2+u2+u2, (3)

риє- плотность и кинематическая вязкость жидкости, t - текущее время, Р -давление, П - потенциал внешних массовых сил, V2 - оператор Лапласа

+

+

+

д2 д д2 д2

V2

(4)

дг2 гдг г2дв2 дх2

Нормируем систему уравнений (1)-(2) по среднерасходной скорости пото¬ка V = Q/nR2 (здесь Q - суммарный расход взаимодействующих потоков), ра¬диусу камеры смешения R и характерному давлению Р0, например, равному ат¬мосферному. Тогда для установившегося (d/dt = 0) симметричного относи¬тельно продольной оси камеры смешения (д/дд = 0) контрвихревого течения получим

ди ди

и —- + и —-

Г л X л

дг дх

и

П

1 д д(гиг) д2иг

д

д{гив)

гдг

ди ди

дг

и

и

дг

Fr Re дг гдг

дх2

—°- = -—(Еи-Р ) + — {— Р^К^},

ди

в

+и \_=L{i[^]+%

х дх Re дг гдг дх2

X

дх

Эх Fr Re1 гдг дг дх2 \

>

(5)

О,

д(ги ) ди

гдг дх где Ей, Fr и Re - соответственно числа Эйлера, Фруда и Рейнольдса

(6)

9

Р

V

Re

Fr

VR

Ей

pV2 gR є

д ґди

дх дх дг ґди ди

Продифференцируем первое уравнение (5) по х и вычтем из него третье, предварительно продифференцированное по г

д

ди

 X

дг

ди

ґди и —(— г дг дх

ди ч ди ґди

) + и

У X

1 д2

) +

 х\ + L( г

дг дг дх

ди

ґди

+

) +

)]•

(7)

дх дх д ґди гдг дх дг

дг ди

дг ди

dux )\_2 uQduQ

г дх Re дг2 дх

1

ґди

/ г

дх2 дх

,ди

/ г

2 дх

+

ди ч д2

)

—2L) +

г

дг

дг

Эта операция позволяет исключить производные от давления и потенциала внешних массовых сил из расчетной системы и свести два уравнения динамики к одному уравнению переноса азимутальной компоненты вихря

а(мгюе) д(ихюв) щди

+

-2

(8)

дг

дх

г дх

1 д д(гю9) а2щ

Re ~дг гдг дх2

в свою очередь равной

ди

 х

дг

ди

 г

~ дх

(9)

и вновь

юе = roteC/

Для оставшегося второго уравнения системы (5) относительно и6

полученного уравнения (8) примем следующие допущения:

- исключим слагаемые, содержащие иг, ибо радиальная составляющая вектора скорости много меньше аксиальной и азимутальной;

- исключим вторые частные производные по аксиальной координате, которые значительно меньше частных производных по радиусу;

- принимая озееновское приближение, заменим операторы и д/дх на

Vd/дхили на д/дх, ибо при нормированной форме записи уравнений V = 1.

Это позволяет переписать исходную систему уравнений (5) в виде

ди

и

1 д\

див

гдг

),

дх Re дг

г

+

>

(10)

д2и

ди ч

1 д

,д2и

+

2ме дие

г дх дхдг Rear дг1 гдг Совместно с уравнением неразрывности (6) получаем замкнутую систему трех нормированных дифференциальных уравнений (6), (10) с тремя неизвест¬ными распределениями компонент скоростей Ur, ив, и их.

Будем исследовать изменение структурных характеристик контрвихревого течения по радиусу и длине цилиндрического канала от сечения, где слои (по¬токи) с противоположной закруткой начинают взаимодействовать, до сечения, где течение с вырожденной закруткой можно полагать осевым и равномерным. Таким образом, будем рассматривать совместно участок интенсивного взаимо¬действия противоположно закрученных потоков, называемый активной зоной,

10

и последующий участок с осевым течением или с течением с остаточной одно-направленной закруткой, который называется зоной пассивной трансформации течения. Согласно сказанному граничные условия для контрвихревого течения можно записать следующим образом

ди

0 для 0 < х < оо I

г=0

г е дг

г/г(1,х) = г/е(1,х) = г/х(1,х) = 0 для 0 < JC < ооЛ (11)

ди

и (r,oo) = Wfl(r,oo) = 0,

г е дх

= 0 для 0<г<1,

° J

и сформулировать как:

- на оси симметрии при г = 0 положим равными нулю радиальные и окружные

скорости (иг = ив = 0), а для осевых скоростей положим здесь условие гладкого

экстремума (ди /дг = 0);

- на стенках трубы при г = 1 вследствие их непроницаемости и вязкого прили¬

пания жидкости положим все компоненты местной скорости равными нулю (иг

= ив =их = 0);

- на бесконечном удалении от входа при х = ∞ примем мягкие граничные усло¬

вия, согласно которым течение будем полагать равномерным с равными нулю

радиальными и окружными скоростями (иг = ив = 0) и частной производной от

осевой скорости по продольной координате (ди /дх = 0).

Кроме того, следует положить условие сохранения объемного расхода в

сечениях трубы, которое в нормированном виде записывается равенством

1

\ux2rdr = 1. (12)

0

На входе в активную зону (при х = 0) контрвихревую закрутку зададим в виде функции

uQ(r,0) = Q0r + ^ + A0J^0r), (13)

г

где Г0 и Q0 - константы, определяющие свободную и вынужденную состав-ляющие контрвихревого входного вихря; А0 - амплитуда вихря, заданного функцией Бесселя первого рода первого порядка; Jm(…) - здесь и далее функ-ции Бесселя первого рода т–го порядка, //0 - константа, неравная нулю функ-ции Бесселя первого рода первого порядка (J1 (//0 ) Ф 0).

При этом для формирования контрвихревого течения следует положить

где \ = 3,832 - первый нуль функции Бесселя первого рода первого порядка.

Согласно граничным и начальным условиям решение первого уравнения системы (10) относительно радиально-продольного распределения нормиро-

11

ванных азимутальных скоростей получено в виде ряда Фурье-Бесселя

(r,x,Re) = 22X

г/

(14)

),

J>(Kr) exp(-^ X

Re

n=\

X JJX )

n и V и /

где Лп- корень функции Бесселя первого рода первого порядка (J\(An) = 0), Gn - постоянная п-го частного решения

Gn =ГС

1

J0(kn)

1

-О

Ro\*

\-{\xJXnf

(15)

число Россби

Ro'=AQJx(ptQ).

0.6

я с

0.4

1,

0.2

0

Трансформация профилей азимутальных скоростей в контрвихревых тече-ниях по длине активной зон. ы 0 и части прилегающего к ней участка пассивной трансформации течения показана на рис. 3. Расчеты выполнены при числе Рей-ноль дса, равном Re = 500. На входе в активную зону (при х = 0) задавались контрвихревые течения с параметрами: 1) Г0 = -1,1, П= 3,8, Ro = 0 (рис. 3.а);

о

2) Г0 = 0, Q = 0, Ro" = 1, и. = 6,6 (рис. 3.б); 3) Г0 = -0,5, Qn = 2, Ro' = 0,6, п а

\* = 6,6 (рис. 3.в); 4) Г0 = 0, 0. 0= 0, Ro = 1,9, D//0 = 13 (рис. 3.г); 5) Г0 = 0, Q0 =

0,8, JUQ01=.0 61.,06.0 (2 р . 10 и .0с.

2,5, Ro = 0,8, ju0 = 6,6 (рис. 3.д); 6) Г 01.0 = –0,5, Q2.0 = 0, Ro

2.0

3.е). Эти параметры охватывают характерные режимы контрвихревых течений: от режимов с полным гашением циркуляции двуслойны - х 3.0 те -2 ч . 0ен1 и .0й 0 в .0 п1 р .0ед2 е .0лах а 1. к 0тивной зоны, до мног1 о .0сло1 й .0ных течений .

1.0

а)

б)

r / R

r/R

1.0

1..0 0..8 0..6

1.0

0.8

0.8

0.6 0.4 0.2

о.00.0

0.6

0.4 - x=5R^y^ / \ 0.0 ю( 20Ы0

0..4

\_ 2

0 ..2

0.2 ™

0

0.0 -

0 -2.0-~-1.00

lie

r / R в)

0..0

■Ив

1.0

0.8 -

0.6 -

0.4 -

0.2 -

0.0 -

Не

-3.0 -2.0 -1.0 0.0 1.0 2.0

2.0

0.

д)

-3..0 --2..0 --11. .00 00. .00 11.0.0 22.0.0

г)

r/R r/R

1.0 1.0

е)

-3-3.0 -2.0 -1.0 0.0 1.0

r/R

1.0

0 0 0 0

Не

2.0

0.8

0.6

0.4

0.2

2

Не 0.0

r/R

1.011111 1 \\

/і ) )

^<^7 \ ■ /

x=5R^/^ /40\ " \80

Гы( 2(\ \

0 \. \ \

^-^~-^s\

0.01 ■ 1 Г""|Г^,

-3.0 -2.0 -1.0 0.0 1.0

-2.0

-1.0 0.0 .10.0 2.0

3.0 -4.0 -3.0 -2.30 -1.20 0.0 1.0

Р-- и 2..0с. -3-11. ..0 П 00 р . .00 оф1. и 0. 0ли азимутал- ь 3- 3. н 0. 0 ы - 2- х 2. 0. с- к 1- .1 о 0. 0ро.0 с 0. 0те1 й .10. 0 в 2 к .20. о 0нтрвихрев1 ы .0х 0 т .0еч1 е .0ни2 я .0х

1.0 r/RГрафики на рис.3.а–в покаr r/зR/ Rывают, что контрвихревое течение с равными м0.18о..0ментами вращения противо11.0.п0 оложно закрученных коаксиальных слоев (пото-

12

ков) в пределах активной зоны трансформируется в продольно-осевое течение, т. е. в течение без закрутки. При этом активная зона, т. е. зона интенсивной вяз¬кой диффузии циркуляции взаимодействующих слоев ограничена 40-ка радиу¬сами камеры смешения.

Еще более интенсивно взаимная встречная закрутка гасится с увеличением числа взаимодействующих слоев. Так, при увеличении числа коаксиальных противоположно закрученных слоев в два раза (с 2-х на рис. 3.а-в до 4-х на рис. 3.г) в те же два раза сокращается длина активной зоны (с 40-ка радиусов до 20-ти).

Существенное превышение момента вращения одного взаимодействующе¬го слоя по отношению к моменту вращения другого слоя, показанное на рис. 3.д,е, не вызывает заметного изменения длины активной зоны, однако на выхо¬де из неѐ в этом случае наблюдается общее циркуляционно-продольное течение с закруткой в сторону преобладающего момента.

Значительное влияние на протяженность активной зоны, т. е. на интенсив¬ность диффузии циркуляции в контрвихревом течении, оказывает вязкость сре¬ды. Анализируя функцию распределения (14), где вязкость присутствует в чис¬ле Рейнольдса, можно установить, что ее изменение отражается обратно про¬порционально на протяженности активной зоны.

Подставляя функцию (14) во второе уравнение системы (10), при заданных граничных условиях (11) и (12) получено следующее радиально-аксиальное распределение нормированных аксиальных скоростей

«(,>,>Re) = 2(l-^)-f4 [l-^^]exp(-^^) +

t!\] J,(^,) ' Re

Jt^UKf-J^2r)^-K f )±Gt «pc-ai f)

[«=i A„ J2(knyl2) Re k=i Re

\_ у G 4>(V) exp(\_^ JL)V ok -І^ЬГІ QW(-X\ —) -

£ Gl\_{UK42):Ja(K42r^exr<\_2K ^ (16)

—

X2n ./2(A,„V2) "Re

где Gn и Gk - постоянные «-го и к-го частных решений

 2 l n

Г і

n Ro\* '

і

п 0

J0(XJ

1-(цпД ) 2

" г (17)

a=rJ!—il-a Ro'

к 0

\joih) і ° WnoA\*)2

λ Пλпи λк- нули функции Бесселя первого рода второго порядка (J2(λ) = 0) и первого рода первого порядка (J\(λi) = 0, J\(λk) = 0).

Результаты расчетов по формуле (16) приведены на рис.4. Профили осевых скоростей показаны в створах, расположенных на расстоянии от 5 до 80 радиу¬сов от начала активной зоны. Расчеты выполнены при числе Рейнольдса Re =

13

500 для контрвихревых двуслойных течений с параметрами: 1) Г0 = -1,1, Ω0 = 3,8, Ro\* = 0 (рис. 4а); 2) Г0 = О, Ω0 = 0, Ro\* = 1, μ0D = 6,6 (рис. 4б); 3) Г0 = -0,5, Ω0 = 2, Ro" = 0,6, μo= 6,6 (рис. 4,в); и для контрвихревого многослойного течения при Г0 = 0, Ω0 = 0, Ro" = 1,9, μQ = 13 (рис.4,г).

1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0.0

r/R

а)

40

щ

1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0.0

r /R

б)

Ux

-16.0

-12.0

-8.0 -4.0

0.0 4.0

-16.0

-12.0 -8.0 -4.0

0.0

4.0

1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0.0

r/R

в)

щ

1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0.0

r/R

г)

Ux

-16.0

-12.0

-8.0 -4.0

0.0 4.0

-16.0

-12.0 -8.0 -4.0

0.0

4.0

Рис.4. Профили аксиальных скоростей в контрвихревых течениях

На графиках можно видеть, что в сечениях, близких к входу в активную зо¬ну в приосевых слоях наблюдается сильное возвратное течение. За пределами возвратного приосевого течения в толще потока продольные скорости сущест¬венно выше средней (ux >> V = 1), чем поддерживается баланс объемного рас¬хода. Возвратное приосевое течение при контрвихревом взаимодействии двух коаксиальных слоев существует на участке длиной до двадцати радиусов каме¬ры смешения, а увеличение числа коаксиальных противоположно закрученных слоев (с 2-х до 4-х) пропорционально сокращает длину участка с возвратным течением. Анализ (16) позволяет сделать вывод, что изменение числа Рейнольдса за счет вязкости жидкости, скорости течения или размеров канала прямо про¬порционально отражается на протяженности участка возвратного течения.

Далее в главе операциями интегрирования и дифференцирования функций (14) и (16) найдены нормированные распределения: – радиальных скоростей

функции тока

ur (r, x, Re)

д

г

\и rdr,

J х

О

(18)

г

x¥(r,х,RQ) = juxrdr,

(19)

компонент вихря скорости

О

14

дщ I

дх ди

<z>r(r,x,Re) = votrU = -

a)e(r,x,Re) = roteU = —

or

cox(r,x,Re) = ™txU =

д(гив)

rdr

компонент тензора вязких касательных

(20)

= -rot U+ 2

-rotrC/,

-rOtgC/,

 х

ах '

г/

д

Tre(r,x,Re)

= r

(—)

\i dr r

Tex(r,x,Re) duQ

\x дх

Txr(r,х,Re) дих

\І dr

и нормальных напряжений

-2

a (r,x,Re)

 ZZ

г

aee(r,x,Re)

р,

дг

1

J

(21)

(22)

Г XX 66 '

—

\i dr \x \x )

где μ - коэффициент динамической вязкости жидкости, μ=рє (не путать с μо, которое входит в формулы (13), (15) и (17)).

Основные результаты, полученные в данной части диссертационного ис-следования, сводятся к следующему.

б)

r / R

і—■—і—■—і—■—і—■—і—■—і—■—Ґ«г

-0.35 -0.30 -0.25 -0.20 -0.15 -0.10 -0.05 0.00

1.0 0.8 0.6 0.4 0.2

0.0

а)

а (г,х,Re) „аг/

1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0.0

и

r

r / R

 JA

 40 ґ/\

x=5R^-

 ■ 1 ' 10 \

1 ■ 1 20 \

•

-0.20 -0.15 -0.10 -0.05 0.00

Рис. 5. Профили радиальных скоростей в двуслойном а) и многослойном б) контрвихревых течениях

По рис.5 можно видеть, что радиальные скорости в контрвихревых течени¬ях на один-два порядка ниже азимутальных и аксиальных (рис. 3 и 4). Таким образом, принятое допущение о возможности пренебречь в данном случае в уравнениях динамики радиальными скоростями оправдано.

15

1

0,8

0,6

0,4

0,2

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 /BSKLH 1111111111111111111 МИНЦ 0,50 111111111

iwi її ч M і iTsa 1 1 T+-UJ 1 1 1 Г1 1 | | | | | | 1 1 1 1 1 1 | | | | | | і И 1 1 1 1 1 -n-i-

mw-i in і і гч^і і і пч-л-j 1 1 1 ГЫ-JJ 1 1 1 | П | | І,! і і і і | 1 1 1 ГІ і і і і і і

ИЧТТ і і і Т"Ь4 і і і і гт-н-1 Тт~і MI и І и MI птТттТ№

iNSJ TrrNJ П TT-M J. ГТГТТ+4 LL ГТттт

T N\ 1 1 ITtH -LL 1 1 1 1 TTH HA MMТТЖ I4JX ГТ^^ПттТ

J ВШ"іч11111 In In T44 IJ-JJI ТІ птп-І-І Ш-ІттІ І тп41 гтД-П 11 til

J кг] J-гт тт-І LI ТТ Ітт-І LI ГП тт ГТТ

IMRL IIIU ГГТ-Н 1 1 ГТ\*\*Ы- Mill ІТ+-М 1 1 1 1 рЯ-ЗЗГГ l 1 1 1 ^Кгте-ГТ"Н OtH L1 T\*H LI 1 ІТЧЧ LI 1 1 1 1 TT\*H LL 1 1 1 1 1 1 TTT^TF І І І І І ПТ

Mjngj-CHJ~HІГНїї [TtUJ 1 ГГН -UJ 111 ПТ\*Н I4JJ 111 1 Iі 1

Ш?И№Ж1МТ ШШ \W ШШ\\ Ittt Ш0 1 і її 11111111111111Н

HU11 t1tHt0,20i

г 4-LLi lll

ГТТТТ1 ттф

1—1—1—1—111

"| | | | | | ПТТТТТТТТГГІ

0

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

x

Рис.6 Линии тока в двуслойном контрвихревых течениях

г

Расчеты показали (рис.6) наличие в контрвихревых течениях приосевых рециркуляционных областей, представляющих тороидальные θ-вихри, развитые в радиальном и аксиальном направлениях. В двуслойном течении у входа в ак¬тивную зону выше приосевой рециркуляционной области наблюдается по крайней мере еще одна, более мелкая, область с рециркуляционным движени¬ем. Такая ячеистая структура характерна для областей распада циркуляционно-продольных течений в виде так называемой пузырьковой формы. Многослой¬ное контрвихревое течение имеет более сложную ячеистую структуру, что спо¬собствует его более интенсивному распаду.

0,8

МІМюнШШиіШ г1,0ІП0

0,6

^BggEgTffi

а)

ИИЖИИНИнпк

^^^^^ИааВУсдЧЕКИ'-НЛ і\_к

0,4

0f

'гвдтсГ^ТЗНі^ГХ'Н- ІГТтЧ LI І ГТ ЖЕ^^Н^Т^С^І^^'кГТІЧ, І ГН-LI

ШММШІЩШІ І ITJu2,0i iflt1,0

0,2

г

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40

0

б)

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40

X

Рис.7 Вихревые поля в двуслойном контвихревом течении: а) - ωθ(^Де), б) - ω^Де)

0,8

0,6

1

0,4

0,2

0

г

Анализ данных, полученных при теоретическом исследовании вихревой структуры двуслойного (рис.7) и многослойного контрвихревых течений пока-

16

зывает, что в их внутренних слоях на участке активной зоны вдоль радиуса ге-нерируются каскады концентрических вихрей противоположного знака.

Подобную развитую ячеистую структуру вихревых полей невозможно на-блюдать ни в продольно-осевых потоках, где генерирование завихренности ис-ключительно одного знака обусловлено только вязким торможением жидкости в пристенном слое, ни в циркуляционно-продольных течениях с однонаправ¬ленной закруткой слоев (в однородных циркуляционно-продольных течениях). Таким образом, структура контрвихревых течений формируется под преобла¬дающим воздействием внутренних процессов в зонах генерации каскадных вихревых полей, обусловленных силами вязкости. В целом это кардинальное отличие контрвихревых течений от продольно-осевых и циркуляционно-продольных.

Расчеты показали, что при числе Рейнольдса, равном Re = 500, и заданных параметрах контрвихревых течений генерируемые на входе в активную зону азимутальные (ωθ) и аксиальные (ωх) вихри достигают значений более 500 нор-мированных единиц. Это в несколько раз превышает максимальные значения вихревых полей, генерируемых при тех же числах Рейнольдса в циркуляцион-но-продольных течениях с любой степенью закрутки потока, и, тем более, в продольно-осевых течениях, где единственная не нулевая компонента вихря (ωθ) близка к 4-м нормированным единицам, т. е. более чем на два порядка ни¬же. Существенно менее мощными в контрвихревых течениях являются ради-альные вихри (ωг), которые при заданных условиях достигают значений до 4-х нормированных единиц, то есть в контвихревых течениях продольные частные производные скоростей на несколько порядков ниже радиальных.

Вязкие касательные напряжения отражают вихревую структуру потока, а нормальные являются свойством неразрывности среды. Распределения каса-тельных и нормальных напряжений в двуслойном и многослойном контрвихре¬вых течениях, полученные в соответствии с функциями (21)-(22), показывают, что все компоненты касательных напряжений равны нулю на оси канала при г = 0, а нормальные напряжения имеют здесь гладкий экстремум, при котором д/дг = 0, это определяется свойством плавного перехода кинематических ха¬рактеристик движения сплошной среды через ось симметрии контрвихревого течения. Одновременно все нормальные напряжения и касательные напряжения τθх равны нулю на твердых границах потока, что связано с равенством нулю всех компонент скорости жидкости на стенках трубы.

Обращает на себя внимание существенная разность функционально свя-занных между собой компонент касательных напряжений. Так, например, при

д Л^л \_ д AQх\

напряжения τrθ более чем на порядок превосходят τθх. Первые определяют зату-хание закрутки в радиальном направлении, вторые - в аксиальном. Соотноше¬ния τнθ и τθх, а также τхг и τхх подтверждают справедливость высказанного ранее положения, согласно которому д/дх « д/дг.

Наиболее значительные напряжения наблюдаются в начале активной зоны

17

в створе x = 5R. Это является отражением процесса интенсивного вязкого взаи¬модействия противоположно закрученных слоев и переформированием профи¬ля аксиальных скоростей, связанным с этим взаимодействием.

Перечисленные особенности принципиально отличают контрвихревые те-чения от течений циркуляционно-продольных, где существенные напряжения в основном сконцентрированы в приосевом ядре, и отличают от продольно-осевых, где единственными ненулевыми являются продольно-радиальные каса¬тельные напряжения τxr, значения которых невелики, и например, в течении Пуазейля изменяются по радиусу по линейному закону

достигая у твердых границ потока при г =1 нормированного значения -4.

В начале активной зоны напряжения в толще контрвихревых течений дос¬тигают значений десятков и сотен нормированных единиц, несколько раз меняя знак вдоль текущего радиуса. Такие напряжения как бы «рвут» поток. Радиаль¬ные распределения напряжений τхг, соответствующие течению Пуазейля, реали¬зуются в заданном контрвихревом двуслойном потоке при Re = 500 только к створу х =АШ , а в многослойном - к створу х =20R.

Сопоставляя двуслойное и многослойное контрвихревые течения, можно наблюдать в последнем существенное нарастание тензора вязких напряжений. Это нарастание практически пропорционально нарастанию числа формируемых завихрителем на входе в активную зону взаимодействующих слоев. Так, для двуслойного контрвихревого течения затухание вязких напряжений наблюдает¬ся к створу, расположенному на удалении 40 радиусов от начала активной зо¬ны, в то время как в многослойном контрвихревом течении с 4-мя взаимодейст¬вующими слоями подавление напряжений мы наблюдаем уже к створу х = 20R.

В конце главы рассмотрены вопросы устойчивости контрвихревых тече-ний. В качестве методов исследования использованы методы Рэлея и Ричардсо¬на, в последующем усовершенствованные А.Л. Зуйковым. Опуская существо этих методов, остановимся на полученных результатах.

Расчетами для двуслойного и многослойного течений установлено не-сколько областей с неустойчивым течением, где значение критерия Ричардсона отрицательно. Это области вдоль стенок камеры смешения, области на грани¬цах контакта взаимодействующих закрученных потоков и центральное вихре¬вое ядро.

Области с устойчивым течением, где критерий Ричардсона положителен, локализуются внутри слоев с противоположной закруткой, вдали от границ их взаимодействия.

В заключение отметим важную особенность вязких контрвихревых течений, связанную с тем, что их структурные характеристики описываются распределениями в виде рядов Фурье-Бесселя

f(r,х,Re) = Re\* XGA(V)exP(-^« —), (23)

и=і Re

либо в виде произведений рядов Фурье-Бесселя

18

00 X °° т

f(r, x, Re) = Re6 У G„Jm (A„r) ехр(-Ли2 —) x У GkJm (Akr) exp(-A2 —), (24)

Re ТІҐ Re

и=1 ±NA/ Ar=l

действительные нули функ-0, Jx(λk) = 0); Gn, Gk - посто-

где Z? - показатель степени (& = 0 или -1); λпи λк-ции Бесселя первого рода первого порядка (J\(λn) = янные интегрирования.

Анализ показывает, что согласно (23) и (24) у сопоставляемых потоков с одинаковыми постоянными Gn и Gk и на равном относительном расстоянии от входного створа активной зоны радиальный профиль произвольной характеристики течения, например, компоненты скорости, вихря или напряжения и т.д.:

а) будет одним и тем же при Ъ = 0, т. е. если число Рейнольдса (Re) не

вынесено за знак суммы ряда;

б) в противном случае (при Ъ = -1) форма профилей у сопоставляемых потоков

сохранится, но их относительный масштаб будет определяться соотношением

чисел Рейнольдса.

Во второй главе рассмотрены вопросы гидравлического расчета сооруже¬ний и технологического оборудования, реализующих эффект взаимодействия спутных коаксиальных противоположно закрученных потоков. Гидравлическая расчѐтная схема показана на рис.8.

S AГ\*" БГ\*" Продольный разрез

Рис.8 Гидравлическая схема

контрвихревого аэратора(эжек-

тора): 1–камера закрутки внеш-

него потока,2–камера закрутки

внутреннего потока, 3–аэрацион

ный канал,4–обтекатель, 5–ка-

мера смешения.

В механизмах смешения спутных коаксиальных противоположно закру-ченных потоков и затопленных струй с поперечным сдвигом скоростей (ΔV = V1 – V2) имеется аналогия в законах расширения слоев смешения (b) и затуха-ния скоростей сдвига (рис. 9).

При сопряжении закрученных потоков, не имеющих сдвига продольных скоростей, на основе тех же положений Абрамовича, согласно которым ско-рость нарастания толщины слоя смешения пропорциональна радиальному гра-

19

Рис.9 Схема смешения коаксиаль ныхпотоков:1 – стенка камеры сшения,2 – обтекатель, 3 – ось камеры смешения

12

12

V1 и V2 – продольные скорости периферийного и внутреннего потоков соответ-

К„

диенту скоростей, было получено

tgP = с(tga1-tga2), где с - коэффициент структуры, с = 3,4а; Ц и а2 -периферийного и внутреннего потоков

и

tga2

й

tea, = —

у

(25) осредненные углы закрутки

92

1в2

ственно, ^ и w

осредненные по расходу азимутальные скорости.

В рамках модели квазипотенциального течения имеем

J

«і

й =

м91

J uQiuxi2%r dr = 2Ayx (1 - VI - ^),

1 rx

1

24^(1-^1-^)

uQ2= — \uQ2ux22%rdr

t^2 rx

здесь Q1 и Q2 – расходы периферийного и внутреннего закрученных потоков, А1 и А2 – числа Абрамовича для периферийного и внутреннего закрученных пото¬ков, s1 и s2 – относительные площади живых сечений периферийного и внут¬реннего закрученных потоков, знак «минус» учитывает отрицательную закрут¬ку внутреннего потока. Отсюда

f

tgcq =24(1-^1-^),

(26)

tga2= -24(1-^1-^).]

В случае совместного сдвига как азимутальных, так и продольных скоро-стей смешение коаксиальных закрученных потоков определяется величиной

X = (tga1-tga2) 2+ П—^ ,

1 ^1 + yJ

где γ - коэффициент спутности

к

ms

(27)

У

к

2 21

mls2

20

т1 и т2 – коэффициенты расходов периферийного и внутреннего закрученных потоков.

Тогда угол расширения слоя смешения при взаимодействии коаксиальных потоков в общем случае может быть найден из равенства

tgP = с

(tgoc1-tgoc2) 2+f1 Y'

2

(28)

Если в общем случае в (28) по аналогии с (25) положить tg(3 = 3,4аа

то

аа = а

(tgo^-tgoc^+f1 Y'

2

(29)

где аα - коэффициент структуры при сопряжении коаксиальных потоков.

Отметим, что формула (29) справедлива для любого случая коаксиального сопряжения потоков как при закрутке, так и без неѐ.

Поскольку тангенс угла (28), с другой стороны, равен

tgB = -,

/

где Ъ и / - ширина слоя смешения и расстояние от створа сопряжения потоков (рис. 9), то длина начального участка, на котором слой смешения достигает стенок камеры активной зоны, будет равна

0,29ЛД

2

/ ZZ

(30)

а

(tgOL-tgOL^+f^

1 2 ^1 + yJ

здесь ширина слоя смешения принята равной толщине периферийного потока, движущегося в кольцевом канале между стенками камеры смешения и разде-ляющим потоки обтекателем

b = ΔR = Rx = R2. После начального следует основной участок, на котором в условиях ин¬тенсивного взаимодействия потоков завершается их перемешивание и происхо¬дит выравнивание скоростей. Для расчета длины основного участка (/о) можно воспользоваться данными Абрамовича, согласно которым выравнивание скоро¬стей может быть описано зависимостью

,АтА 0,96(ДСЛ

(АСУ), =; ,

^ + 0,29 АД

где (AU\ и (AU\ - скорость сдвига в начале основного участка и в конце не¬го (в конце камеры смешения).

Нетрудно видеть, что при (АС/)/ = 0 длина основного участка /0 равна бес¬конечности. Положим остаточную скорость сдвига равной 5% от начальной, тогда приходим к уравнению

21

(AU\ (At/)°0

0,96

(tgotj

откуда

а

о

0,05 =

^ + 0,29 AR

18,91ЛД

2

(31)

Общая длина камеры смешения (длина активной зоны) находится сумми-рованием (30) и (31)

lKC = lH + l0, в долях от радиуса камеры смешения с учетом R = R1 она составит

/

КС

R

240(1-A:)

(32)

m^2 - m2^

2

+

4^(1-^/1-^)+^(l-^/i-^)!

\

Определение гидравлических характеристик сооружений (технологическо¬го оборудования) при известной их форме и размерах относится к так называе¬мой «прямой задаче». В процессе проектирования такая задача встречается редко, на практике чаще приходится иметь дело с «обратной задачей», заклю¬чающейся в расчете формы и размеров сооружения, оборудования или его эле¬ментов при заданных исходных характеристиках.

В основу проектирования контрвихревых систем положены три условия, которым она должна удовлетворять: 1-система должна обеспечивать полное гашение циркуляции взаимодействующих закрученных потоков в пределах ак¬тивной зоны; 2-обладать заданной пропускной способностью; 3-обладать тре¬буемой технической эффективностью.

Первое условие сводится к равенству моментов количества движения

МХ=М2 взаимодействующих закрученных потоков. Оно выражается уравнением

0.

к

(33)

2-s

2-s

12

Это уравнение показывает связь относительных площадей «критических сечений» периферийного (s1) и внутреннего (s2) закрученных потоков при вы-ровненных моментах их количества движения и заданном отношении

к

#2 Я

радиусов их каналов. При заданном k уравнение имеет множество решений, удовлетворяющих условию: s1 и s2 являются действительными положительны-ми числами, меньшими единицы, при этом каждому значению s2 соответствует единственное значение s1.

22

С относительными площадями s1 и s2 функционально связаны геометриче¬ские характеристики А1 и А2, которые в свою очередь определяют форму и раз¬меры локальных завихрителей контрвихревых систем

2 71ЗД

1-5,

1101

s

s

\

W^

і

A1

Ї

2 7СЗД

1-5

24)2

(34)

4 =

s

M

5o

«A2

Графики связующих функций А =у(Д) для различных задаваемых зна-чений к = R2IRi {к назначается в пределах от 0,5 до 0,8) показаны на рис. 10.

Графики имеют логарифмическую шкалу и охватывают всю реально возмож-ную область функционального изменения параметров контрвихревых систем вне зависимости от их назначения.

0 -0.4

 -0.8

-1.2 -1.6

-2.0

 -2.4

-2.8

 -3.2

-3.6

 -4.0

-4.4

 -4.8

-5.2

 -5.6

-6.0

8.0

7.5 7.0

6.5 6.0

5.5 5.0

4.5 4.0

3.5 3.0

2.5 2.0

1.5 1.0

ln(A2 )

Согласно второму условию обеспечения требуемой пропускной способно¬сти при независимой работе спаренных вихревых камер расход контрвихревой системы записывается в виде

ln(m0 )

 —- —- —-^

— . \_\_ ^~"~" —- «ч

— lf ^ ^ Ч> < .) / /

 ^ ч \ / / /

 -

 х к \ / / / А

\ \ V v / / //

ч \ In (М ) >< V с /

\

S Ч V у \ V <^> \

Ч \ <. ^Ss -^ k= L5, -"' у / •у > / S <> \

 \ ^ k=t •6, ^-\*"\*\* \ \ч ч\

 \ -. ^ </ \ О Л •N

 \, у, \ Л N

 \ N

 N

-2.5 -1.5 -0.5 0.5 1.5 2.5 3.5 4.5

-3.0 -2.0 -1.0 0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0

Рис.10 Общие гидравли-ческие и геометрические параметры контрвихре-вых систем в функции ln(A2)

P~s2

,2 М52

+ к 2V 2

= тп

(35)

Контрвихревые струйные аэраторы, эжекторы и ферментеры, био- и хими¬ческих реакторов реализуют две особенности : 1-формирование в закрученных потоках жидкости приосевых вакуумных зон, обеспечивающих эжекцию в них воздуха или газа; 2-наличие высокой турбулентности на участке взаимодейст¬вия закрученных потоков. В сумме это позволяет получить диспергированную газожидкостную смесь с большой площадью контакта фаз и высокую эффек¬тивность растворения газа в жидкости.

В этих случаях задаются коэффициентом эжекции

23

, QA

^=Q , (36)

здесь QA - объемный расход эжектируемого воздуха (газа).

По объему эжектируемого и растворенного воздуха (газа) судят об обеспе¬чении третьего условия, согласно которому система должна обладать требуе¬мой технической эффективностью. Для этого в диссертации разработаны до¬полнительные номограммы.

Построен алгоритм графоаналитического расчета контрвихревых аэрато-ров и эжекторов, который состоит в следующем:

- для заданного значения кА вычисляют ln(кА) и, принимая к = R2/R1, по гра¬фику определяют соответствующее значение ln(А2);

- далее по графикам в соответствии с ln(А2) и к = R2/R1 находят значения ln(ли0) и ln(А1);

- по найденным значениям коэффициента расхода т0 и геометрическим ха-рактеристикам локальных завихрителей А1 и А2 при заданных расходе Q и на-поре Н на контрвихревой системе вычисляют радиус камеры смешения

R = R1

О

%т,

\

Ш (37)

и подбирают тип и размеры периферийного (1) и внутреннего (2) локальных за-вихрителей.

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с экспериментальным исследованием контрвихревых течений на физических моделях и натурных объектах. Целью этих исследований являлось получение экспериментальных данных по пропускной способности, эффективности гашения энергии, рас-пределению скоростей потока и давлений в проточном тракте контрвихревых систем, необходимых для разработки и обоснования методов их гидравли-ческого расчета.

Гидравлическое моделирование контрвихревых течений основывается на теории механического подобия, включающей подобие геометрическое, кинема¬тическое и динамическое. Отметим основные критерии динамического подо¬бия применительно к контрвихревым течениям. Поскольку последние на прак¬тике являются турбулентными потоками вязкой жидкости, при их физическом моделировании в условиях установившегося движения справедлива следующая система критериев динамического подобия

2

Re > Rerp Fr = — = Шет,Еи = 2 = idem,A. = ^ = idem. (38)

gR PV 2RnIi

Среди традиционных условий, согласно которым задаваемые на физической модели числа Рейнольса (Re) должны превышать его известные граничные значения, a числа Фруда (Fr) и Эйлера (Ей) должны обеспечивать динамическое подобие соотношения основных действующих в потоке сил, имеется также число Абрамовича (А), отражающее соблюдение динамического соотношения момента количества движения и импульса. Последний критерий

24

исключительно важен при моделировании любых циркуляционных течений, в том числе, циркуляционно-продольных, к которым относятся контрвихревые. Все указанные выше критерии динамического подобия соблюдались на всех моделях и натурных объектах, исследования которых рассмотрены в главе.

Исследовано было несколько моделей и натурных объектов. Основные результаты физических исследований сводятся к следующему.

Начальные исследования контрвихревых систем ориентировались на разработку напорных гидротехнических водосбросов и были выполнены на низконапорном гидравлическом стенде, показанном на рис.11. Режим работы модели определялся количеством полностью отрытых водоводов и обозначался трехзначным числом, где первая цифра соответствовала числу открытых водоводов периферийного закрученного потока, вторая – числу водоводов внутреннего потока и третья обозначала режим работы центрального водовода.

Рис.11 Низконапорная модель: 1 – напорный патрубок; 2 – подводящие цилин¬дрические водоводы (по три канала на каждый завихритель); 3 – центральный подводящий водовод (один канал); 4 – задвижки; 5 – воздуховод; 6,7 – локаль¬ные завихрители внешнего и внутреннего контрвихревых потоков; 8 – камера взаимодействия контрвихревых потоков; 9,10 – элементы нижнего бьефа.

Например, запись 231 означает, что при данном режиме открыты два водовода периферийного потока, три водовода внутреннего закрученного потока и центральный водовод (канал); 330 – открыты три водовода периферийного потока и три водовода внутреннего потока, а центральный водовод закрыт. Поскольку безнапорное осевое течение в отводящем лотке (туннеле в натурных условиях) является важным условием надежной работы водосбросов, то в процессе исследований основное внимание было уделено «симметричным» режимам работы периферийного и внутреннего локальных завихрителей (331, 221, 111, 330, 220, 110) и режимам, близким к ним (131, 231, 121, 130, 230, 120). На этих режимах поток на выходе из камеры смешения имел малую остаточную закрутку.

В общем случае, независимо от применяемых конструкций локальных

завихрителей, в качестве характеристики пропускной способности

25

режим 111

контрвихревых систем р ц ежелес1 о 0образно использовать коэффициент расхода, вычисляемый по действующему напору Н и площади кам2 е 1ры смешения радиусом R:

m = Q/xR2j2^H, (39)

здесь Q - суммарный расход взаимодействующих потоков.

Результаты исследований показаны на рис.12. Исследования выполнены в автомодельной зоне по Рейнольдсу, при этом режимы с работающим центр аль¬ным водоводом имеют существенно более высокую пропускную способность.

0.40 0.35 0.30 0.25 0.20 0.15 0.10

а) m б)

m

режим 331

режим 330 /

+ ♦ /» » ФФФФФФ

♦ ,» » ФФФФФ»

» І» »»»Ю^

231 <

221 -

 о /о »»ооооо^

/

230.

220

Г

131 О"

д

О О ОООО00&

/

121 „ л ^AAA/VWV

130 о—»/» <><><хххф

120 т д /А АААА&Ц^

110 «—• / \*\*

111 .

0.50 0.45 0.40 0.35 0.30 0.25 Re 0.20

Re

1 11I I I I I

2

3 4 5 6 7 8 9

100000

2

3

3 4 5 6 7 8 9

100000

10000 100000 10000

Рис.12 Коэффициенты расхода модели контрвихревого водосброса при выключенном а) и включенном б) центральном водоводе.

Важнейшей характеристикой является способность гасить избыточную энергию потока воды. Эта способность характеризуется коэффициентом гаше-ния энергии

j7 = \-V2/2gH. (40)

Г)

0.80 0.75 0.70 0.65 0.60 0.55 0.50

Г)

J J

а)

режим 110 120

220

130

♦ і\* \*

^ \* 2

330

Н, м

0.75 0.70 0.65 0.60 0.55 0.50 0.45

б)

• • • / режим 111

•

д Л 121

А О— —\*— 4,' ^ 221±

«- « "^ — «§ \* о 131i —Ь

#~~ ♦ / \* ~ О

1 \* « ^231" ♦

 • \*331

Н, м

о

2

3

4

5

6

7

8

0

2

3

4

5

6

7

8

Р 0ис.13 Коэффициенты гашения энергии на модели контрвихревого

 г

водосброса при вр ы еж к и л м ю 110ченном а) и включенном б) це ежнтральном водоводе

1

0Результаты исследований (рис.13) 0п.6о5 казывают существен12н1о более высо-

ния0. 6п0 одвода осевого потока в приосевую0.5 5зону камеры смешения. П231редельный

кую энергогасящую спосо2б2н0 ость контрвихревой системы в условиях исключе-

0.65 0.60 131

коэффициент гашения эн2е30ргии на данной модели составил 3371 8-80% от

действующего напора.

Re

0.50 Re

2 3456789 2 3

10000 100000

26

Надежность высоконапорных водосбросных систем существенно зависит от динамических воздействий потока на элементы проточного тракта. На рис.14 показано изменение стандартов пульсаций давления на стенках по длине (l) камеры смешения, створ начала камеры обозначен l = 0.

Рис.14 Стандарт пульсаций давления на стенках камеры взаимодействия (смешения) контрвихревых потоков

Пульсации давления на стенках достигают максимального значения на расстоянии 0,67R от начала камеры смешения (от створа соединения закрученных потоков). До этого створа пульсации давления составляют около 2% от напора, что соответствует стандартному их уровню для развитого турбулентного течения. В створе максимума стандарт пульсаций возрастает по отношению к обычному уровню примерно в 3-5 раз.

Жгутовая динамика больших водных масс представляет исключительную

опасность, являясь причиной многих аварий гидротурбин при работе в неопти¬

мальных режимах. Для появления жгутовой динамики необходимо, чтобы в

приосевой зоне (ядре, жгуте) закрученного потока давление было существенно

ниже, чем в близко расположенных створах ниже по течению. Тогда значи¬

тельные массы воды из створов ниже по течению под действием

отрицательного градиента давления втягиваются в ядро встречного

закрученного потока, вступают с ним во взаимодействие, закручиваются и

выбрасываются обратно. Процесс периодических «заплесков» в результате

меняет структуру закрученного течения: прямолинейная ось жгута

закрученного потока искривляется и начинает вращаться вокруг

геометрической оси водовода (прецессировать) с некоторой угловой частотой Ω. Схематично это показано на рис.15.

Рис.15 Механизм потери закрученным потоком жгутовой устойчивости

В целом экспериментальные данные показывают, что уровень динамических нагрузок, определяемый нормированным стандартом пульсаций давления на стенках камеры смещения контрвихревого водосброса, и равный в

27

основном 4-6 % от напора, ниже, чем в других, используемых в настоящее время устройствах напорного гашения энергии потока в виде водобойных камер различных конструкций. Объяснение этому можно дать тем, что отли-чительной особенностью контрвихревых водосбросов является создание таких условий сопряжения взаимно гасящих энергию друг друга потоков, при кото¬рых зона их наиболее интенсивного взаимодействия располагается в толще течения и не сразу замыкается на стенках камеры смешения.

Структура контрвихревого течения исключительно сложна, характе-ризуется значительным уровнем флуктуаций местных скоростей, энергий, давлений. Подобные измерения сегодня выполняют с помощью лазерных доплеровских анемометров (LDA), термоанемометрической аппаратуры(ТА) и систем PIV, входящих в состав измерительно-управляющих компьютерных комплексов.

Исследования выполнялись как на воде, так и на воздухе. На рис.16 пока-зана структура двуслойного контрвихревого течения на выходе из активной зо¬ны, полученная на воздушной среде при числах Рейнольдса, равных Re = 1,027.105.

Рис.16 Кинематическая структура двуслойного контрвихревого течения на вы¬ходе из активной зоны: слева изолинии аксиальной скорости их , справа вектор¬ное поле скорости й^=йг+йев мерном сечении камеры смешения на выходе из активной зоны

Особенности моделирования контрвихревых сооружений и технологическо¬го оборудования практически не описаны в литературных источниках. Учиты¬вая это, были выполнены уникальные испытания масштабной серии моделей контрвихривых систем гасителей избыточной энергии водного потока.

Для исследования масштабной серии было выполнено три модели: крупная (К-модель), средняя (С-модель) и мелкая (М-модель). При назначении масшта-бов моделей за основу был выбран ряд, представляющий геометрическую про¬грессию c числом 2'1 в основании. За характерный размер при определении ли¬нейного масштаба геометрических размеров моделей принято отношение диа-

28

метров камеры гашения DКГ меньшей модели к большей или натурного объек¬та, то есть DК /DН =DС / DК= DМ / DС= Лi, где DН - диаметр камеры гашения

натурного объекта.

Основное внимание было уделено изучению симметричных режимов рабо¬ты моделей контрвихревого устройства - гасителя энергии гидротехнического водосброса, в которых моменты количества движения внешнего и внутреннего закрученных потоков одинаковы и которые рекомендуются как эксплуатацион-ные для применения на натурных обьектах.

0.0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0

Рис.17 Зависимости коэффициентов расхода внутреннего тангенциального за-вихрителя т2 (слева) и гашения энергии ц (справа) от относительного напо-ран = н/нМАКС.

Исследования показали (рис.17), что менее всего подвержены влиянию мас-штаба моделирования знaчения коэффициентa расхода внутреннего завихрите-ля. Это объясняется тем, что на условия в выходном отверстии внутреннего за-вихрителя менее, чем в остaльных выходныx отверстиях, влияют другие пото¬ки. Коэффициент 77 практически одинаков (в районе 98%) и не зависит от мас¬штаба моделей при соблюдении геометрического подобия. Система обладает уникально высокой энергогосящей способностью. Практически вся избыточная энергия потока в результате взаимодействия коаксиальных потоков гасится в пределах камеры гашения, длина которой составляет, как показывают опыты, 6-8радиусов трубы. Причем с увеличением масштаба модели коэффициент га¬шения несколько возрастает-до 99%. Такие высокие значения коэффициента гашения наблюдаются на режимах без подвода воздуха в зону взаимодействия противоположно закрученных слоев жидкости. При подводе воздуха в зону взаимодействия энергогасящая способность несколько снижается.

Появление идеи о создании аэрирующих устройств на базе контрвихревых систем обусловлено двумя наиболее характерными свойствами последних. Первое - наличие приосевого разрыва сплошности в закрученном потоке жид¬кости с давлением ниже атмосферного и возникновением в этом разрыве транс¬портирующей способности газа. Второе - наличие значительного запаса энер-

29

гии на участке взаимодействия закрученных потоков в виде зоны с высокой ис¬кусственно созданной турбулентностью, которая может быть использована для диспергации воздушных масс, поступающих в зону повышенной динамики и образования множества мелких пузырьков с большой площадью поверхности контакта фаз. Последнее обстоятельство приводит к резкому повышению про¬цесса растворения кислорода воздуха в воде уже на этапе взаимодействия вод¬ных потоков. Следующим этапом интенсификации насыщения воды кислоро¬дом является контакт струи с прорабатываемым массивом жидкости.

Рис.18 Экспериментальная установка: 1 - Рис.19 Коэффициент эжекции в за-насос; 2,3 - задвижка и напорный водо- висимости от подаваемой к аэра-вод; 4 - локальные завихрители; 5 - каме- тору энергии потока жидкой фазы ра смешения; 6 - прорабатываемый мас- H=Eпод/ρg сив жидкости; 7.- воздуховоды; 8 - по¬дающий патрубок

Для изучения характеристик контрвихревых аэраторов были проведены модельные испытания на специально построенных для этой цели установках. Одна из установок, созданная в лаборатории кафедры ИВЭ МИСИ, показана на рис.18. В процессе экспериментов проводились измерения давления в различ¬ных точках проточного тракта, расхода воды в целом через устройство и через каждый из завихрителей, расход воздуха. Характеристикой эффективности аэратора служит его эжектирующая способность, определяемая коэффициентом эжекции kA=QA/Q. На рис.19 показан график зависимости коэффициента эжекции исследуемой аэрационной установки от энергии (напора) потока, по¬ступающего в устройство.Здесь кА,кА1 и кА2 - коэффициенты эжекции соот¬ветственно суммарный, внешнего вихря, внутреннего вихря. Значение суммар¬ного коэффициента эжекции может превышать значения 1,6 при длине камеры смешения 6.9 DКГ.

зо

Наличие высоких скоростей потока, при которых работает контрвихревое устройство, предопределяет необходимость прогноза кавитационных явлений. Поскольку работа устройства основана на взаимодействии закрученных пото-ков, для которых характерно разделение на зоны высокого и низкого давления, исходной для анализа кавитационных условий должна быть картина статиче¬ских давлений в проточной части гасителя, выявляющая зоны низкого давле¬ния.

Рис.20 Распределение статического давления по длине проточного тракта.

Также важно знать гидростатическую нагрузку на элементы проточного тракта. На рис.20 показано распределение давления по длине проточного тракта контрвихревого устройства.Кавитационно опасными зонами являются зоны V-VII. Это наиболее опасный в кавитационном отношении участок начала камеры смешения потоков. Здесь имеет место срывная кавитация, возникающая в ос¬новном в толще потока на границе взаимодействующих вихрей, профильная в виде пузырьковой формы и перемежающаяся, обусловленная наличием пульса-ционного давления. Эти формы могут вызывать кавитационную эрозию.

Основные выводы

1. Контрвихревые течения относятся к пространственным неравномерным течениям, не встречающимся в природе. Характер и интенсивность гидро- и аэ¬родинамических процессов, происходящих в контрвихревых устройствах, обеспечивают эффективность их использования в самых разных отраслях со-

31

временной техники в целях перемешивания однофазных и многофазных сред, гашения избыточной механической энергии потока жидкости или газа, дезинте¬грации конгломератов, создания гомогенных сред, возбуждения механических колебаний и получения других технологических эффектов.

2. Анализ полученных теоретических распределений азимутальных скоро¬

стей щ в зависимости от координат г и х и числа Рейнольдса Re показывает,

что контрвихревое течение с равными моментами вращения противоположно закрученных потоков быстро, за счет сил вязкости, трансформируется в про-дольно-осевое течение без закрутки. Расчеты показывают, что длина активной зоны составляет порядка 40 радиусов камеры смешения. При увеличении числа взаимодействующих потоков с двух до четырех длина активной зоны снижает¬ся в два раза с 40 до 20 радиусов. Вязкость среды оказывает существенное влияние на длину активной зоны: при увеличении числа Рейнольдса (снижении вязкости) длина активной зоны увеличивается.

3. Разбаланс моментов вращения взаимодействующих коаксиальных слоев не изменяет длину активной зоны, однако на выходе из неѐ наблюдается не продольно-осевое, а циркуляционно-продольное течение с остаточной цирку¬ляцией в направлении вращения потока с более мощным начальным моментом количества движения. Последующее вырождение циркуляции в таком течении происходит медленно на участке пассивной трансформации течения.

4. Характерной особенностью распределения аксиальных скоростей в пре¬делах участка активного взаимодействия контрвихревых потоков является на¬личие мощных возвратных течений в приосевой области течения. Отрицатель¬ные значения аксиальных скоростей здесь достигают значений до их = -16 без¬размерных единиц в условиях математического эксперимента, проводимого при Re = 500. Возвратные течения занимают достаточно протяженную область и доходят до точки торможения в 20-ти радиусах от начала активной зоны, в то время как полная трансформация контрвихревого течения в продольно-осевое завершается к 40-ому радиусу. Изменение числа Re за счет вязкости, скорости течения или размеров трубы прямо пропорционально отражается на протяжен¬ности участка возвратного течения. Увеличение числа коаксиальных противо¬положно закрученных слоев с 2-х до 4-х пропорционально сокращает длину участка с возвратными течениями. Параболический профиль Пуазеля в матема¬тических экспериментах достигался к створу на расстоянии 80 радиусов от на¬чала активной зоны, причем как при 2-х, так и при 4-х слойном контрвихревом течении.

5. Значения радиальных скоростей в контрвихревых течениях более чем на порядок ниже азимутальных и аксиальных. Чем выше число Re, тем ниже зна¬чения радиальных скоростей. В расчетных створах получено, что радиальные скорости всегда отрицательны. Это говорит о том, что радиальные компоненты векторов местных скоростей направлены к оси потока на всей длине активной зоны. Однако в самом начале активной зоны будут наблюдаться восходящие токи жидкости от оси в сторону стенок трубы.

6. Во внутренних слоях контрвихревых течений на участке активной зоны вдоль радиуса генерируются каскады концентрических вихрей противополож-

32

ного знака. Вихревая структура контрвихревого течения формируется под пре¬обладающим воздействием внутренних процессов в зонах генерации каскадных вихревых полей, обусловленных силами вязкости. Ячеистая (каскадная) струк¬тура способствует их интенсивному распаду и вязкой диффузии (диссипации) циркуляции взаимодействующих потоков, являясь причиной перехода механи¬ческой энергии течения в тепло.

7. Наиболее значительные напряжения возникают в начале активной зоны

в створе x = 5R. Это является отражением процесса интенсивного вязкого взаи¬

модействия противоположно закрученных слоев и переформированием профи¬

ля осевых скоростей, связанным с этим взаимодействием. Эти напряжения зна-

копеременны вдоль радиуса и имеют место по всей толще потока от оси до сте¬

нок. В начале активной зоны в контрвихревых течениях имеют место наиболее

существенные радиальные и аксиальные градиенты всех компонент скоростей,

здесь вследствие высоких внутренних вязких напряжений поток теряет наибо¬

лее существенную часть своей механической энергии.

8. Основные принципы гидравлического расчета контрвихревых систем включают два положения: допустимость применять в гидравлических расчетах модель квазипотенциального течения и допустимость рассматривать гидравли¬ческую схему контрвихревого сооружения или технологического оборудова¬ния, состоящей из двух гидравлически независимых частей: подводящий уча¬сток и локальные завихрители; активная зона и отводящий участок. Первый подход основывается на том, что в высокоскоростных закрученных потоках, которые в основном применяются на практике, высоки числа Рейнольдса, в та¬ких высокотурбулентных потоках силами вязкости можно пренебречь и рас¬сматривать течение как квазипотенциальное. При этом аксиальная скорость, циркуляция, удельная энергия – величины постоянные во всех точках сечения, а распределение азимутальной скорости соответствует свободному вихрю. Особенность расчета системы «подводящий участок-локальные завихрители» в том, что разделенные обтекателем потоки под действием центробежных сил формируются в самостоятельные независимые безнапорные кольцевые течения со свободными поверхностями в их внутренних полостях. На участке «активная зона – отводящий участок» расчет выполняется на основе законов сохранения и сводится к определению характеристик течения на выходе из камеры взаимо¬действия потоков при известных их характеристиках на входе в нее.

9. Определение пропускной способности локального завихрителя носит универсальный характер, поскольку позволяет выполнить расчет любых конст¬рукций: тангенциального безкамерного, цилиндрического и лопастного завих-рителей. Поскольку кольцевой закрученный поток с полостью разрыва является безнапорным, движущимся в преобладающем поле массовых центробежных сил, то пропускная способность любого локального завихрителя определяется только его формой и размерами и не зависит от гидравлического сопротивления нижележащего тракта. Движение жидкости через локальный завихритель ана¬логично движению осевого безнапорного потока через водослив с широким по¬рогом.

33

10. В механизмах смешения спутных коаксиальных противоположно за-крученных потоков и затопленных струй со сдвигом скоростей имеется анало-гия в законах расширения слоев смешения и затухания скоростей сдвига. Полу¬чено значение длины участка, на котором происходит полное перемешивание взаимодействующих противоположно закрученных потоков жидкости и вырав¬нивание их скоростей. Длина камеры смешения состоит из начального участка, на котором слой смешения достигает стенок камеры активной зоны, и основно¬го участка, на котором происходит выравнивание скоростей взаимодействую¬щих потоков.

11. Разработаны основы проектирования контрвихревых систем путем ре¬шения обратной задачи, заключающейся в определении формы и размеров всех элементов проточного тракта при заданных исходных гидравлических характе¬ристиках. В основу положены три условия, которым должна удовлетворять всякая контрвихревая система: обеспечение полного взаимного гашения цирку¬ляции закрученных потоков в пределах активной зоны; обеспечение заданной пропускной способности; обеспечение требуемой технологической эффектив¬ности.

12. Анализ условий физического моделирования установившихся вязких контрвихревых течений показывает, что корректная система их динамического подобия ограничивается четырьмя критериям:

Re > Rerp Fr = — = idem, Eu = P 0г = idem, A. = Mi = idem.

gR рV 2RnIt

13. Гидравлические исследования контрвихревых систем с напорными ло¬кальными завихрителями показали, что зона автомодельности по Рейнольдсу соответствует Re ≥ 1.105. В этой зоне основные гидравлические параметры: ко¬эффициенты расхода и гашения энергии не зависят от числа Рейнольдса и, как следствие, от действующего напора. Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что условия автомодельности по Re для контвихревых течений наступают раньше, чем для продольно-осевых потоков. Несомненно, это результат искус¬ственной турбулизации течения, возникающей при взаимодействии коаксиаль¬ных противоположно закрученных потоков, значительно более высокой, чем турбулентность естественных продольно-осевых потоков.

14. Экспериментально установлено, что каждый из локальных завихрите-лей может рассматриваться как гидравлически независимый. При этом, танген¬циальные завихрители работают в условиях существенного подпора с низовой стороны. Особенно значителен подпор у внутреннего завихрителя, достигая значения 60-80% от действующего напора. Это важный вывод, указывающий на создание условий, препятствующих развитию кавитации на обтекаемых по¬верхностях.

15. Эффективность гашения энергии при взаимодействии коаксиальных противоположно закрученных потоков весьма высока, достигая на отдельных моделях 90-98% от напора. Эффективность гашения нарастает: а) - со сниже-нием количества работающих тангенциальных водоводов, б) - с увеличением

34

вакуума в центральной зоне контрвихревого течения на входе в камеру смеше¬ния, в) - при переходе от режимов работы с центральной осевой струей к ре¬жимам работы без центрального потока. Контрвихревой способ гашения энер¬гии транзитного потока имеет существенно более высокую эффективность в сравнении с внезапным расширением. Для эффективной работы контрвихрево¬го гасителя не требуется подтопления выходного сечения камеры смешения.

16. Пульсации давления на стенках достигают максимального значения на

расстоянии 0,67і? от начала камеры смешения (от створа соединения закручен¬

ных потоков). На этом участке динамика из сдвиговой зоны с интенсивным

массо- и энергообменом между двумя потоками и гашением их энергии, нахо¬

дящейся в толще контрвихревого течения, выходит на стенки камеры. До этого

створа пульсации давления составляют около 2% от напора, что соответствует

стандартному их уровню для развитого турбулентного течения. В створе мак¬

симума стандарт пульсаций нарастает по отношению к обычному уровню при¬

мерно в 3-5 раз. За зоной максимума интенсивность пульсаций плавно снижа¬

ется вниз по течению и к створу на расстоянии 5R от начала камеры вновь воз¬

вращается на стандартный уровень. Наибольшей энергией обладают колебания

с низкой жгутовой частотой. В целях предотвращения опасных динамических

нагрузок на элементы проточного тракта является необходимым предусматри¬

вать в контрвихревых водосбросах системы подвода либо воздуха, либо осевой

струи в приосевую зону в начале камеры смешения. Уровень пульсаций скоро¬

сти в начальном створе камеры смешения достигает чрезвычайно высоких зна¬

чений, равных σθ = 0,8 в азимутальном и σх = 0,55 в аксиальном направлениях.

Процессы интенсивного турбулентного массо- и энергообмена при контрвихре¬

вом взаимодействии потоков являются результатом исключительно высоких

градиентов угловых скоростей (Ω=iiθ/rj.

17. Фундаментальные экспериментальные исследования моделей мас¬

штабной серии позволили получить основные характеристики контрвихревых

систем в зависимости от масштабного коэффициента Л . Принятые в исследо¬

ваниях режимы согласовывались с условиями реальных режимов работы

контрвихревых систем, рекомендуемых для натурных объектов. Исследования¬

ми установлены автомодельные зоны по числу Рейнольдса Re и напору Н. Ус¬

тановлены их граничные значения. Выявлены закономерности изменения ко¬

эффициентов расхода, гашения энергии и гидравлического сопротивления всей

системы от масштаба модели. Произведено сравнение расчетных и опытных

значений этих величин.

18. При испытаниях, проводимых в процессе исследования масштабной

серии, рассматривались вопросы кавитации. Наиболее опасным с точки зрения

возникновения кавитации является начальный участок активной зоны (камеры

гашения). Здесь формируются области течения с отрицательными значениями

давления (вакуум) на длине порядка двух диаметров камеры. Эта длина при¬

мерно одинакова для всех моделей. Здесь наблюдается срывная кавитация, воз¬

никающая в основном в вихрях, на границах раздела противоположно закру¬

ченных потоков, пузырьковая и перемежающаяся. Последняя форма связана с

высоким уровнем пульсаций давления на стенках проточного тракта. Срывная

35

и пузырьковая кавитация возникает в толще потока и не воздействует на эле-менты конструкции. На крупномасштабной модели, проработавшей 500 часов при напорах до 70 м, кавитационная эрозия стенок не зафиксирована. Эффек-тивным способом борьбы с кавитацией является подвод воздуха в места с по-ниженным давлением, преимущественно в жгутовую область внутреннего за-крученного потока.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих печат¬ных работах автора:

1. Орехов Г.В., Боровков В.С., Волшаник В.В. Разработка методов и техноло¬гии очистки. восстановления и поддержания экологического состояния вод¬ных объектов на городских территориях. Сб. докл. Международн. н.-п. конф. "Критические технологии в строительстве", Москва. Октябрь 1998. М.: МГСУ. с. 215-217.

2. Орехов Г.В., Боровков В.С., Волшаник В.В. Оборудование и высокоэффек¬тивные технологии восстановления и эксплуатации городских водных объ¬ектов. Тезисы докл. Международн. конф. "Передовые технологии на пороге ХХI века". Октябрь1998 г. М.: НИЦ "Инженер", 1998. с. 392-394.

3. Орехов Г.В., Боровков В.С., Волшаник В.В. Технологии поддержания само¬очищающей способности воды в городских водных объектах. Тезисы докл. Международной конф. "Инженерная защита окружающей среды", Январь 1999 г. М.: МГУИЭ. с. 65-67.

4. Орехов Г.В., Боровков В.С., Волшаник В.В. Инженерная система поддержа¬ния качества воды в городских водных объектах. Материалы Международн. н.-п. конф. "Экология и жизнь". Февраль 1999 г. г. Пенза, с. 109-112.

5. Орехов Г.В., Боровков В.С., Волшаник В.В. Технология предотвращения кризисных экологических ситуаций в реках и водоѐмах города. Тезисы докл. н.-п. конф. вузов г. Москвы "Потенциал московских вузов и его ис-пользование в интересах города". 17-18 марта 1999 г. М.: МГСУ.

6. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Карелин В.Я., Зуйков А.Л. Инженерная гидравлика закрученных потоков жидкости. // Гидротехническое строительство. 2000. №11. с. 23-26.

7. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Карелин В.Я., Зуйков А.Л Вихревые аэрато-ры–принцип действия и конструкции . Сб. науч. тр., посвященный 70-летию ф-та ГСС МГСУ. М.: МГСУ, 2001. с. 95-101.

8. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Карелин В.Я., Свитайло В.Д, Скаткин М.Г.Струйно-вихревая аэрация в установке по очистке природных вод. Тезисы докл. Международн. н.-п. конф.–выставки "Строительство в ХХI веке. Проблемы и перспективы". 5-7 декабря 2001 г. М.: МГСУ. с. 183-189.

9. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Боровков В.С. Инженерные системы замкну-того водооборота для интенсификации процессов самоочищения воды в го¬родских водных объектах. В кн. "Инженерная защита окружающей среды. Очистка вод. Утилизация отходов." М.: Изд. АСВ, 2002. с. 74-97.

36

10. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Свитайло В.Д., Скаткин М.Г..Использование вихревых аэраторов для интенсификации процессов очистки природных вод. В кн. "Инженерная защита окружающей среды. Очистка вод. Утилизация отходов." М.: Изд. АСВ, 2002. с. 97-106.

11. Орехов Г.В., Боровков В.С., Волшаник В.В., Галант М.А., Родина А.С. Про¬ект повышения качества воды на участке реки Чермянки системой искусст¬венного увеличения проточности // Чистый город. №4(20), 2002. с. 12-18.

12. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Евстигнеев Н.М.. Зуйков А.Л. Влияние турбу¬лентной диффузии на процесс сепарации нефтесодержащих примесей в ци¬линдрическом гидроциклоне. Межвузовский сб. тр. по гидротехническому и специальному строительству. МГСУ – С.ПбГТУ. М.: МГСУ, 2002. с. 55-62.

13. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Евстигнеев Н.М., Зуйков А.Л. Эффективность применения гидроциклонов в технологиях очистки загрязненных вод. Тези¬сы докл. городской н.-.п. конф. "Московские вузы - строительному ком¬плексу Москвы для обеспечения устойчивого развития города". Март 2003 г. М.: МГСУ, 2003. с. 208-209.

14. Орехов Г.В., Боровков В.С., Волшаник В.В. Опыт классификации городских водных объектов по генетическим и инженерно-экологическим признакам. "Строительные материалы, оборудование, технологии ХХI века", 2004. №4(63), с. 62-63.

15. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Карелин В.Я., Мордасов А.П. Контрвихревые устройства для интенсификации процессов перемешивания, массо- и теплообмена, гашения энергии, дезинтеграции конгломератов. "Строительные материалы, оборудование, технологии ХХI века", 2004. №7(66). с. 34-35.

16. Орехов Г.В., Карелин В.Я., Волшаник В.В., Зуйков А.Л. Экспериментальное обоснование оптимальной формы проточной полости вихревого аэратора // Вестник Отделения строит. наук РААСН, вып. 9. Белгород, 2005. с. 229-237.

17. Орехов Г.В., Волшаник В.В. Дефицит растворенного кислорода в водо¬емах на селитебных территориях и системы искусственной аэрации и замкнутого водооборота // Вестник МГСУ. 2008. №1. с. 243-246.

18. Орехов Г.В.,Водные объекты на урбанизированных территориях и инже-нерные системы аэрации и замкнутого водооборота // Экология урбанизи-рованных территорий. 2008. №2. с. 88-93.

19. Орехов Г.В.,Гидромеханический способ улучшения качества воды в водных объектах // Вестник МГСУ. 2008. №4. с. 175-180.

20. Орехов Г.В. Использование искусственной аэрации на водоемах. Тезисы докл. науч.-техн. конф.. «Гидроэнергетика. Новые разработки и техноло-гии». СПб., 7-9 дек. 2005г. С.205-206.

21. Орехов Г.В. Гидромеханические способы улучшения качества воды в вод-ных объектах. Материалы юбилейной 10-й Международной межвузовской науч.-практ. конференции «Строительство – формирование среды жизне-деятельности» М.: МГСУ, 25-26 апреля 2007, с. 25-26.

22. Орехов Г.В. Создание экспериментального стенда для модельных ис¬

следований внутренней аэродинамики помещений методом цифровой

37

трассерной визуализации. «Вестник МГСУ».2012. №12. с. 117-124.

23. Орехов Г.В., Капустин С.В., Чурин П.С.Экспериментальные модельные исследования контрвихревых течений. «Науковедение» интернет-журнал №4(17)2013, Номер статьи 53ТВН413.

24. Орехов Г.В., Волшаник В.В, Зуйков А.Л. Гидравлический расчет про-точной части контрвихревых аэраторов // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. №12. с. 50-56.

25. Орехов Г.В., Боровков В.С., Волшаник В.В. Инженерные системы водо-оборота и аэрации для очистки воды в городских водных объектах // Экология урбанизированных территорий. 2010. №2. с. 21-31.

26. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Зуйков А.Л. Циркуляционные течения в науке и технике // Деловая слава России. 2011. №2(30). с. 48-50.

27. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Чурин П.С. Вихревой водосброс. Патент РФ №2483258. Приоритет изобретения 06.10.2011.

28. Орехов Г.В., Егорычев О.О., Ковальчук О.А. Дорошенко С.А Прора-ботка конструкции аэродинамической трубы для проведения аэроди-намических и аэроакустических испытаний строительных конструк-ций // Научный вестник Воронежского ГАСУ. 2011. Вып. №4(24), Серия «Строительство и архитектура», с. 25-29.

29. Орехов Г.В., Ахметов В.К., Волшаник В.В., Зуйков А.Л. Моделирование и расчет контрвихревых течений. М.: Изд. МГСУ, 2012. 252 с.

30. Орехов Г.В., Зуйков А.Л., Волшаник В.В Модель течения Громеки – Бельтрами // Вестник МГСУ. 2013. №4. с. 150-159.

31. Орехов Г.В., Зуйков А.Л., Волшаник В.В. Контрвихревое ползущее те¬чение // Вестник МГСУ. 2013. №4. с. 172-180.

32. Орехов Г.В., Зуйков А.Л., Волшаник В.В Распределение азимутальных скоростей в ламинарном контрвихревом течении // Вестник МГСУ. 2013. №5. с. 150-161.

33. Орехов Г.В., Зуйков А.Л., Волшаник В.В., Чурин П.С. Пропуск холо-стых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС (часть 1) // Гидротехническое строительство. 2013. №4. с. 51-56.

34. Орехов Г.В., Зуйков А.Л., Волшаник В.В., Чурин П.С. Пропуск холо-стых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС (часть 2) // Гидротехническое строительство. 2013. №5. с. 32-40.

35. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Уранзаяа Баяраа Особенно¬

сти рабочего процесса контрвихревых аэраторов и задачи их гидравли¬

ческих исследований//Экология урбанизированных территорий 2013,

№2, с.74-80.

36. Орехов Г.В.,Моделирование контрвихревых систем. Масштабная серия исследований.// «Науковедение» интернет-журнал 2013. №4(17). Иден¬тификационный номер статьи 54ТВН413.

37. Орехов Г.В., Расчет течения в проточной части высоконапорной гидро¬турбины с заторможенным рабочим колесом радиально-осевого типа. «Науковедение» интернет-журнал, выпуск№2. 2014, Идентификацион¬ный номер статьи 178ТVN214.

38

38. Орехов Г.В., Беликов В.В., Баяраа У. Методы увеличения эффективно¬сти аэрации открытых водных объектов на урбанизированных терри¬ториях «Вестник МГСУ», 2009,№2,с.278-291.

39. Орехов Г.В., Быков Ю.А., Чурин П.С. Расчет течения в проточной час¬ти высоконапорной гидротурбины с заторможенным рабочим колесом радиально-осевого типа. «Науковедение» интернет-журнал, вы-пуск№2. 2014. Идентификационный номер статьи 178ТVN214.

40. Руководство по проектированию и конструкторская документация вихревых аэраторов на донных водовыпусках плотин / Орехов Г.В., Мордасов А.П., Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Ахметов В.К., Иванова Т.А., Арискин Н.Н., Лебедева О.Э., Притчин В.П., Крымов А.Н. Роскомвод, Росгипроводхоз, МИСИ. М., 1992.

41. Орехов Г.В., Федоров А.Б. Датчик для измерения скорости потока Автор¬ское свидетельство № 871072. Приоритет от 07.10.1981г.

42. Орехов Г.В., Волшаник В.В., Вадатурский Д.А., Монахов Б.Е., Шилова Л.А., Щеннникова Г.Н. Инженерные системы водооборота и аэрации для очистки воды в городских водных объектах. Международная науч.-техн. конференция «Совершенствование турбоустановок методами математиче-ского и физического моделирования». 21-25 сентября 2009г. Харьков, Ук¬раина.