

629.12.011.1
Б42

НИКОЛАЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
КОРАВЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
имени адмирала С.О.Макарова

На правах рукописи

БЕЛОУСОВ Валерий Николаевич

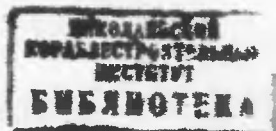
УДК 629.12.011.1(043)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИ
ЧИСТЫХ НЕФТЕНАЛИВНЫХ СУДОВ

Специальность 05.08.03 - "Проектирование
и конструкция судов"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

26.08.87
n 225



НИКОЛАЕВ 1987

Работа выполнена на кафедре конструкции корпуса корабля Николаевского ордена Трудового Красного Знамени кораблестроительного института имени адмирала С.О.Макарова.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор КОЗЛЯКОВ В.В.

Официальные оппоненты - доктор технических наук
профессор ВАСИЛЬЕВ А.Л.

кандидат технических наук,
доцент КАЧАНОВ Ю.П.

Ведущее предприятие - ЦКБ "Изумруд".

Защита диссертации состоится "28" *сентября* 1987 года в 15.00 часов в ауд. 356 на заседании специализированного совета Д.053.04.01 при Николаевском ордена Трудового Красного Знамени кораблестроительном институте имени адмирала С.О.Макарова по адресу:

327001, г.Николаев, проспект Героев Сталинграда, 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "25" *августа* 1987 года.


УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА Д.053.04.01
ГОРБОВ В.М.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Значительная доля как в отечественных, так и в мировых грузоперевозках морским транспортом, связанных с отдаленным расположением месторождений, предприятий переработки от их потребителей, приходится на нефть и ее продукты.

Стремление удовлетворения требований Конвенции о предотвращении загрязнения с судов 1973/78 гг. и уменьшения эксплуатационных затрат привело к бурному росту разнообразия конструктивного оформления грузовой части нефтеналивных судов, выходящего за требования классификационных обществ. В перспективном плане развития судостроения до 1995 года предусматривается проектирование и постройка нефтеналивных судов с двойным дном, а также с двойным дном и с двойными бортами, относящиеся к экологически чистым танкерам.

Развитие новых типов нефтеналивных судов приводит к изменению степени продольной и местной загруженности их корпусов, связанных с принципиально новым распределением балласта, увеличением плотности перевозимого груза (до $1,5 \text{ т/м}^3$), появлением более податливых опорных контуров перекрытий, какими являются продольные гофрированные переборки с горизонтальными гофрами.

Современные экологически чистые танкеры являются одними из металлоемких транспортных судов. В директивных документах, таких как "Основные направления экономического и социального развития СССР на 1980-1985 гг. и на период до 1990 года", решения ноябрьского 1982 г. Пленума ЦК КПСС, большое внимание уделено проблеме снижения металлоемкости конструкций и трудозатрат на их изготовление.

В создающихся новых Правилах Регистра СССР не учтены особенности экологически чистых нефтеналивных судов.

Поэтому разработка расчетных методов проектирования корпусных конструкций экологически чистых нефтеналивных судов является вполне актуальной и практически важной.

Цель работы. Основной целью является разработка методики

проектирования корпусных конструкций экологически чистых нефтеналивных судов с двумя и одной, диаметральной, продольными переборками, которая содержит:

- Систематизацию местных нагрузок, действующих на конструкции грузовой части корпуса, исследование продольной прочности и обоснование конструктивных мероприятий, обеспечивающих уменьшение перегибающих моментов на тихой воде.

- Обоснование требований к стандарту общей прочности и рационализацию процесса проектирования продольных связей эквивалентного бруса.

- Разработку практической методики анализа и проектирования рамных связей грузовой части в соответствии с критерием предельной пластической прочности. Обоснование экономически оправданных запасов надежности.

- Разработку практического метода расчета конструкций танковой части в упругой стадии на основе метода условных измерителей и критерия усталостной прочности.

- Обобщение методов предварительной оценки массы металлического корпуса и обоснование методики прогнозирования массы грузовой части, опирающейся на расчетные методы с использованием строительных коэффициентов рамных связей.

Методы исследования:

- Анализ особенностей конструкций и их загруженности выполнен на основе статистического метода оценки и прогнозирования нагрузок с использованием фактических проектных, эксплуатационных материалов и Правил различных классификационных обществ.

- При разработке методики расчета и проектирования рамных связей грузовой части по предельным нагрузкам использована теория предельного равновесия конструкций.

- Приближенные аналитические методы расчета и проектирования объемных конструкций в упругой стадии основаны на базе аппарата строительной механики корабля с использованием для контроля достоверности результатов метода конечных элементов, реализованного на ЕС ЭВМ.

- Обоснование расчетных схем поперечных шпангоутных рам, учитывающих объемность и взаимовлияние конструкций грузовых танков, основывалось на сравнительных расчетах по пространственным расчетным схемам, на сопоставлении расчетных усилий и перемещений с экспериментально замеренными.

- Оценка уменьшения сдвиговой жесткости гофрированной переборки с горизонтальными гофрами получена в результате испытаний модели гофрированной переборки, а также во время натурных испытаний на стапеле корпуса т/х типа "Дмитрий Медведев" и расчетами по МКЭ. Подобные исследования представляют собой эффективный расчетно-экспериментальный метод.

- Анализ металлоемкости современных экологически чистых танкеров выполнен с использованием фактических проектных материалов. Достоверность методики прогнозирования массы танковой части, основанной на расчетных методах с привлечением строительных коэффициентов, установлена сравнением с фактическими массами грузовых модулей реальных проектов.

К новым научным результатам работы следует отнести:

- Обоснование методики проектирования рамных связей танковой части танкеров с учетом особенностей пространственного деформирования с прямым использованием критериев предельной пластической и усталостной прочности, а также метода условных измерителей.

- Обоснование необходимости учета податливости продольных переборок при расчете рамного набора танковой части нефтеналивных судов.

- Разработку практической схемы проектирования и оценки металлоемкости продольных связей эквивалентного бруса, поперечных шпангоутных рам и поперечных переборок.

- Обоснование целесообразности бескнижного соединения на нефтеналивных судах двойного дна с двойными бортами.

- Получение уточненной оценки сдвиговой жесткости гофрированных переборок с горизонтальными гофрами.

- Целесообразность применения в корпусах танкеров комбинаций сталей различной прочности.

Практическую ценность работы представляют:

- Методика расчета и проектирования конструкций отсеков нефтеналивных судов в средней части на основе полученных в работе приближенных зависимостей по методу предельных нагрузок, аналитических выражений и таблиц коэффициентов влияния единичных нагрузок на внутренние усилия всех характерных сечений поперечной шпангоутной рамы с последующим уточнением по методу конечных элементов.

- Предложения по выявлению и практическому использованию

резервов и недостатков надежности конструкций нефтеналивных судов, на основе которых обоснован полный или частичный переход корпуса на менее прочную сталь, снижение металлоемкости корпусных конструкций, увеличение надежности попечечных рамных связей корпусов экологически чистых танкеров.

- Предложение по удлинению корпусов танкеров типа "Дмитрий Медведев" цилиндрической вставкой.

- Предложение по бесшпичному соединению на танкерах типа "Дмитрий Медведев" и типа "Победа" двойного дна с двойными бортами.

- Методика оценки металлоемкости нефтеналивных судов на первой стадии проектирования с использованием строительных коэффициентов.

Результаты работы использованы ЦКБ "Изумруд" при разработке эскизного проекта танкера с полностью двухслойным оформлением грузовой части, при корректировке требований Регистра СССР к рамным связям наливных судов, а также при изложении курса "Проектирование корпусов специализированных транспортных судов" в Николаевском кораблестроительном институте.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на Всесоюзной конференции "Проектирование судовых корпусных конструкций" (Корпус-83) в Николаеве, в 1983 году; III Всесоюзной конференции памяти проф. А.Г.Архангородского в Калининграде, в 1984 году; УП Всесоюзной конференции "Бубновские чтения" в Горьком, в 1985 году; Всесоюзной конференции памяти члена-корреспондента АН СССР П.Ф.Палковича в Ленинграде, в 1986 году; а также на конференциях профессорско-преподавательского состава НКИ в 1984, 1986 годах.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 5 статьях (1 в соавторстве) и 4 тезисах докладов (3 в соавторстве).

Объем диссертации. Данная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и приложений. (146 страниц машинописного текста, 126 рисунков, 74 таблиц). Список литературы содержит 247 наименований.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана краткая характеристика содержания всех ее глав.

В первой главе выполнен анализ эволюции, особенностей корпусных конструкций экологически чистых нефтеналивных судов и перспектив их развития, осуществлены анализ и систематизация загруженности на тихой воде, статистических характеристик внешних и внутренних нагрузок на волнении; представлен краткий обзор методов расчета и проектирования конструкций корпусов современных нефтеналивных судов.

Ежегодное загрязнение нефтью и нефтепродуктами мирового океана по данным разных источников оценивается в широком диапазоне, 5...10 млн. тонн. Из этого количества доля, связанная с перевозкой нефти на танкерах, составляет примерно 28 %. Попадание нефти за борт происходит вследствие самых разнообразных причин, из которых основными являются операции по мойке и зачистке танков (около 70 % всей нефти, теряемой танкерами). Поэтому в конце 50-х годов были сделаны первые предложения относительно устройства на наливных судах танков изолированного балласта, в которые никогда не принимается груз и которые обслуживаются специальной балластной системой. Стремление уменьшения аварийных выбросов нефти и нефтепродуктов, а также улучшения зачистных операций привело к появлению на танкерах двойного дна и к созданию танкеров с двойными бортами. Сдерживающей причиной более широкого применения двойных бортов в танкеростроении являлись увеличение массы корпуса и учет в оценке эффективности только зависимости безопасной ширины междубортного пространства от скорости таранящего судна. Привлечение же в оценке эффективности основных эксплуатационно-экономических показателей приводит к снижению приведенных затрат, по сравнению со стандартным танкером, на 1...4 %. Это и привело к появлению в начале 1980 г. нефтеналивных судов с двойным дном и двойными бортами, которые являются перспективным архитектурно-конструктивным типом отечественных танкеров пополнения 1986...1995 гг.

Помимо двойного дна и двойных бортов у современных экологически чистых танкеров появилась двухслойная палуба, большее же распространение получает палуба с набором сверху. В грузовой части все чаще устанавливаются поперечные и продольные переборки гофрированными, применяются скуловые и подпалубные цистерны. Это дает возможность с большей эффективностью использовать автоматическую мойку танков. Однако, при проекти-

ровании танкеров еще достаточно часто используются либо стандартный тип с двойным дном, либо без него.

Отношение L/B стремится к снижению, вплоть до 3,59 (проект мелкоосидящего танкера). B/D находится в пределах 1,5...1,84. Надводный борт в большинстве вариантов является избыточным. Эксплуатационная скорость современных нефтеналивных судов не превышает 14,6 узлов.

С введением на танкерах двойного дна, используемого под чистый балласт, принципиально изменилась картина расчетного состояния. Если для стандартного танкера типичным состоянием был прогиб на тихой воде, как в грузу, так и в балласте, то для танкеров с двойным дном, а также с двойным дном и двойными бортами расчетным случаем стал перегиб в балласте на тихой воде.

Нагрузки, действующие на судовые перекрытия со стороны моря и жидкого груза моделируются суммой двух составляющих, гидростатической и динамической. На основе сравнения ряда методик классификационных обществ виден еще не установившийся подход в назначении расчетных динамических нагрузок, имеющих существенное значение в критериях предельной пластической и усталостной прочности.

Наиболее опасной комбинацией общих и местных нагрузок является случай чередующейся загрузки танков на вершине и полном заполнении всех танков на подошве волны.

Резкое увеличение дедефайта и размерений нефтеналивных судов, а также изменение соотношений главных размерений острее выдвинули требования к обеспечению поперечной прочности танкеров. Анализ пространственного деформирования танкерных корпусных конструкций посвящены работы: Аральдсена Р., Кендрика С., Короткина Я.И. и Казацук И.В., Нильсена и Чанга, Постнова В.А. и Родионова А.А., Скаара К. Основное направление анализа напряженно-деформированного состояния танкерных корпусных конструкций отразилось в оценке влияния податливости опорного контура. В этом аспекте были выполнены работы по приближенным аналитическим моделям Бойцовым Г.В., Короткиным Я.И. и Ипатовцевым Ю.Н., Телёгиной И.А.

Развитие проблемы внутренних сил связано с применением методов конечных и суперэлементов, особенности которых можно видеть по работам: Вилипыльда Ю.К., Галагера Р., Зенкевича О.,

Постнова В.А., Розина Л.А., Сегерлинда Л., Хархурима И.Я., Лапошникова Н.Н. и др.

Результаты расчета конструкций в упругой стадии являются основой оценки и обеспечения усталостной надежности корпусных конструкций при проектировании. В работах Бойцова Г.В., Еролина В.В., Когаева В.П., Максимаджи А.И., Нибберинга Дж., Палия О.М., Петина С.Б., а также в ряде других исследований разработана схема расчетного проектирования конструкций с заданным усталостным ресурсом при случайных нагрузках с известными законами распределения. Все большее практическое значение приобретают вопросы живучести конструкций с трещинами на основе достижений механики разрушения, решение которых отражено в работах: Броека Д., Бойцова Г.В. и Кноринга С.Д., Партона В.З. и Морозова Е.М., Петина С.В. и других авторов.

Существенное значение имеют и вопросы обеспечения надежности конструкций при экстремальных нагрузках в соответствии с критерием предельной пластической прочности. Расчетный аппарат метода предельных нагрузок и метода предельных перемещений интенсивно разрабатывался в работах: Беленького Л.М., Броде Б.М., Бубнова И.Г., Гвоздева А.А., Диковича И.Л., Ершова Н.Ф., Палия О.М. и Бойцова Г.В., Папковича П.Ф., Ржаницина А.Р., Стрельбицкой А.И., Шарова Я.Ф., Шиманского Ю.А. и др.

Большой вклад в разработку метода проектирования поперечного сечения корпуса и отдельных судовых перекрытий был внесен Архангородским А.Г. и Беленьким Л.М., Короткиным Я.И., Курдюмовым А.А., Максимаджи А.И., Масыгиным А.В., Папковичем П.Ф., Сегалем В.Ф., Сиверцевым И.Н., Смоляковым Б.Н., Шиманским Ю.А. и др.

В период эксплуатации немаловажное значение имеет оформление и надежность отдельных конструктивных деталей. К работам, выполненным в этом направлении стоит отнести исследования Барабанова Н.В., Ватанбе А., Верховодко А.З., Джонсена К. и Хаслума К., Иванова Н.А. и Новикова В.В., Канаи Р., Линна Д. и Беккера А., Локшина А.З., Мори М., Нагано Т., Нибберинга Дж., Петина С.Б., Хагивара К., Яшима Х.

Вторая глава посвящена анализу стандарта общей прочности танкеров, рациональному распределению балласта, приводящему к уменьшению изгибающего момента, и схеме проектирования продольных связей эквивалентного бруса с предварительным назна-

чением размеров пластин и ребер облобочек из условий местной прочности и устойчивости, с завершающим определением площадей крайних связей из условий общей прочности.

В перспективных Правилах Регистра СССР стандарт общей прочности относится к корпусу судна в середине срока эксплуатации. Для современных танкеров существенное значение имеет момент сопротивления палубы

$$W_n = W_0 \eta (\sigma_T) [0,48 + 0,52 \frac{M_{TB}^{max}}{M_{TB}^0}] , \quad (I)$$

где $W_0 = C_n(L) B L^2 (C_B + 0,7) \cdot 10^{-6}$; $M_{TB}^0 = W_0 \sigma_{TB}$

$$C_n(L) = 10,75 - \left(\frac{300-L}{100} \right)^{3/2} \quad \text{при } L \leq 300 \text{ м}$$

На основании (I) можно видеть, что минимальный момент сопротивления корпус судна приобретает при $M_{TB}^{max} \leq M_{TB}^0$. Для экологически чистых танкеров характерны большие относительные изгибающие моменты, достигающие, например, у т/х "Дмитрий Медведев" величины 1,69, что в свою очередь увеличивает требования Правил РС-85 к W_n на 36 %. Добиться равенства M_{TB}^{max} и M_{TB}^0 можно с помощью рационального распределения балласта. В ряде случаев требуется размещение дополнительного количества балласта. Эффект от устранения действия на корпус превышения момента ΔM_{TB} можно реализовать применением в связях эквивалентного бруса менее прочных сталей, либо осуществить удлинение корпуса цилиндрической вставкой, которое эффективно для судов с большим относительным изгибающим моментом. При удлинении корпуса судна всегда можно выделить из дополнительно получаемого объема часть под балласт.

Масса продольных связей отечественных экологически чистых нефтеналивных судов составляет от 63 % до 69 % общей погонной массы их грузовой части, что и определяет важность этого этапа проектирования корпуса. В проектировании эквивалентного бруса использована обобщенная методика проф. Курдюмова А.А., основанная на многопоясном профиле, рис. I и приемлемая для проектирования эквивалентного бруса танкеров.

Правила классификационных обществ жестко регламентируют

местную прочность и устойчивость пластин и ребер, а также минимальные толщины всех пластин.

Располагая из условий местной прочности, устойчивости и минимальных толщин толщинами пластин, площадями ребер жесткости, можно получить площади всех заданных характерных участков эквивалентного бруса F_i . При определении площади стенок бортов учитываются требования стандарта общей прочности и ледового класса.

Для эквивалентного бруса, рис. I, требуемые величины площади палубы F_n , днища $F_{\text{дн}}$ и всего эквивалентного бруса F из условия обеспечения общей прочности, при заданных W_n и μ , а также ω и F_i , определяются выражениями:

$$F_n = \frac{W_n}{D} - \frac{\omega(1-1,5\mu)}{3(1-\mu)} + \frac{\mu}{1+\mu} \sum \frac{C_i}{D} \left[\mu - \frac{C_i}{D} \left(1 + \frac{1}{12} \frac{h_i^2}{C_i^2} \right) \right]$$

$$F_{\text{дн}} = \frac{W_n(1-\mu)}{D-\mu} - \frac{\omega(\mu-0,333)}{2\mu} - \sum F_i \left[1 + \frac{1}{\mu} \frac{C_i^2}{D^2} \left(1 + \frac{1}{12} \frac{h_i^2}{C_i^2} \right) - \frac{1+\mu}{\mu} \frac{C_i}{D} \right]$$

$$F = \frac{W_n}{\mu D} + \frac{\omega}{6\mu(1-\mu)} + \frac{1}{\mu(1-\mu)} \sum F_i \frac{C_i}{D} \left[1 - \frac{C_i}{D} \left(1 + \frac{1}{12} \frac{h_i^2}{C_i^2} \right) \right]$$

Если учесть, что расчетным случаем современных экологически чистых нефтеналивных судов является состояние перегиба, то для рационального проектирования эквивалентного бруса достаточно воспользоваться выражением F_n .

Третья глава является центральной, в ней рассмотрены методы расчета и проектирования рамных связей нефтеналивных судов в соответствии с критерием предельной пластической прочности, рассмотрена общая схема проектирования рамных связей на основе метода условных измерителей.

Поскольку все размеры пластин и ребер, включая стенки некоторых продольных связей, определены ранее, то на втором этапе необходимо определить размеры поперечных рамных связей на основе метода предельных нагрузок (что является хорошей отправной точкой в последующих уточнениях размеров конструкций). Затем необходимо проверить размеры на базе критерия усталостной прочности.

Необходимая площадь нетто стенок связей обоих направлений f_{1i} и f_{2i} для всех перекрытий отсека определяется следующим известным соотношением:

$$(f_{1i} - \Delta f_{1i}) \varphi_{1i}^m n_{1i} + (f_{2i} - \Delta f_{2i}) \varphi_{2i}^m n_{2i} \geq \frac{P_{pi}^m B_i L_i}{2 \tau_i},$$

где Δf_i - коррозионная добавка за 12 лет срока службы судна;

$n_{1i} = \varphi_{1i}^m$, $n_{2i} = \varphi_{2i}^m$ - число связей каждого направления и редуцированные коэффициенты, связанные с недостаточной устойчивостью стенок и отрицательным влиянием осевых напряжений. Нормативное значение предельной нагрузки для каждого из перекрытий отсека может быть определено по формуле:

$$P_{pi}^m \approx P_{pi}^{max} + \frac{n^*}{8} P_{pi}^B$$

где n^* - параметр нормативной вероятности.

Несмотря на то, что танкерные рамные связи являются высокостенными, для которых определяющими являются формы обрушения со срезом (с пластическим шарниром скольжения), для рамных связей со свободным пояском, какими являются бимсы, а также стойки продольных переборок и шпангоуты в бортовых танках, необходимо контролировать пластические моменты сопротивления с учетом отрицательного влияния плоского напряженного состояния поясков с главными напряжениями разных знаков и малой устойчивости поясков, сжатых вдоль короткой стороны опорного контура:

$$1/\delta^{on} = \frac{b}{8n\varphi_{pi}\sigma_{\tau}} \frac{P_{pi}^m a b n - 4 \sum N_{kpi}^m}{1 + \frac{W_{\delta}^{cp}}{W_{\delta}^{on}}} + \Delta W_{изн}$$

$$W_{un}^B = \frac{P_{pi}^m a h (h - h_1)}{2 \varphi_{pi} \sigma_{\tau} \left[\left(1 + \frac{W_{un}^{cp} + W_{ст}^B + W_{ст}^{cp}}{W_{un}^B} \right) + \frac{h - h_1}{h_1} \frac{W_{un}^m + W_{un}^{cp} + W_{ст}^m + W_{ст}^{cp}}{W_{un}^B} \right]} + \Delta W_{изн}$$

Все проектировочные формулы получены на основе анализа несущей способности перекрытий грузового отсека современных отечественных экологически чистых нефтеналивных судов. В результате анализа выявлено, что надежность реальных корпусных конструкций, исчисляемой вероятностью разрушения Q_{pi} за срок службы, колеблется от 10^{-5} до 10^{-53} ; экономически оправданная вероятность разрушения Q_{pi}^m , равная $10^{-4} \dots 10^{-6}$, хорошо согласуется с нормированием предельной нагрузки Французским Бюро Веритас, применяемым метод предельных нагрузок в проектировании рамных связей стандартных танкеров с 1965 г.; нормативные относительные предельные нагрузки равны:

$- P_{pi} / (P_{pi}^{max} + P_{pi}^B) \approx 1,3 \dots 1,5$ - показывает превышение P_{pi} над суммарной нагрузкой;

$- P_{pi}^B / P_{pi}^B \approx 1,5 \dots 1,75$ - выявляет запас прочности по предельной волновой нагрузке;

$- P_{pi} / P_{pi}^{max} \approx 3,0 \dots 3,1$ - превышение предельной нагрузки над нагрузкой от тихой воды.

После определения размеров рамных связей по МПН необходимо произвести контрольный расчет в упругой стадии по МКЭ с максимально возможным учетом пространственности отсека, так как Нормы прочности в настоящее время ориентированы на нормирование напряжений в упругой стадии.

Расчет отсека можно осуществить по пространственным расчетным схемам. Однако, наряду со столь полными расчетными схемами, требующими большого подготовительного периода, необходимо иметь упрощенные расчетные схемы, обладающие мобильностью в расчетах и позволяющие получать результаты хорошей точности. Такими схемами могут служить плоские расчетные схемы поперечных шпангоутных рам, в которых поддерживающее влияние продольных переборок и продольных рамных связей моделируется с помощью эквивалентных упругих опор.

Продольные связи заменены пружинами из соображений упрощения расчетной схемы и сокращения объема исходных данных. Для танкеров с продольной переборкой в ДП выражение податливости продольной переборки имеет вид:

$$A = \frac{5-4\alpha}{384 E J_{\pi}} \frac{L^4}{a} \left(1 + \frac{125}{5-4\alpha} \frac{J_{\pi}}{f_{\pi} L^2} \left[1 + \frac{8}{5-4\alpha} \frac{J_{\pi}}{J_n} \left(\frac{B}{L} \right)^3 \frac{1+25}{f_n B^2} \right] \right) \quad (2)$$

где L , a , B - длина перекрытия, шпация и ширина судна, м;
 α - коэффициент опорной пары для продольной переборки; J ,
 f - моменты инерции и площади стенок продольной (индекс "пр")
 и поперечной (индекс "п") переборок.

А для танкеров с двумя продольными переборками их податливости описываются зависимостью:

$$A = \frac{L^4}{a} \frac{5-4\alpha}{384 EJ_{пр}} \left(1 + \frac{12.5}{5-4\alpha} \frac{J_{пр}}{f_{пр} L^2} \right) \left[1 + \left(\frac{b_s}{L} \right)^2 \frac{J_{пр}}{J_n} \frac{12.8}{5-4\alpha} \frac{4 f_n b_s}{1 + \frac{12.5}{5-4\alpha} \frac{J_{пр}}{f_{пр} L^2}} - 1 \right]$$

где b_s - ширина бортового танка, м; остальные обозначения аналогичны обозначениям в (2).

Податливость перекрестных рамных связей, днищевых и бортовых стрингеров, вертикального киля, карлингсов достаточно определять известной формулой:

$$A = \frac{5-4\alpha}{384} \frac{L^4}{a E J} \left(1 - \frac{12.5}{5-4\alpha} \frac{J}{f L^2} \right)$$

Точность обоснованных плоских расчетных схем поперечных шпангоутных рам оценивалась результатами, полученными по пространственным расчетным схемам, а также сравнениями расчетных усилий с усилиями, замеренными во флорах и шпангоутах при натурных испытаниях грузовых отсеков в составе полностью сформированных корпусов танкеров типа "Командарм Фёдоров" и "Дмитрий Медведев" на Херсонском судостроительном заводе.

Необходимо отметить, что учет податливости продольных переборок существенно перераспределяет усилия в опорных сечениях флора и шпангоута. Например, учет податливости диаметральной переборки увеличивает изгибающий момент во флоре т/х "Победа" на 36 %, а перерезывающую силу - на 16 %.

Для проверочных расчетов в упругой стадии можно воспользоваться коэффициентами влияния единичных нагрузок на расчетные усилия. Такие коэффициенты получены по 4 реальным шпангоутным рамам отечественных экологически чистых нефтеналивных судов и собраны в таблицы для двадцати характерных точек. Усилия в интересующих сечениях составляющих поперечной шпан-

гоутной рамы близких прототипам танкеров определяются суммами:

$$N_i = \frac{1}{n} \sum K_{ij}^N P_j; \quad M_i = \frac{1}{m} \sum K_{ij}^M P_j l_j$$

где n и m - масштабные коэффициенты; K_{ij}^N , K_{ij}^M - коэффициенты влияния на усилия N и M в i -й точке от воздействия на шпангоутную раму j -й нагрузки P_j (для нефтеналивных судов нагрузки от жидкого груза и морской воды можно составить из шести составляющих: равномерно распределенные на бимсе и флоре; равномерно распределенные на стойке продольной переборки и шпангоуте, представляющие собой гидродинамические нагрузки; и треугольные на стойке продольной переборки и шпангоуте - гидростатические нагрузки); l_j - расчетная длина элемента рамы, на котором располагается i -я точка.

Рассмотренная схема проектирования пригодна только для подобных конструкций и не дает структуры выражений для расчетных усилий. Поэтому целесообразно получить приближенное аналитическое решение на базе представления системы отсеков в виде совокупностей поперечных и продольных кольцевых рам на упругом основании. Ввиду малой жесткости продольных рамных связей, в ряде случаев и их отсутствием, упругим основанием в поперечных рамах можно пренебречь.

С учетом сказанного, расчетные схемы поперечной и продольной кольцевых рам танкеров с продольной переборкой в ДП представлены на рис.2.

Расчет каждой из кольцевых рам содержит по два неизвестных угла поворота узлов α_1 и α_2 , а поперечная рама к тому же имеет неизвестную величину просадки Δ продольной переборки, имеющей жесткость K , и может быть выполнен по методу перемещений.

После определения неизвестных α_i и Δ можно получить выражения для расчетных усилий связей поперечной шпангоутной рамы:

$$M_{21} = \frac{M'_{21} + M''_{21} + M_{23} + 2E \frac{(3 \frac{J_1}{L} + 4 \frac{J_2}{L})(LD - BH) + 3 \frac{J_3}{L}(HA - BC)}{DA - B^2}}{2(1 + \frac{J_2 L}{J_1 L})}$$

$$M_{24} = \boxed{M_{24}} - \frac{2EJ_2}{l} \frac{2(CD-BH) - 3(HA-BC)}{DA-B^2}$$

$$M_{13} = \boxed{M_{13}} - \frac{\boxed{M'_{12}} + \boxed{M''_{12}} + \boxed{M_{13}} - \frac{2EJ_1}{l_1} \frac{3(HA-BC) + CD-BH}{DA-B^2}}{1 + \frac{J_3 l}{J_3 l_1}}$$

$$N_{21} = \boxed{N'_{21}} + \boxed{N''_{21}} - \frac{M_{12} + M_{21}}{l_1}; \quad N_{24} = \boxed{N_{24}} - \frac{M_{24} + M_{42}}{l}; \quad N_{13} = \boxed{N_{13}} - \frac{M_{13} + M_{31}}{l}$$

где $A = \frac{4E(\frac{J_1}{l_1} + \frac{J_2}{l})(1 + \frac{J_3 l_1}{J_1 l}) - \frac{EJ_1}{l_1}}{1 + \frac{J_3 l_1}{J_1 l}}$

$$B = \frac{\frac{3EJ_3}{l} - \frac{6EJ_2}{l}(1 - \frac{J_3 l_1}{J_1 l})}{1 + \frac{J_3 l_1}{J_1 l}}$$

$$C = \boxed{M'_{21}} + \boxed{M''_{21}} + \boxed{M_{24}} - \frac{\boxed{M'_{12}} + \boxed{M''_{12}} + \boxed{M_{13}}}{2(1 + \frac{J_3 l_1}{J_1 l})}$$

$$D = \frac{3E}{l} \frac{4(J_3 + J_2 + K \frac{l^3}{24E})(1 + \frac{J_1 l}{J_3 l_1}) + 3J_3}{1 + \frac{J_1 l}{J_3 l_1}}$$

$$H = \frac{l}{4}(Q_2 - Q_3) + 3 \frac{\boxed{M'_{12}} + \boxed{M''_{12}} + \boxed{M_{13}}}{2(1 + \frac{J_1 l}{J_3 l_1})}$$

$\boxed{N_{ij}}$, $\boxed{M_{ij}}$ - перерезывающая сила и момент в опорном сечении жесткозащемленного элемента рамы от воздействия соответствующей нагрузки.

Продольная кольцевая рама имеет упругое основание и ее решение относительно углов поворота α_1 и α_2 является следующим:

$$\alpha_1 \approx \frac{l_1}{4EJ_1} \frac{\boxed{M_{12}} + \boxed{M_{11'}} + \boxed{M_{13}}}{\beta_1 + \frac{J_2 l_1}{J_1 l_2} (2\beta_2 - \gamma_2)}$$

$$\alpha_2 \approx \frac{l_1}{4EJ_1} \frac{\boxed{M_{21}} + \boxed{M_{22'}} + \boxed{M_{24}}}{\beta_1 + \frac{J_3 l_1}{J_1 l_2} (2\beta_3 - \gamma_3)}$$

А расчетные усилия, например, в опорном сечении днищевого стрингера (вертикального кия) определяются следующими формулами:

$$M_{11'} = \boxed{M_{11'}} - \frac{J_2 l_1}{2J_1 l_2} \frac{[\boxed{M_{12}} + \boxed{M_{11'}} + \boxed{M_{13}}](2\beta_2 - \gamma_2)}{\beta_1 + \frac{J_2 l_1}{J_1 l_2} (2\beta_2 - \gamma_2)}$$

$$N_{11'} = \frac{Q_2}{2} \bar{\chi}_1(u_2, v_2) - \frac{M_{11'} + M_{11'}}{l_2}$$

где $\boxed{M_{11'}} = -\frac{Q_2 l_2}{12} \bar{\chi}_2(u_2, v_2)$; $\boxed{M_{12}} = \frac{Q_1 l_1}{12} \bar{\chi}_2(u_1, v_1) + \frac{Q_1' l_1}{10} \bar{\chi}_2''(u_1, v_1)$;

$$\boxed{M_{13}} = \frac{Q_3 l_2}{12} \bar{\chi}_2(u_2, v_2)$$

Широкое внедрение в практику проектирования судовых корпусных конструкций расчетных методов неизбежно требует соответствующего нормирования местной прочности. Поэтому в работе рассмотрен вопрос о допускаемых напряжениях рамного набора нефтеналивных судов и были получены коэффициенты действующих напряжений рамных элементов грузовых танков.

экологически чистых нефтеналивных судов с учетом износа за 12 лет.

Четвертая глава посвящена анализу металлоемкости отечественных экологически чистых нефтеналивных судов, оценке и прогнозированию массы металлических корпусов подобных танкеров.

Появление новых типов конструктивного решения современных нефтеналивных судов, качественно вносящих изменения в статистику металлоемкости корпусов судов, желание иметь возможность учитывать в явном виде фактор конструкторского решения, находить оптимальные решения задачи проектирования не только в показателях массы, но и в стоимостном выражении, а также все большее применение в составе корпуса комбинаций сталей приводят к необходимости создания расчетно-проектировочных комплексов на базе ЭВМ, являющих собой наиболее точный, но чрезвычайно громоздкий аппарат, либо упрощенных зависимостей, позволяющих учитывать перечисленные факторы.

Для прогнозирования массы металлического корпуса нефтеналивных судов можно использовать идею разбивки корпуса судна по функциональным блокам (носовая и кормовая оконечности, машинное отделение, надстройка и грузовая часть) с расчленением массы грузовой части, как наиболее металлоемкую (60...80 % $P_{мк}$), наиболее изменяемую и рассчитываемую, по трем составляющим P_1 , P_2 и P_3 .

Погонная масса продольных связей P_1 определяется площадью эквивалентного бруса F , проектирование и управление которой на начальных стадиях проектирования подробно рассмотрены в главе 2. Погонную массу поперечной шпангоутной рамы P_2 и поперечной переборки P_3 целесообразно определять, используя расчетные методы.

Например, для танкера с продольной переборкой в ДП массу металлического корпуса можно определить суммой:

$$P_{мк} = (\gamma_1 F + P_2 + P_3) l_{\text{пр}} + \sum K_i V_i$$

где K_i — удельная масса соответствующих функциональных блоков; V_i — их объемы, легко определяемые по эскизу емкости или теоретическому чертежу. Погонные массы P_2 и P_3 определяются с использованием строительных коэффициентов μ :

$$P_2 = 2,8 \gamma_1 (\sigma_1) 10^{-4} \left[P_{\text{пр}}^{\text{ма}} l_{\text{шп}}^2 \mu_{\text{шп}} + P_{\text{пр}}^{\text{ра}} l_{\text{ст}}^2 \mu_{\text{ст}} + \frac{B^4}{4} (P_{\text{пр}}^{\text{ма}} \mu_{\text{шп}} + P_{\text{пр}}^{\text{ра}} \mu_{\text{ст}}) \right]$$

$$P_3 = 2 P_2^{\text{р}} + P_3^{\text{ст}} + P_3^{\text{ма}}$$

где $P_2^{\text{р}} = 2,8 \frac{P_{\text{пр}} H B \eta (\sigma_1) 10^{-4}}{(m+n) l} (n b \mu_{\text{ш}} + m H \mu_{\text{ст}})$ — погонная масса рамного набора переборки; $P_3^{\text{ст}}$ — погонная масса вертикальных стоек:

$$P_3^{\text{ст}} = 8,4 \frac{P_{\text{пр}} B H^2 \eta (\sigma_1) 10^{-4}}{(n+1) l};$$

$P_3^{\text{ма}}$ — погонная масса обшивки переборки:

$$P_3^{\text{ма}} = \frac{\gamma_1 H B 10^{-3}}{l} \left[15,8 a \sqrt{\frac{(P_{\text{пр}}^{\text{ма}} + P_3^{\text{ст}}) \eta (\sigma_1)}{24}} + 4 \right]$$

В работе показано влияние некоторых главных размерений судна, топологии грузового отсека, шпаций, марки стали и ее комбинаций на металлоемкость грузовой части нефтеналивных судов.

В пятой главе приведен пример расчетного проектирования корпусов нефтеналивных судов с двойным дном и двойными бортами на основе разработанного метода, а также помещено обоснование назначения размеров обшивки, настилов, набора грузовой части нефтеналивных судов из условий прочности и устойчивости на конец срока службы судна с последующей коррозионной добавкой за 24 года.

В приложении помещено обоснование бескничного соединения элементов поперечных шпангоутных рам отечественных танкеров типа "Дмитрий Медведев" и "Победа". С использованием расчетно-экспериментальных исследований выполнена оценка сдвиговой жесткости гофрированной переборки с горизонтальными гофрами. Описана постановка натурных испытаний грузовых отсеков в составе корпусов танкеров типа "Командарм Федько" и "Дмитрий Медведев" на стапеле Херсонского судостроительного завода.

Основные результаты и выводы

— Выполнены систематизация и обобщение статистических характеристик внешних и внутренних нагрузок.

- Осуществлен анализ предельной прочности танкерных конструкций грузовой части с выявлением нормативных значений вероятностей и нагрузок, получены формулы по которым можно осуществлять проектирование в I приближении рамного набора с заданной надежностью.

- Обоснованы для расчета по МКЭ расчетные схемы поперечных шпангоутных рам с учетом пространственных эффектов.

- Выполнен трудоемкий анализ по МКЭ пространственных конструкций в средней части четырех типов современных отечественных нефтеналивных судов с построением таблиц коэффициентов влияния единичных нагрузок на расчетные усилия в элементах поперечных шпангоутных рам.

- Выведены приближенные аналитические выражения для расчетных усилий в характерных сечениях рамных связей, основанные на представлении грузового модуля в виде поперечных и продольных кольцевых рам.

- Выполнен анализ металлоемкости корпусов отечественных экологически чистых нефтеналивных судов по функциональным блокам, с подробным анализом средней части. Определены конструктивные коэффициенты для различных рамных связей. Представлены расчетные формулы оценки и прогнозирования металлоемкости грузовой части.

- Осуществлены экспериментальные исследования корпусных конструкций танкеров типа "Командарм Федько" и "Дмитрий Медведев" на базе натурных испытаний.

- Выявлено уменьшение сдвиговой жесткости гофрированных переборок с горизонтальными гофрами.

- Выявлена и обоснована возможность бесконичного соединения элементов поперечных шпангоутных рам танкеров с двойным дном и двойными бортами.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Белоусов В.Н. Особенности конструкции и загрузки танкеров с двойными бортами и двойным дном. - Проектирование и конструкции судов. Сб.науч.тр., Николаев, НКИ, 1983, с.76-83.

2. Белоусов В.Н. К вопросу о расчетных нагрузках и нормировании некоторых конструкций нефтеналивных судов. - Проектирование и конструкции судов. Сб.науч.тр., Николаев, НКИ, 1984, с.66-72.

3. Белоусов В.Н. О проектировании рамных связей нефтеналивных судов по методу предельных нагрузок. - Проектирование и конструкции судов. Сб.науч.тр., Николаев, НКИ, 1985, с.56-70.

4. Белоусов В.Н. Экспериментально-расчетное исследование прочности днищевого перекрытия танкера с двойным дном. - Совершенствование судовых устройств и гибких конструкций. Сб.науч.тр., Николаев, НКИ, 1985, с.87-95.

5. Белоусов В.Н., Козляков В.В., Шарун Г.В. Перспективы увеличения провозоспособности накатных и наливных судов методом удлинения. - Строительная механика корабля. Сб.науч.тр., Николаев, НКИ, 1986, с.112-117.

6. Белоусов В.Н. Особенности конструкции и проектирования корпусов нефтеналивных судов с двойным дном и бортами. - Тезисы докладов на Всесоюзной конференции "Проектирование судовых корпусных конструкций" (Корпус-83), Николаев, 1983, с.174-175.

7. Козляков В.В., Белоусов В.Н. и др. Вопросы расчетного проектирования корпусов специализированных транспортных судов. - Тезисы докладов III Всесоюзной конференции, посвященной памяти проф. А.Г.Архангородского, Калининград, 1984, с.15.

8. Козляков В.В., Белоусов В.Н. и др. Об оценке и прогнозировании металлоемкости корпусов транспортных судов. - Тезисы докладов УП Всесоюзной конференции "Бубновские чтения", Горький, 1985, с.23.

9. Белоусов В.Н., Козляков В.В. и др. О проектировании корпусов транспортных судов с контролем металлоемкости. - Тезисы докладов на Всесоюзной конференции "Проблемы обеспечения прочности транспортных судов и плавучих сооружений и снижения металлоемкости корпусных конструкций" (памяти члена-корреспондента АН СССР П.Ф.Папковича), Ленинград, 1986, с.38-39.

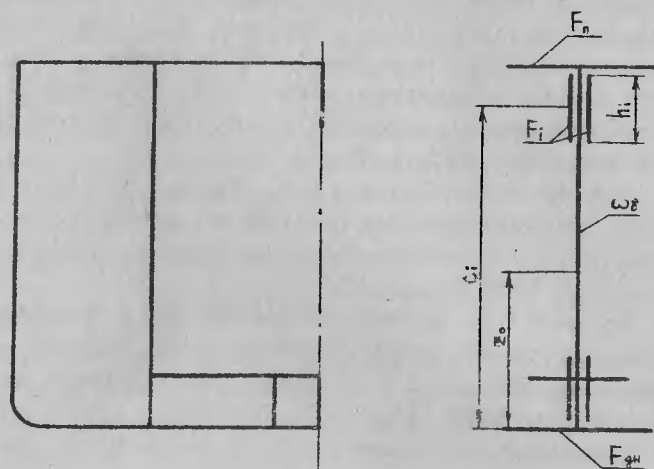


Рис.1 Эквивалентный брус

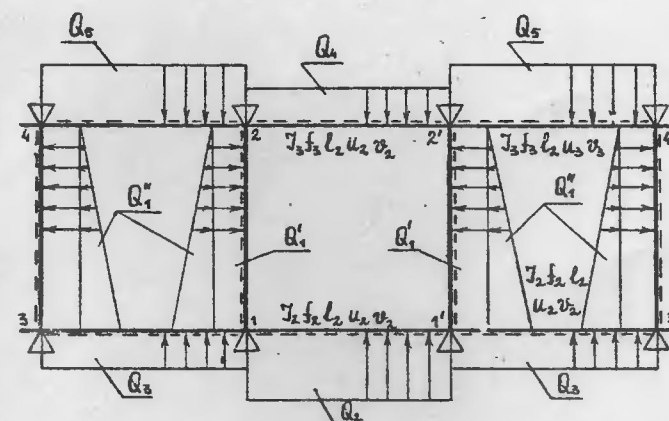
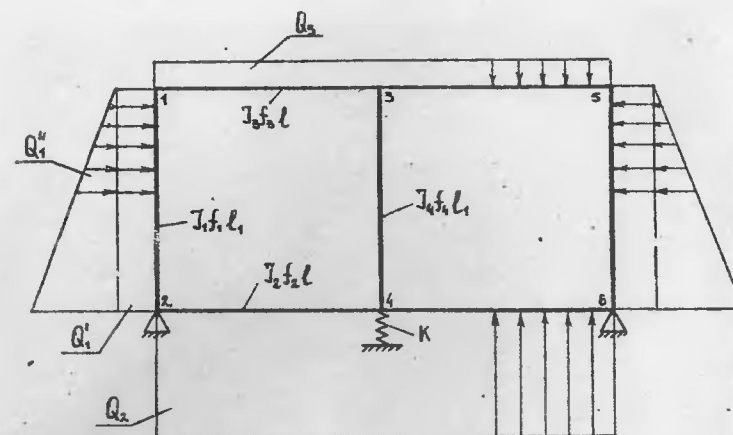


Рис.2 К выводу аналитических зависимостей
в связях поперечной шпангоутной и
продольной рамах танкера с продоль-
ной переборкой в ДП