Витер Виктор Кириллович. Разработка техники и технологии исследования кавитационных явлений в гидравлических системах : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.02.- Красноярск, 2003.- 191 с.: ил. РГБ ОД, 61 03-5/3633-8





*О*

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

**ВИТЕР**

**Виктор Кириллович**

**Разработка техники и технологии исследования
кавитационных явлений в гидравлических системах**

05.02.02 - машиноведение, системы приводов и детали машин

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

В.А. Кулагин

Красноярск - 2003

ВВЕДЕНИЕ 4

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ 9

1Л. Диспергирование цемента и минералов 9

1Л Л. Влияние различных факторов на стойкость бетонов 11

1Л .2. Методы испытаний 27

1Л .3. Моделирование кавитационных течений 31

* 1. Машины и аппараты для кавитационной обработки 32
		1. Понятие кавитационной технологии 32
		2. Технические средства кавитационной обработки материалов 33
		3. Области применения кавитационной технологии 40
	2. Техника исследования кавитационных процессов с применением

[кавитационных труб 41](#bookmark21)

* + 1. Классификация кавитационных труб 42
	1. Исследования по обеспечению кавитационной стойкости бетонов при

низких отрицательных температурах наружного воздуха 43

1. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

КАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ 49

1. Основные принципы моделирования в кавитационных трубах 49
2. [Способы моделирования кавитации в трубах 53](#bookmark28)
3. Влияние границ рабочего участка на минимальные числа кавитации .54
4. [Кавитационные трубы разомкнутого типа 57](#bookmark32)
5. Особенности регулирования параметров потока 57
6. Теоретическая диаграмма рабочих режимов кавитационной трубы с

выбросным диффузором постоянного расширения 62

1. Теоретическая диаграмма рабочих режимов кавитационной трубы с

выбросным диффузором регулируемого расширения 64

1. Истечение из рабочего участка в регулируемый вакуум 71
2. Совершенствование кавитационных труб 73
3. Методика гидравлического расчета проточного тракта кавитационной

трубы 75

1. Методика расчета теоретической диаграммы рабочих режимов гидродинамической трубы с выбросным диффузором регулируемого

расширения 79

2.5. Пузырьковые гидродинамические трубы 82

1. Особенности моделирования режимов течения в скоростных

пузырьковых потоках 82

1. Способы получения скоростных пузырьковых потоков 83
2. Исследования пузырькового сверхзвукового потока в

гидродинамической трубе 85

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ 87
2. [Экспериментальная установка и методика проведения испытаний 91](#bookmark42)
3. [Программное обеспечение 97](#bookmark43)
4. Комплекс программ для автоматической градуировки средств

измерения 97

1. Комплекс программ для автоматического измерения и обработки

информации о параметрах потока и модели 98

1. [Методика проведения испытаний 100](#bookmark44)
2. Наладка и подготовка кавитационной трубы к испытаниям 100
3. Исследование границ области эксплуатационных режимов с моделью

обтекаемого бычка в рабочем участке 102

1. Исследование эксплуатационных режимов кавитационной трубы без

модели в рабочем участке 106

1. Определение эксплуатационных возможностей гидродинамической

трубы с выбросным диффузором 115

1. Создание вакуума в вакуумном баке при выбросе незатопленной

струи из рабочего участка 115

1. Методика проведения кавитационных испытаний образцов бетона 119
2. Материалы для раствора и бетона 123
3. Выбор комплексных добавок 126
4. Состав и свойства бетонных смесей 129
5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ 130

4.1 Кавитационные трубы 130

1. Согласование теоретической диаграммы рабочих режимов с

эксплуатационной 130

1. Разработка и внедрение конструкции кавитационной трубы

гравитационного типа с истечением в регулируемый вакуум 135

1. Влияние конструктивных элементов трубы на однородность поля

скоростей 137

1. Разработка и создание кавитационной трубы с улучшенными

характеристиками 141

1. Влияние степени турбулентности потока в рабочем участке на

характеристики трубы 147

1. Рабочий проект кавитационной трубы в установке №4 ВГЛ 150
2. [Создание гидродинамической трубы 2,5x2,5 м в лотке ВГЛ 155](#bookmark61)

4.6.. Результаты исследоваия кавитационной стойкости и

морозостойкости бетона 158

1. Влияние кавитационной обработки на прочность цементного камня.... 165

[ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ 172](#bookmark66)

[ЛИТЕРАТУРА 174](#bookmark67)

ПРИЛОЖЕНИЯ 188

**Актуальность темы исследований.** Гидроабразивный и кавитационный износ ряда деталей машин, которые работают в потоке воды, наносит значи­тельный материальный ущерб, исчисляемый миллионами долларов. Эрозии подвергаются детали гидротурбин, насосов, гребных винтов, опор скольжения, запорной и регулирующей арматуры систем гидроприводов, а также элементов гидросооружений.

Кавитация в гидравлических системах (машинах и аппаратах гидропри­водов) сопровождается ухудшением энергетических и эксплуатационных ха­рактеристик оборудования, кавитационной эрозией поверхностей проточного тракта, шумом и вибрацией. Кавитационные явления, возникающие в системах гидроприводов, насосах, гидротурбинах, водоводах и на водосливах ГЭС и, в общем случае, при движении тел с большими скоростями в водной среде, за­частую приводят к аварийным ситуациям, последствия которых требуют боль­ших капитальных затрат на ремонты и восстановления.

Вследствие практической важности эффектов, сопровождающих различ­ные виды кавитации, наблюдается повышенный интерес к исследованию кави­тационных режимов движения жидкостей, процессов эрозии различного обору­дования и материалов. Большой вклад в раскрытие важнейших закономерно­стей кавитации и кавитационной эрозии внесли И. Г. Гинзбург, Э. Г. Донченко, В. М. Ивченко, В. А. Кулагин, А. Ф. Немчин, А Тирувенгадам, М. П. Плессет, Ф. Хэммит, К. К. Шальнев и др.

Различные формы кавитации существенно отличаются друг от друга, по­этому, чтобы выявить общие закономерности кавитационной эрозии, необхо­димо детальное изучение каждой из них. Из-за сложности кавитационно­эрозионных процессов теоретический анализ их интенсивности представляет собой большую проблему.

При моделировании кавитационных процессов, которым посвящены ра­боты А. С. Горшкова, И. Г. Гинсбурга, А. А. Русецкого и др., также возникают большие трудности, связанные с обеспечением условий подобия и учетом мас­штабного эффекта.

Анализ литературных источников показывает, что сложные гидродина­мические процессы, протекающие в жидкости при различных формах кавита­ции изучены недостаточно. Поэтому задача повышения долговечности машин и оборудования, выяснения причин, вызывающих износ ведущих деталей путем создания и исследования оборудования для изучения кавитационных эффектов является весьма актуальной.

В связи с этим возникает много важных и недостаточно выясненных во­просов, например, о масштабном эффекте при переносе лабораторных резуль-

татов на натурные объекты, о нахождении и выяснении устойчивости выгодных режимов движения жидкостей и многофазных сред, о разработке рациональных каналов в соответствующих устройствах, аппаратах, оборудовании и режимов технологических процессов в условиях конкретных производств, ответы на ко­торые должны быть найдены в процессе всесторонних исследований.

Таким образом, работы, направленные на разработку технологии и со­вершенствование техники эксперимента (кавитационных труб, установок, реак­торов и др.) для проведения работ в натурных условиях с крупномасштабными образцами деталей машин, элементами приводов и материалов (например, бе­тонов реальной структуры при эксплуатации гидротехнических сооружений) носят актуальный ресурсосберегающий характер и решают важную научно­техническую задачу.

**Цель работы** состоит в создании техники и технологии исследования кави­тационных явлений в гидравлических системах приводов и гидросооружениях.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

разработка, создание и исследование кавитационных установок с целью определения характеристик режимов движения воды в натурных условиях (сверхзвукового, дозвукового, аэрированного и др.), максимально исключаю­щих масштабный эффект;

разработка инженерных методик построения диаграмм рабочих режимов кавитационных труб, позволяющих на стадии проектирования моделировать различные по характеристикам (числа кавитации, неравномерность поля скоро­стей, давления, возможность регулирования режимов работы и др.) типы тече­ния, в том числе, с минимальными числами Эйлера и кавитации;

экспериментальное определение основных характеристик кавитационных труб гравитационного напора разомкнутого типа, а также труб замкнутого типа;

разработка и создание различных конструкций кавитационных труб при плотине Красноярской ГЭС, позволяющих исследовать материалы (бетоны) в натурных условиях;

определение влияния различных факторов (интенсивности физико­механической кавитационной обработки, времени, водоцементного (В/Ц) от­ношения, марки цемента и др.) на прочность и кавитационную стойкость изде­лий из бетонов.

**Методика исследования.** Для решения поставленных задач использова­ны аналитические и численные методы решений. Разработан и создан ряд экс­периментальных лабораторных и крупномасштабных установок, проведены модельные и натурные физические исследования.

**Научная новизна.** Полученные в ходе выполнения результаты рассмат­ривались в аспектах энергоресурсосбережения (в частности снижения стоимо­сти эксперимента в гидродинамических трубах большой мощности) и расши­рения области применения критической кавитационной технологии. Усовер­шенствование технологии проведения натурного эксперимента с учетом мас­штаба и реальности структуры бетонов соответствует параметрам энергоэф­фективности и состоит в следующем:

создан и исследован ряд кавитационных установок, защищенных автор­скими свидетельствами на изобретения, экспериментально определены их ха­рактеристики (числа кавитации и Эйлера, неравномерность поля скоростей и давлений, степени турбулентности и др.), позволившие учитывать масштаб­ный эффект в ходе экспериментальных работ и при проектировании техноло­гического оборудования для исследования материалов на кавитационную стой­кость;

разработаны методики построения диаграмм рабочих режимов кавитаци­онных установок, позволяющие определить оптимальные режимы течения жидкости, в том числе с минимальными числами Эйлера;

исследованы характеристики гидродинамических труб разомкнутого и замкнутого типов, влияние выбросного диффузора за рабочим участком (РУ) на параметры потока, возможность создания в РУ монодисперсного пузырько­вого потока. В результате предложен новый способ создания пузырьковых те­чений, разработана новая схема гидродинамической трубы, позволяющая дос­тичь независимое от скорости регулирование давления в потоке при низких числах Эйлера, существенно расширен диапазон эксплуатационных режимов;

разработаны методы проектирования кавитационных труб различных ти­пов для исследования образцов различных конструкционных деталей машин (в том числе и бетонов) на кавитационную стойкость в натурных условиях;

определено влияние водоцементного отношения, времени и интенсивно­сти кавитационной обработки, состава и добавок цементных растворов на прочность и кавитационную стойкость бетонов гидросооружений, изготовлен­ных из цементов различных марок.

**Практическая значимость работы и внедрение результатов работы.**

Разработаны на уровне изобретения, исследованы и внедрены в производство схемы и конструкции кавитационных труб. Разработаны методики определения диаграмм режимов работы кавитационных труб замкнутого и разомкнутого ти­пов. На основании проведенных теоретических, модельных и натурных экспе­риментальных работ созданы технология и оборудование для физико­механической кавитационной обработки цементных и бетонных растворов. Усовершенствована методика проведения экспериментальных работ кавитаци­онных течений в крупномасштабных установках, внедренная в практику науч­ных исследований в Высоконапорной лаборатории (при плотине Красноярской ГЭС) ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (Сибирский филиал). На базе результатов, полученных в диссертации, разработаны рабочие проекты гидротермодинами­ческих труб большого сечения (01200 мм, напор ~ 100м, скорость в рабочем участке до 40 м/с), не имеющих аналогов в мировой практике подобных иссле­дований. Конструкции, защищенные авторскими свидетельствами внедрены в исследовательском комплексе Сибирского филиала ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (Красноярск) и НИИ прикладной гидромеханики (Москва), а также в исследо­вательскую практику и учебный процесс Красноярского государственного тех­нического университета, и могут быть использованы другими организациями, которые занимаются исследованиями кавитационной прочности деталей машин и систем приводов, а также эрозионной стойкости различных материалов.

Работа выполнена в рамках выполнения Всесоюзных и Всероссийских программ «Мировой Океан» (1981-86 гг.), «Энергетика океана» (1985 г.), «Си­бирь» (1985-87 гг.), Международного проекта TACIS по энергосбережению.

**Личный вклад автора.** Автору принадлежат постановка задач данного исследования, обоснования, формулировка и разработка всех положений, опре­деляющих научную новизну и практическую значимость, участие в экспери­ментальных исследованиях, анализ и обобщение результатов, формулировка выводов и рекомендаций. В совместных публикациях автору принадлежит ве­дущая роль в решении поставленных задач.

**На защиту выносятся** следующие положения диссертационной работы, включающие результаты научных исследований и основанные на них выводы и рекомендации:

новые схемы и конструкции кавитационных труб, защищенные автор­скими свидетельствами на изобретения и апробированные рекомендации по созданию крупномасштабных высокоскоростных установок в производстве;

методики расчета диаграмм рабочих режимов работы кавитационных труб различного типа, позволяющие снизить влияние масштабного эффекта и существенно расширить их эксплуатационные возможности;

новый способ создания пузырьковой структуры потока с равномерным распределением концентрации объемного газосодержания по поперечным се­чениям, позволяющий изучать высокоскоростные аэрированные течения.

экспериментальные данные исследования кавитационных труб различных типов с целью использования при проектировании и создании исследователь­ского и технологического оборудования для эрозионного испытания деталей машин и систем гидропривода, кавитационной обработки материалов;

экспериментальные данные о влиянии водоцементного отношения, вре­мени и интенсивности кавитационной обработки, состава и добавок цементных растворов на прочность и кавитационную стойкость бетонов, используемых в гидросооружениях.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использовани­ем методов исследования, соответствующих современному состоянию при­кладной гидродинамики, молекулярной физики и материаловедения. Работа ба­зируется на общепринятых положениях и методах расчета и проектирования гидродинамических труб, теории подобия. Результаты, полученные различны­ми методами, (например, теоретические и экспериментальные диаграммы ре­жимов работы кавитационных труб), достаточно хорошо совпадают и не проти­воречат физическим закономерностям в смежных областях знаний и данным, полученным другими авторами.

**Апробация работы.** Основные положения работы, результаты теорети­ческих и экспериментальных исследований, докладывались и обсуждались на II Всесоюзной школе-семинаре по гидродинамике больших скоростей (Чебок­сары, 1984), III Республиканской НТК « Проблемы гидромеханики в освоении Мирового океана» (Киев, 1984); V Национальном конгрессе по теоретической и прикладной механике (Болгария: Варна, 1985); XV сессии Болгарского инсти­тута гидродинамики судна (Болгария: Варна, 1986); III Всесоюзной школе- семинаре по гидродинамике больших скоростей (Красноярск, 1987); Всесоюз­ной НТК «Совершенствование средств и методов экспериментальной гидроме­ханики судна для развития научного прогресса в судостроении» (Николаев, 1988); III Всероссийской НПК с международным участием «Достижения науки и техники - развитию Сибирских регионов» (Красноярск, 2001).

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Создан и исследован ряд кавитационных установок, защищенных авторскими свидетельствами на изобретения, экспериментально определены их характеристики, позволившие учитывать масштабный эффект в ходе производственных испытаний материалов деталей машин систем приводов на кавитационную стойкость, а также при проектировании технологического оборудования:
	1. Исследованы характеристики кавитационных труб разомкнутого типа гравитационного напора с малыми числами кавитации и различными принципами регулирования скорости и давления. Результатом исследований было создание при плотине Красноярской ГЭС уникальной крупномасштабной высокоскоростной гравитационной гидродинамической трубы, техническое решение которой защищено авторским свидетельством на изобретение;
	2. Изучен новый класс гидродинамических труб с пузырьковой структурой потока, имеющего местные скорости звука меньше скорости потока. Исследованы режимы сверхзвукового обтекания препятствий пузырьковым потоком. Исследованы различные способы создания пузырьковой структуры потока в рабочем участке трубы. По результатам исследований предложен новый способ создания пузырьковых течений жидкости, защищенный авторским свидетельством на изобретение;
	3. Исследованы характеристики выбросных диффузоров

гидродинамических труб разомкнутого и замкнутого типа. По результатам исследований предложена новая методика расчета выбросных диффузоров и определена оптимальная зона переменной степени расширения пДИф = (1,0­1,5). Применение выбросного диффузора оригинальной конструкции и камеры гашения скорости переменного давления было достигнуто независимое регулирование параметров потока при малых числах кавитации, что приблизило эксплуатационные возможности трубы разомкнутого типа к возможностям широко распространенных труб замкнутого типа;

* 1. Разработана новая схема гидродинамической трубы, позволяющая достичь

независимое от скорости регулирование давления в потоке при низких числах

Эйлера (Ей < 0,1), существенно расширен диапазон эксплуатационных

режимов;

* 1. Разработаны технические и рабочие проекты гидродинамических труб с размерами сечения рабочих участков более 1x1 м при плотине Тереблинской ГАЭС и рабочим участком размером 2,5x2,5 м - при плотине Красноярской ГЭС.
1. На основании натурных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований разработаны методики построения диаграмм рабочих режимов кавитационных установок, позволяющие определить режимы течения жидкости с минимальными числами Эйлера и исследовать материалы деталей машин и систем приводов в условиях, максимально приближенных к натурным.
2. Разработаны методы проектирования кавитационных труб различных типов для исследования образцов различных конструкционных материалов (в том числе и бетонов) на кавитационную стойкость в натурных условиях.
3. Определено влияние водоцементного отношения, времени и интенсивности кавитационной обработки, состава и добавок цементных растворов на прочность и кавитационную стойкость бетонов, изготовленных из цементов различных марок (Ml00 - М600).

Технические решения, рабочие проекты, методы проектирования и результаты экспериментальных исследований внедрены в практику на ряде предприятий и НИИ.