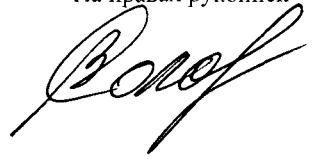


С 603

На правах рукописи



СОЛОВЬЕВ Владимир Игоревич

**Исследование механизмов упруго-пластического  
деформирования и разрушения барабанов  
высоконагруженных лебедок и разработка мер  
увеличения их долговечности**

(на примере траловых лебедок крупнотоннажных рыбопромысловых судов)

01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2011

И 230  
Работа выполнена на кафедре «Прикладная механика, динамика и прочность машин» ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Чернявский Александр Олегович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Березин Игорь Яковлевич

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Океанрыбфлот»,  
г. Петропавловск - Камчатский

Защита состоится 29 июня 2011 г. в 13:00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.298.02 при ГОУ ВПО «Южно - Уральский  
государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина,  
76, ауд. 1001

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Южно-  
Уральский государственный университет».

Автореферат разослан 16 мая 2011г.

0906669

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук А.О. Чернявский



472663

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** темы исследований обусловлена массовыми отказами в эксплуатации траловых лебедок больших и среднетоннажных (БАТМ и СРТМ) рыболовных траулеров, ведущих промысел морепродуктов крупногабаритными тралами. Постановка и подъем трала осуществляется с помощью лебедок, на барабаны которых укладывается до 2.5 км троса с натяжением 12...20 тс. Основным видом отказов является пластическое деформирование барабанов с удлинением в осевом направлении и развал боковых стенок, что приводит к их заклиниванию в опорах, и, как следствие, необходимости ухода судов с промысла на ремонт. Проблема недостаточной несущей способности барабанов в последнее время усугубилась вследствие изменения режимов работы траловых комплексов – увеличением скоростей и глубин траления.

Решение задачи о прочности лебедок предполагает исследование нагрузок, действующих на их элементы в эксплуатации, определение механизмов разрушения, разработку способов анализа этих механизмов. Большое число работ посвящено анализу динамических усилий, возникающих в системе «судно – ваер – трал». Значительный вклад в теоретические и экспериментальные исследования этой системы внесли отечественные и зарубежные ученые: Алексеев Н.И., Баранов Ф.И., Светлицкий В.А., Габрюк А.В., Степанов Г.Н., Фридман А.Л., Альтшуль Б.А., Гуревич М.И., Зинченко В.П., Недоступ А.А., Николаев В.В., Обвинцев А.Л., Расулев Ш.А., Торбан С.С., Котерама В., Парк Г., Юнг Л. и многие другие. Значительно меньше внимания уделено прочности этих элементов конструкций. Работы Трунина С.Ф., Ли Д. и ряда других авторов касаются прочности лебедок в «традиционной» постановке, связанной прежде всего с многоцикловой усталостью, и не рассматривают такой специфический механизм, как накопление пластических деформаций в барабане.

Появление мощных численных методов и реализующих их пакетов программ позволяет в настоящее время широко применять численное моделирование, используя ограниченное число натуральных или лабораторных опытов для определения параметров и проверки расчетных моделей. Следует отметить, что, несмотря на простоту конструкции барабана и схемы нагружения, типовой методики расчета его деформирования при многослойной (до 24 слоев) укладке растянутого троса (ваера) в аналитическом виде пока не существует. Поэтому эффективное использование современных численных методов требует разработки адекватных

математических моделей, позволяющих решить ряд контактных задач с учетом податливости контактирующих элементов и свойств материалов.

**Цель работы.** На основе выявления механизмов разрушения барабанов высоконагруженных лебедок разработать комплекс мер по увеличению их долговечности.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие задачи:

1. Разработать математическую модель ваера как элемента тралового комплекса, определяющего нагруженность несущих деталей траловых лебедок. Реализация модели должна обеспечивать возможность ее использования в режиме реального времени в условиях промысла.
2. Разработать измерительные устройства для регистрации нагрузок на барабаны траловых лебедок в эксплуатации.
3. Исследовать влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на нагруженность барабанов при различных режимах траления.
4. Разработать расчетную модель для исследования напряженно-деформированного состояния барабанов, позволяющую выявить механизм их разрушения.
5. Исследовать процесс накопления пластических деформаций барабанов в эксплуатации, оценить значимость отдельных внутренних силовых факторов и разработать рекомендации по повышению их несущей способности.

**Объект исследования.** Барабан траловой лебедки для многослойной укладки стального троса длиной до 2,5 километров. Барабан состоит из центрального толстостенного цилиндра (веретена) диаметром 0,5 м, толщиной стенки 0,1 м, длиной 2,2 м, и двух боковых стенок (реборд), выполненных в виде круглых пластин с наружным диаметром 1,5 м., толщиной 0,02...0,03 м. Материал всех элементов барабана – конструкционные малоуглеродистые стали группы К22, имеющими предел текучести не менее 216 МПа.

**Методы исследования.** Для проведения расчетных исследований нагрузок в ваерах, передаваемых на барабаны лебедок во время траления, использована расчетная модель ваера в виде абсолютно гибкой звенчатой цепи и соответствующая программа расчета, разработанная автором. При расчетах барабана использованы аналитические решения, известные пакеты прикладных программ LS-DYNA и ANSYS, реализующие метод конечных элементов при анализе неупругого контактного деформирования и разрушения, а также методы теории приспособляемости.

### **Достоверность** результатов и выводов обеспечена:

- сравнением рассчитанных по модели ваера параметров (усилие, длина, угол схода) с экспериментальными данными, полученными во время научно-промысловых рейсов сотрудниками ПКВИМУ, управления промыслового флота КМПО и Базой океанического рыболовства Камчатского края;
- сравнением рассчитанных изменений размеров барабанов с результатами их обмеров, произведенных на Петропавловской судоремонтной верфи (СРВ) и Петропавловском судоремонтном заводе (ПСРМЗ).

### **Научная новизна работы.**

1. Разработана математическая модель троса, схематизирующая его упругую линию в виде звенчатой цепи, отличающаяся от существующих моделей учетом смешанных (геометрических и силовых) граничных условий при произвольной длине гибкой нити, которая позволяет решать геометрически нелинейную задачу без использования метода последовательных приближений.

2. Выявлен новый механизм накопления односторонних пластических деформаций в конструкциях, не требующий – в отличие от рассматривавшихся ранее – для своей реализации неизохронности изменения напряжений по объему конструкции: накопление вследствие циклических изменений конструкции. Показано, что этот механизм реализуется в барабанах при многослойной укладке растянутого троса, причем накопление деформаций в одном цикле ограничено характером нагружения, связанном с наличием начальных напряжений (натяжением троса), а полная накопленная деформация может быть неограниченной.

3. Разработана конструкция тензометрической оси кормового блока и схема подключения тензорезисторов в полную мостовую схему, позволяющая осуществлять непрерывную регистрацию тягового усилия в ваере и угол его схода с палубы судна

### **Практическая ценность и реализация результатов работы.**

1. Разработано автоматизированное рабочее место (АРМ) трал-мастера, позволяющее расчетным путем оценить возможность добычи морепродуктов конкретным судном с определенным тралом на заданном режиме, что позволяет произвести настройку траловой системы перед началом работы.

2. Использование АРМ трал-мастера во время промысла позволяет оперативно получить рекомендации по эффективному снижению нагрузок на промысловые механизмы.

3. Разработано устройство для измерения усилий в ваерах, позволяющее в условиях реальной эксплуатации получить оперативную информацию

о работе трала и предотвратить появление перегрузок траловых лебедок, которые могут привести к выходу их из строя.

4. Разработаны рекомендации по усилению барабанов и выбору марок сталей при постройке или модернизации траловых лебедок.

Результаты работы в виде пакета программ «АРМ тралмастера» переданы в отделы промысловства ЗАО «Океанрыбфлот» и колхоза им. В.И. Ленина; используются в учебном процессе по специальности «Промышленное рыболовство» в КГАОУ СПО «Камчатский политехнический техникум», о чем имеются соответствующие документы.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались автором на следующих семинарах и научно-практических конференциях: на научных конференциях КамчатГТУ (г. Петропавловск-Камчатский, 2008 – 2011; на 56-ой и 58-ой международных молодежных научно-технических конференциях «Молодежь – наука – инновации» (МГУ им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток, 2008, 2010 г.); на Региональном молодежном инновационном Конвенте -2010 (г. Петропавловск-Камчатский, 2010); на Региональной научно-практической конференции молодых ученых (КамГУ, Петропавловск-Камчатский, январь, 2011); на Региональном этапе конкурса НТТМ (КамГУ, Петропавловск-Камчатский, март, 2011); на региональных научно-практических конференциях (КПТ, Петропавловск-Камчатский, 2009 – 2010 г.); на научном семинаре кафедры промышленного рыболовства Дальрыбтуза (Владивосток, 2010.).

**Публикации.** По теме работы опубликовано 14 работ, в том числе 3 – в журналах, входящих в список рекомендованных ВАК.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Расчетная модель схематизации упругой линии троса в виде звенчатой цепи; методика расчета тяговых нагрузок в ваерах с использованием этой модели и АРМ тралмастера.

2. Конструкции динамометров для регистрации и контроля нагрузок в ваерах в условиях реальной эксплуатации.

3. Конечно-элементные модели барабанов грузовых лебедок и методики расчетных исследований процессов их упруго-пластического деформирования при многослойной укладке натянутых тросов, укладке завершающего витка слоя и контактного давления троса на барабан.

4. Обнаруженный механизм накопления односторонних деформаций в конструкциях с циклически меняющейся структурой.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Основной текст диссертации изложен на 146 страницах, содержит 66 рисунков и 7 таблиц. Библиографический список включает 130 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано общее описание проблемы обеспечения прочности в эксплуатации высоконагруженных тяговых лебедок, к числу которых относятся траловые лебедки, приведены характерные виды отказов их узлов, раскрыта актуальность темы и показана значимость решения поставленной проблемы для промыслового флота Дальневосточного региона страны.

**В первой главе** изложен анализ литературных источников по следующим направлениям:

### *1. Расчетные модели ваера для режима траления.*

В большинстве аналитических методов расчета тяговых тросов, находящихся в силовом поле (как сил тяжести, так и аэро- и гидродинамических сил), используется модель троса в виде гибкой весомой нити с пренебрежимо малой изгибной жесткостью, приводящаяся к нелинейному дифференциальному уравнению, решаемому при заданных силовых или геометрических граничных условиях. Для ряда конструкций, например, при расчете линий электропередач, эта методика дает удовлетворительный результат, но неприемлема для расчета ваеров, которые имеют лишь одну точку закрепления на корме судна и в сочетании с тралом образуют кинематически изменяемую гибкую систему, координаты концевых точек которой не могут быть заданы, а подлежат определению.

Известен метод схематизации упругой линии троса в виде цепной линии, состоящей из конечного числа шарнирно соединенных стержней, в серединах которых приложены все действующие на участок ваера нагрузки. Однако этот вариант моделирования противоречит допущению о пренебрежимо малой изгибной жесткости троса и не обеспечивает точного соблюдения условий равновесия отдельного элемента модели.

### *2. Экспериментальные методы измерения тяговых усилий в буксирных тросах.*

Динамометры для измерения усилий в тяговых тросах фиксированной длины изготавливаются серийно, но с учетом морских условий требуется их существенная доработка. В практике промышленного рыболовства наиболее часто используются навесные динамометры (монтируемые на тросе и не участвующие в передаче основного тягового усилия), прототип которых был разработан в Николаевском кораблестроительном институте. Известны его конструктивные варианты ПКВИМУ (Петропавловск-Камчатский), фирм VAKI Ltd (Исландия) и компании North-West (США), причем последние два варианта изготавливаются серийно. Однако их конструктивные недостатки не позволяют использовать эти динамометры

для непрерывного – в ходе эксплуатации, а не только в исследовательских рейсах – измерения усилия натяжения жестких металлических тросов.

### 3. Расчетные методы оценки несущей способности ваерных барабанов траловых лебедок.

Основное внимание специалистов в области промышленного рыболовства уделяется разработке методов расчета и проектирования крупногабаритных тралов под заданный тип промыслового судна. При этом выполняются типовые расчеты кинематических и силовых параметров приводов промысловых механизмов и прочностные расчеты несущих элементов по простейшим формулам сопротивления материалов.

Известны работы, в которых рассматривалась задача многослойной укладки растянутого троса на барабан, но при попытке получения аналитического решения авторы вынужденно вводили ряд упрощений, значительно снижающих практическую ценность результатов. Полный учет геометрии конструкции (реборды, изменение толщины веретена в местах установки подшипников) и особенностей нагружения (кинематический характер нагружения, при котором деформирование барабана с уменьшением его диаметра приводит к ослаблению давления на него со стороны бухты троса; неравномерность натяжения троса в бухте; неосесимметричная задача определения давления на реборду со стороны витка, завершающего слой) возможен, по-видимому, только в рамках численных конечноэлементных решений.

На основании выполненного литературного обзора сформулированы приведенные выше цель и задачи диссертации.

Во второй главе изложено обоснование расчетной модели ваера в виде весомой упругой нити и результаты исследований влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на нагрузки в ваерах.

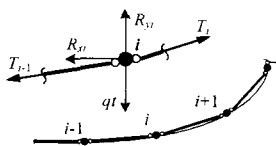


Рис. 1. Хордовая модель ваера

Предложена хордовая модель, основанная на схематизации упругой линии растянутого стального троса звенчатой цепью, состоящей из конечного набора материальных точек (рис. 1.), удаленных друг от друга на равные расстояния и невесомых жестких стержней. Материальные точки сочленяются со стержнями в единую цепь через идеальные механические шарниры, за счет чего стержни могут передавать только осевые растягивающие усилия. В каждой из узловых материальных точек считаются приложенными в виде сходящейся системы сосредоточенных сил все нагрузки, действующие на участок ваера в эксплуатации, включая вес участка ваера  $qt$ , силы гидродинамического



сопротивления его перемещения в воде  $R_{св}$ , инерционные нагрузки, которые могут возникнуть при качке судна на волнении  $P_{и}$ . Для удобства записи уравнений равновесия проекции эти параметры на рис. 1 объединены в проекции суммарного вектора  $R_{xi}$  и  $R_{yi}$  соответственно. С геометрической точки зрения в модели реализуется схематизация упругой линии ваера хордами, соединяющими узловые точки, расположенные на этой кривой с заданным шагом  $l$ . Предлагаемый вариант схематизации гибкой нити, находящейся в силовом поле, позволяет получить сходящуюся систему сил, действующих на любой ее участок.

Трал схематизируется материальной точкой, в которой приложены ее суммарное агрегатное сопротивление буксировке  $R$  и суммарный вес  $Q$  траловых досок и заглубителя, которые задаются по паспортным данным. Кроме этого, задается глубина и скорость траления.

Расчет начинается с анализа равновесного состояния нижней точки, в которой приложена самоуравновешенная сходящаяся система трех векторов сил, два из которых –  $R$  и  $Q$  – известны, а третий – тяговое усилие в первом звене  $T$  – рассчитывается из условий равновесия. Аналогично рассматриваются равновесные состояния всех последующих точек (рис. 1) и одновременно вычисляются их вертикальные и горизонтальные координаты. Заканчивается расчет при совпадении вертикальных координат очередного узла и кормового ваерного блока. Иными словами, расчетом определяется, в каком месте должно находиться судно, чтобы обеспечить стабильную работу трала на заданной глубине с заданной скоростью его буксировки. В результате за один цикл расчета определяются все силовые и геометрические параметры тралового комплекса, необходимые для оценки нагруженности палубных механизмов. Кроме этого определяется длина ваера, необходимая для постановки трала на заданную глубину и заданной скорости траления, а также выдается информация о фактическом удалении трала от кормы, что позволяет принимать оперативные решения при маневрировании судна. К числу достоинств предлагаемой методики можно отнести простоту организации циклов расчета с варьируемыми параметрами тралового комплекса, что позволяет исследовать влияние различных факторов на нагруженность палубных механизмов.

Возможность использования хордовой модели ваера для расчетной оценки нагруженности палубных механизмов подтверждена сопоставлением результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными другими авторами. В качестве критериев соответствия полученных результатов (рис. 2) использовались: экспериментальные данные отдела добычи Базы океанического рыболовства Камчатрыбпрома, полученные во время научно-промысловых рейсов рыболовных судов типа БМРТ, пр. 1288 и

БАТМ пр. 1376. и данные публикаций Трунина С.Ф., Фердмана Г.С., Степанова Г.Н.

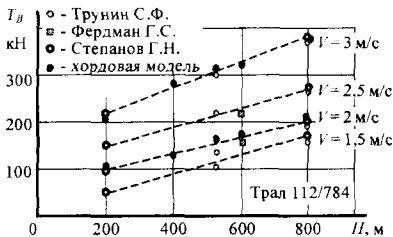


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости усилий в ваерах от скорости и глубины буксировки трала.

Программа оформлена в виде автоматизированного рабочего места (АРМ) тралмастера и используется специалистами рыбопромысловых организаций Камчатки при настройке и подготовки тралового комплекса перед началом промысла.

Выполнены исследования для оценки влияния конструктивных (агрегатного сопротивления трала, веса заглубителя, диаметра троса) и эксплуатационных факторов (глубина, скорость траления) на нагруженность промысловых механизмов. В качестве иллюстрации возможностей программы на рис. 3. приведены зависимости усилий в ваере и его длины для различных режимов траления.

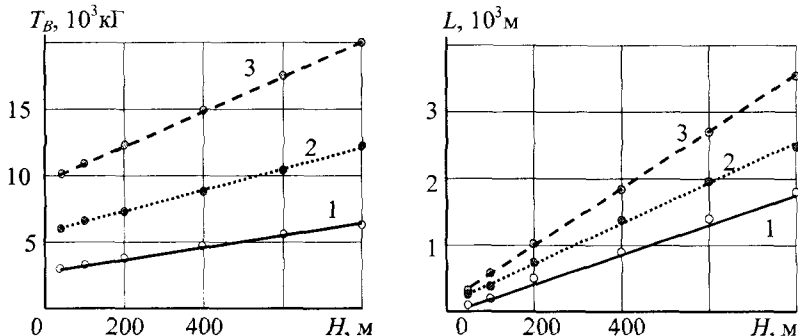


Рис. 3. Зависимости усилий  $T_b$  и длины  $L$  ваера от глубины  $H$  и скорости траления (СТ «Осторожный», трал 62/328, 1 – скорость траления 3 узла, 2 – 4 узла, 3 – 5 узлов).

В третьей главе дано описание конструкций тензометрических динамометров, предназначенных для измерения нагрузок на палубные механизмы при выполнении различных технологических операций во время промысла. Основное внимание уделено разработке устройства для измерения усилий в ваерах при работе судна с тралом. Предложена конструкция навесного многодиапазонного динамометра с регулируемой величиной перемещения обводного ролика и сменными упругими элементами в виде двухопорных тензометрических балок. Плавная регулировка искривления участка растянутого ваера позволяет обеспечить

прочность и высокую чувствительность динамометра при измерении нагрузок в стальных и синтетических тросах любого диаметра. Рекомендуемая область применения – исследования во время научно-промысловых рейсов и использование на судах, не оборудованных штатными измерительными устройствами.

В качестве штатного измерительного устройства для непрерывной регистрации нагрузки в ваере предложена тензометрическая ось кормового ваерного блока (2, рис.4). Разработана схема размещения и соединения датчиков, наклеиваемых на ось, позволяющая при свободном вращении блока на оси и независимом (серьга) подвесе оси блока к порталу на палубе определять величину тягового усилия в ваере и угол его схода по отношению к палубе судна. Для этого используется две полные мостовые схемы с четырьмя активными датчиками.

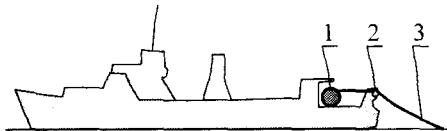


Рис. 4. Лебедка (1), кормовой блок (2) и ваер (3).

В четвертой главе рассмотрены вопросы выявления механизмов деформирования барабана, разработки соответствующих математических (в том числе – конечно-элементных) моделей и проведения расчетов, обеспечивающих описание экспериментально наблюдаемым видам отказов в эксплуатации.

Расчеты веретена барабана, выполненные по формулам сопротивления материалов, показали, что для барабана 12.5-тонной лебедки при максимальном усилии на тросе напряжения изгиба не превышают 18 МПа, а напряжения от его кручения не превышают 5 МПа. Таким образом, изгиб и кручение веретена, без учета дополнительных воздействий, не могут являться основной причиной пластического деформирования барабана.

Исследован уровень контактных напряжений, возникающих в веретене при укладке на него растянутого троса. Перемещающаяся зона контактных напряжений может вызывать пластическое деформирование веретена по механизму раскатки, если величина напряжений будет достаточно большой. Для определения величины напряжений выполнен конечно-элементный расчет системы «веретено – навитые слои троса – навиваемый в данный момент виток» с использованием специализированного пакета ANSYS. Расчетная схема и результат расчета показаны на рис. 5. При расчете барабан схематизировался линейно-упругим изотропным телом, а многопрядный стальной трос – линейно-упругим анизотропным, при этом учитывалось наличие ранее уложенных его слоев.

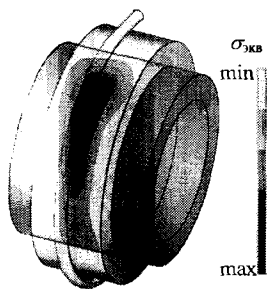


Рис. 5 Напряжения в системе «веретено – навитые слои троса – навиваемый в данный момент виток»

Высокая податливость троса (особенно в поперечном направлении) приводит к тому, что контактные напряжения составляют всего единицы мегапаскалей. Небольшими по величине оказываются и напряжения, связанные с практически осесимметричным краевым эффектом, перемещающимся вдоль оси барабана вместе с границей части, заполненной тросом в очередном (навиваемом в данный момент) слое.

Основным источником напряжений, приводящим к пластическому деформированию барабана, является

давление навитого троса. Навивка производится с усилием (трос натянут), и получаемая задача с начальными напряжениями формулируется аналогично задаче с неравномерным нагревом, в которой предварительное натяжение троса может быть смоделировано «тепловой» усадкой. Измерения показывают, что тяговое усилие по мере выбирания троса уменьшается в 2...3 раза вследствие снижения веса выбираемого троса и его гидродинамического сопротивления. С учетом этого задача о давлении троса на барабан лебедки может быть сформулирована как задача о посадке с натягом одного цилиндра (бухты троса) на другой (веретено барабана), причем наружный цилиндр изготовлен из анизотропного материала и

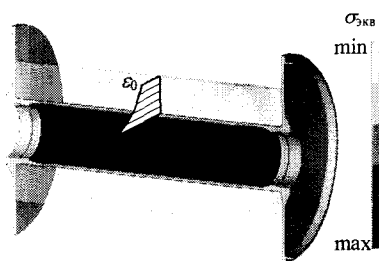


Рис. 6. МКЭ-расчет напряжений в системе «трос – барабан»

подвергается неравномерному (по радиусу) «охлаждению». В предположении линейной упругости материалов обоих цилиндров такая задача вдали от торцов может быть решена аналитически. Для реальной геометрии (наличие реборд, колец подшипников) задача решалась численно (пакет ANSYS), пример решения показан на рис. 6.

Вычисленные напряжения существенно превосходят предел текучести и вызывают появление пластических деформаций. Кинематический характер нагружения приводит к тому, что возникающая в одном цикле деформация ограничена и невелика – она определяется состоянием, когда напряжения, соответствующие возникшей деформации, уравнивают нагрузку со стороны троса, уменьшающуюся с деформацией веретена. Последующая разгрузка

(разматывание троса при постановке трала) приводит к снятию напряжений, причем уровень остаточных напряжений очень невелик (в тонкостенном барабане они бы полностью отсутствовали). В отсутствии остаточных напряжений следующий цикл повторяет предыдущий: отличия связаны только с деформационным упрочнением материала. Таким образом, повторяющиеся нагружения кинематического характера приводят к накоплению деформаций (перемещений), что иллюстрируется зависимостью, показанной на рис. 7. Это происходит за счет того, что каждое нагружение начинается от своего начального состояния, характеризующегося накопленной в предыдущих циклах деформацией и нулевыми остаточными напряжениями.

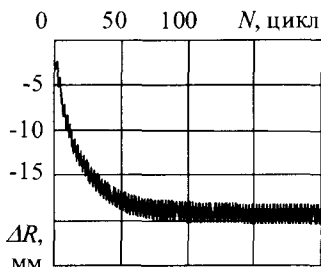


Рис. 7. Накопление деформаций в барабане с числом циклов навивки троса

Медленная стабилизация решения, показанная на рис. 7, приводит к вычислительным проблемам при расчете кинетики деформирования. С другой стороны, можно получить оценку максимальной накопленной деформации, если принять, что по толщине стенки веретена напряжения распределяются равномерно, т.е. пренебречь составляющей стабилизации, связанной с выработкой системы остаточных напряжений и учитывать только стабилизацию за счет деформационного упрочнения материала. В этом случае максимальная накопленная деформация может быть оценена с использованием только уравнений равновесия и диаграммы деформирования материала барабана. При этом поцикловый расчет не делается, результат получается путем решения лишь одного нелинейного уравнения, но число циклов до стабилизации (достижения накопленной деформацией вычисленного значения) неизвестно. При очевидном недостатке такого расчета – неизвестной скорости накопления – такое решение позволяет исследовать зависимость результатов от конструктивных параметров – диаметра и толщины стенки барабана, его материала, жесткости троса (ваера) и усилия намотки. На рис. 8 приведены примеры результатов: зависимость полной накопленной деформации  $|\Delta R|_{\max}$  от жесткости троса  $E_1$  при различных диаграммах деформирования  $\sigma$ - $\epsilon$  материала барабана (сплошная линия соответствует используемому в настоящее время материалу). На этом же рисунке для сравнения приведено накопление деформации в первом цикле –  $\Delta R_1$ . Показано, что увеличение механических характеристик материала барабана снижает величину  $|\Delta R|_{\max}$  гораздо заметнее, чем  $\Delta R_1$ . Кроме того, величины

$\Delta R_{\max}$  и  $\Delta R_1$  по-разному зависят от жесткости троса  $E_1$ , что должно учитываться при выработке рекомендаций. Во-первых, эффективность замены материала трудно определить по первым циклам; а во-вторых, более жесткие тросы выгоднее с точки зрения уменьшения накопления при ограниченном (небольшом) числе циклов, но при длительной эксплуатации приведут к большим накопленным перемещениям.

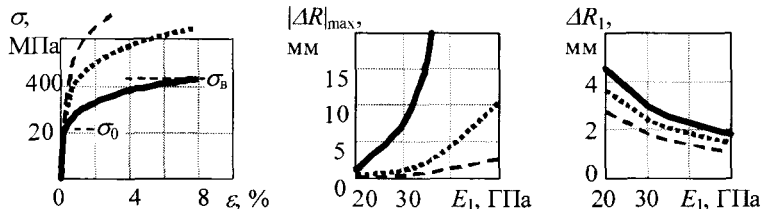


Рис. 8. Диаграммы деформирования материала барабана (а) и зависимости накопленной деформации от этих диаграмм и податливости троса (б,в)

Обмеры барабанов траловых лебедок WTJ-12,5, принятых на ремонт ОАО «Петропавловская судостроительная верфь» в период с февраля по июнь 2010 года, показали удовлетворительное совпадение с расчетом в средней части барабана (рис. 9). В то же время эти обмеры обнаружили зону повышенной усадки на расстоянии около 0.4 м от реборды, не объясняемой полностью

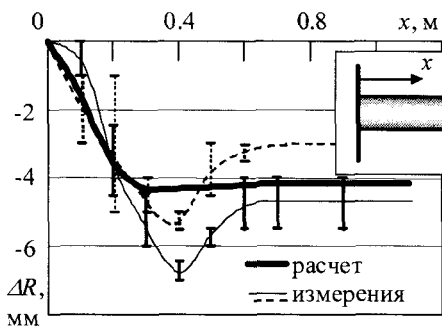


Рис. 9. Зависимость уменьшения радиуса барабана от расстояния до реборды (расчет, эксперимент).

краевым эффектом при осесимметричной постановке задачи (рис. 6). Вклад этой зоны в общее удлинение барабана – в предположении несжимаемости материала при пластическом течении – составляет до 50%.

Наблюдаемый эффект может быть объяснен дополнительным изгибом краевой части барабана вследствие несимметричного нагружения реборды усилием со стороны витка троса, завершающего слой. Предыдущий виток образует с ребордой клиновидный зазор, попадание завершающего витка в этот зазор приводит к появлению распорного усилия, дополнительных напряжений и пластических деформаций.

Расчет этого процесса, выполненный как с использованием простейших схем (абсолютно жесткий трос кругового сечения – рис. 10а), так и с учетом податливости и

анизотропии троса, а также усилий со стороны ваероукладчика (устройства, предназначенного для обеспечения равномерной укладки троса на барабан) – рис. 10б – показали, что возникающие напряжения достаточно велики, чтобы объяснить наблюдаемый эффект.

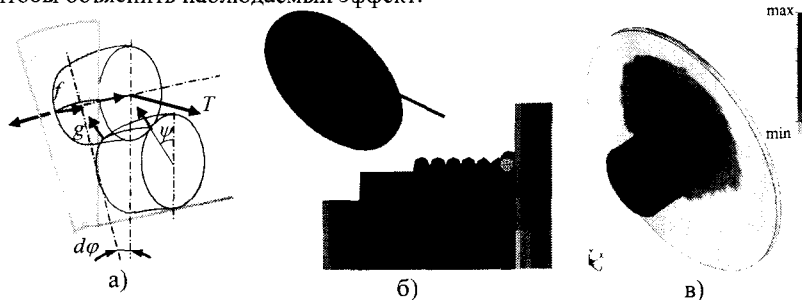


Рис. 10. Действие витка троса, завершающего слой. а) простейшая оценка, б) схема расчета МКЭ; в) распределение эквивалентных напряжений

**Основные результаты** приведенных в работе теоретических и экспериментальных исследований состоят в следующем:

1. Причиной массовых эксплуатационных отказов барабанов траловых лебедок рыбопромысловых судов являются осевые пластические деформации веретен барабанов, и погибы их боковых стенок (реборд).
2. Определение нагрузок, действующих на траловые лебедки в процессе эксплуатации, возможно с использованием хордовой модели ваера, схематизирующей его упругую линию в виде конечного набора материальных точек, шарнирно соединенных в цепь жесткими невесомыми стержнями. Отличительной особенностью модели является то, что геометрически нелинейная задача о тросе в силовом поле со смешанными (силовыми и кинематическими) граничными условиями решается без использования последовательных приближений. Разработанная на основе модели программа расчета оформлена в виде автоматизированного рабочего места (АРМ) тралмастера, позволяющего более качественно подготовить траловую систему перед началом работы и принимать оперативные решения при изменении параметров траления.
3. Разработанные конструкции динамометров обеспечивают измерение усилий на тросах в условиях как исследовательского рейса, так и реального промысла, не требуют монтажа при каждой постановке трала и не создают помех команде.

4. Исследование напряженно-деформированного состояния веретена барабана показало, что основным фактором, приводящим к его пластическому деформированию, является суммарное давление большого числа слоев навитого троса. Напряжения, связанные с изгибом и кручением барабана как стержня, и перемещающимся по барабану пятном контакта с наматываемым тросом, невелики и не оказывают влияния на пластическое деформирование.
5. Рассчитанные зависимости напряжений в барабане от числа слоев навитого троса позволяют, с учетом данных о тяговой нагрузке в тросе, прогнозировать уровень напряжений в барабане при полной или частичной укладке троса и оценивать опасность появления пластических деформаций барабана по окончании работы.
6. Накопление перемещений в барабане в процессе эксплуатации обусловлено новым, не рассматривавшимся ранее, механизмом, связанным с периодическими изменениями структуры конструкции. При этом в каждом отдельном цикле нагружение близко к кинематическому; накопленная за один цикл деформация невелика. Однако изменение структуры (в данном случае – размотка и намотка троса) приводит к снятию остаточных напряжений в конце каждого цикла, что может приводить к непрекращающемуся накоплению деформаций.
7. Созданные методы расчета – как с использованием метода конечных элементов, так и прямые оценки – позволяют вычислять деформацию, накопленную за один цикл, за определенное число циклов и за неограниченное число циклов. Рассчитанные деформации удовлетворительно согласуются с измеренными.
8. Созданные методы расчета позволяют анализировать влияние различных факторов (размеров, свойств материала, величин нагрузок) на величину накапливаемой деформации и на этой основе выбирать решения, обеспечивающие требуемый ресурс барабанов. Показано, что увеличение толщины стенки и поверхностное упрочнение неэффективно; наибольший эффект дает применение материалов с более высокими пределами текучести. Так, при замене используемых сейчас сталей категории КП22, имеющих предел текучести 220 МПа, на стали категории КП35 с пределом текучести 350 МПа величина максимальных остаточных удлинений веретена может быть уменьшена до 7 раз.
9. Оценка экономической эффективности принятых решений затруднена режимом коммерческой тайны предприятий. В среднем, по оценкам экспертов, исключение одного дня непланового ремонта на одном судне может дать экономию до 400...800 тыс. рублей.



### Публикации по теме диссертации

*Статьи, опубликованные в журналах из списка ВАК:*

1. Портнягин, Н. Н. Тензометрические динамометры для измерения эксплуатационных нагрузок в тросах /Текст/ Н. Н. Портнягин, В. В. Скрягин, **В. И. Соловьев** // Естественные и технические науки. – 2009. - № 2. – С. 288 - 291.
2. Портнягин, Н. Н. Динамометры для измерения нагрузок в ваерах при работе судна с тралом /Текст/ Н.Н. Портнягин, В.В. Скрягин, **В.И. Соловьев** // Естественные и технические науки.– 2009. - № 3. – С. 301-305.
3. **Соловьев, В. И.** Расчетно-экспериментальный анализ деформирования барабанов траловых лебедок /Текст/ В. И.Соловьев, А. О. Чернявский //Естественные и технические науки.–2010.- № 6.–С.42 – 48.

*Другие публикации:*

4. **Соловьев, В.И.** Тензометрические устройства для измерения нагрузок в ваерах /Текст/ сб. докл. на 56 межрегиональной научно – технической конференции: - МГУ им. адм. Г. И. Невельского, – Владивосток, 2008. – С. 84 - 88.
5. **Соловьев В.И.** Тензометрическая ось кормового блока для измерения тяговых усилий в ваерах /Текст/ В.И. Соловьев, Н.Н. Портнягин, В.В. Скрягин // Научно-технические исследования в рыбохозяйственной отрасли Камчатского края: сб. докл. на научно-технической конференции КамчатГТУ, – Петропавловск-Камчатский, - 2008. – С. 91 – 94.
6. Портнягин, Н.Н. Устройство для измерения длины ваера /Текст/ Н. Н. Портнягин, В. В. Скрягин, **В. И. Соловьев** // Научно-технические исследования в рыбохозяйственной отрасли Камчатского края: сб. докл. на научно-технической конференции КамчатГТУ, – Петропавловск-Камчатский, - 2008. – С. 94 – 95.
7. **Соловьев, В.И.** Влияние продольных срезов на прочность осей /Текст/ В.И.Соловьев, В.В. Скрягин // Научно-технические исследования в рыбохозяйственной отрасли Камчатского края: сб. докл. на научно-технической конференции КамчатГТУ, – Петропавловск – Камчатский, - 2009. – С. 107 -108.
8. **Соловьев, В.И.** Выбор и обоснование расчетной модели ваера /Текст/ В.И.Соловьев // Научно-технические исследования в рыбохозяйственной отрасли Камчатского края: сб. докл. на научно-технической конференции КамчатГТУ. – Петропавловск-Камчатский, - 2009. – С.108–111.
9. **Соловьев, В.И.** Инженерная модель ваера для расчетной оценки нагруженности деталей палубных механизмов /Текст/ В.И.Соловьев, // Вестник Камчатского политехнического техникума; сб. науч. ст. – Петропавловск-Камчатский, 2010.– № 3. – С.106 -114

10. **Соловьев, В.И.** Моделирование процесса многослойной навивки ваера на барабан траловой лебедки /Текст/ В.И.Соловьев, А.О. Чернявский, В.Д. Балабанов // Вестник Камчатского политехнического техникума; сб. науч. ст. – Петропавловск-Камчатский, 2010. - № 3. – С.115 -128.
11. **Соловьев, В.И.** Модель ваера на режиме траления для расчета нагрузок на промысловые механизмы /Текст / В.И.Соловьев //сб. докл. на 58 международной научно-теоретической конференции МГУ им. адм. Г. И. Невельского,, – Владивосток, 2010.–С. 75 – 79.
12. **Соловьев, В.И.** Оценка уровня гидродинамических нагрузок на ваера на режиме траления /Текст / В.И.Соловьев, С.Е Напазаков. //сб. докл. на 58 международной научно-теоретической конференции МГУ им. адм. Г. И. Невельского, – Владивосток, 2010. – С. 80 - 81.
13. **Соловьев, В.И.** Моделирование напряженно-деформированного состояния барабана траловой лебедки методом конечных элементов /Текст/ В.И.Соловьев //сб. докл. на 58 международной научно-теоретической конференции МГУ им. адм. Г. И. Невельского; сб. науч. ст. – Владивосток, 2010. – С. 82 - 86.
14. **Соловьев В.И.** Исследование процесса упруго – пластического деформирования барабана траловой лебедки при многослойной укладке растянутого ваера. /Текст/ В.И.Соловьев, В.В. Скрыгин, А.О. Чернявский. //Наука, образование, инновации: пути развития: сб. докл. научно-технической конференции КамчатГТУ. – Петропавловск-Камчатский, - 2011. – С.81–85.