

НИКОЛАЕВСКИЙ КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ  
имени адмирала С. О. Макарова

На правах рукописи

ТОЛЫШЕВ Эдуард Владимирович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВЫХ ЭЛАСТИЧНЫХ  
КРАНЦЕВ СТАЦИОНАРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

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**

Николаев — 1993



00814790 (Т)

Робота виконана в Николаеве  
 туте імені адмірала С.О.Макарова...

Научний керівитель - кандидат технічних наук, доцент  
 КОРОБАНОВ Д.Н.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор  
 КОЗЛЯКОВ В.В.  
 - кандидат технічних наук, доцент  
 МАРТЫНЕЦ Б.Н.

Ведущая організація - ПКБ "Прогресс"

Захист состоится *28.06* 1993 г. в "11" часів на  
 засіданні спеціалізованого комітету Д.053.04.01 Николаевського  
 кораблестроїтельного інституту імені адмірала С.О.Макарова по  
 адресу:

327025, г. Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці інституту.

Автореферат розіслав *28.05* 1993 года.

УЧЕНИЙ СЕКРЕТАРЬ

СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО КОМІТЕТУ

доктор технічних наук,

професор

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
 АН України

*В.Ф.Квасницький*  
 В.Ф.Квасницький

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**А к т у а л ь н о с т ь п р о б л е м ы.** Судовые эластичные кранцы стационарного исполнения представляют собой широко распространенный вид кранцевой защиты судов и объектов океанотехники, регулярно совершаемых при эксплуатации швартовные операции.

Кранцы, выполненные из резины и резиноподобных материалов обладают высокой надежностью и долговечностью. Однако повреждения кранцевой защиты зачастую влекут за собой разрушение корпусных конструкций защищаемых судов и объектов океанотехники, что приводит к значительным затратам на их ремонт.

Это свидетельствует о том, что судовые эластичные кранцы стационарного исполнения как защитная конструкция изучены недостаточно, практически отсутствуют теоретические исследования и рекомендации по их проектированию охватывающие рассмотрение комплекса защищаемый объект-кранец и взаимное влияние его элементов.

В связи с изложенным задача создания методики расчета параметров эластичных кранцев и рекомендаций по их проектированию представляется весьма актуальной.

**Ц е л ь р а б о т ы** является:

1. Создание аналитических методов определения величин нагрузок на кранцевую защиту в различных случаях эксплуатации.
2. Анализ и разработка методов расчета эластичных кранцев с учетом многообразия их форм и условий эксплуатации.
3. Разработка методов учета реальных условий крепления в проектных расчетах стационарных эластичных кранцев.
4. Разработка методов учета изменения зоны контакта и перераспределения контактных давлений для цилиндрических эластичных кранцев.
5. Разработка практических рекомендаций по проектированию судовых эластичных кранцев стационарного исполнения.

**М е т о д ы и с с л е д о в а н и я.** Для достижения поставленных целей использованы аналитические методы в сочетании с имеющимися обширными экспериментальными данными. Аналитические результаты основываются на использовании верооятностных методов расчета; составлении и решении дифференциальных уравнений движения; использовании вариационных методов решения задач о

деформирования эластичных конструкций, одним из которых является метод конечных элементов. Результаты аналитического решения сравнивались с имеющимися экспериментальными данными.

**Научная новизна.** Предложена и обоснована методика численного моделирования швартовки судна с вероятностных позиций.

На основе анализа взаимодействия судов и проводящих их ледоколов создана математическая модель системы ледокольное судно - кранец - транспортное судно при прохождении ледового поля.

Разработана математическая модель расчета эластичных конструкций переменного по длине сечения, построенная на энергетических соотношениях теории упругости.

Реализован и подвергнут всестороннему анализу метод конечных элементов применительно к расчетам судовых эластичных конструкций.

Выбраны типовые схемы и конструкции креплений, разработаны расчетные процедуры по оценке деформативных качеств эластичных кранцев с учетом их крепления.

Составлена схема учета пространственных деформаций судовых эластичных кранцев шнурового исполнения, разработана методика корректировки упругих характеристик.

**Практическая ценность** состоит в создании рекомендаций по проектированию судовых эластичных кранцев стационарного исполнения с учетом их реальных условий эксплуатации.

Результаты работы использованы в хозяйственной работе № 2.1.Пр.173 выполненной совместно с проектно-конструкторским бюро "Прогресс", в госбюджетных НИР № 2.1.Пр.518, выполненной в 1991г. и № 2.1.Пр.783 выполненной в 1992 г.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы доложены на научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава НКИ (г.Николаев, 1990г.), Всесоюзной конференции "Безопасность на море" (г.Николаев, 1991г. 2 доклада) и Девятой Дальневосточной конференции по мягким оболочкам (г.Владивосток, 1991г.).

**Структура и объем.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, перечня литературы и двух приложений. Общий объем диссертации 198 страниц машинописного текста, в том числе 56 иллюстраций, 1 таблица.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Численный метод моделирования швартовки судна с вероятностных позиций.
2. Математическая модель системы ледокольное судно-кранец-транспортное судно при прохождении ледового поля.
3. Математическая модель эластичной конструкции, построенная на энергетических соотношениях теории упругости.
4. Реализация метода конечных элементов применительно к расчетам судовых эластичных конструкций.
5. Схемы расчетов эластичных кранцев с учетом их крепления и деформирования.
6. Схема учета пространственных деформаций судовых эластичных кранцев и определения их откорректированных упругих характеристик.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулировки цели и задач исследования, а также основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе назначение и области применения эластичных судовых кранцев стационарного исполнения.

Объектом исследования в диссертационной работе служат эластичные судовые кранцы стационарного исполнения. Эластичные конструкции, выполненные из резины и резиноподобных материалов, способны накапливать энергию удара, поглощать ее за счет значительного формоизменения, воспринимать высокие контактные давления и восстанавливать первоначальную форму конструкции после снятия нагрузки. Важным преимуществом является неприхотливость к обслуживанию и ремонту, а также способность работать в различных климатических условиях и под воздействием морской воды.

Основной задачей, выполняемой эластичными судовыми кранцами стационарного исполнения, является предохранение судна от повреждений при соприкосновении с другими объектами в процессе эксплуатации.

Эластичные судовые кранцы стационарного исполнения находят применение в качестве привальных брусьев, кранцев предохраняющих подводные аппараты, контейнеры с научной аппаратурой, кранцев

судов вспомогательного флота (ледоколов, буксиров), кранцев судов совершающих регулярно грузовые операции на рейдах (лихтеровозов).

Эластичные средства амортизации устанавливаются на судовых конструкциях стационарно. Они имеют однотипные средства крепления резиновых деформативных элементов к стальным корпусным конструкциям, испытывают однотипные нагрузки (сжатия и сдвига), а следовательно и однотипные деформации. Все эти особенности позволяют объединить перечисленные средства амортизации в одну группу с общими методами расчета и проектирования.

Доказательством общности вопросов проектирования в различных стационарных средствах судовой амортизации является произведенный сравнительный анализ конструкций эластичных кранцев. Наряду с этим был выполнен анализ технологических особенностей монтажа, условий эксплуатации и крепления эластичных деформативных элементов к судовым конструкциям.

Определено, что эластичные кранцы выполняют следующие функции: ограждение корпусных конструкций от контакта с внешним объектом; распределение усилий, возникающих при контакте, на корпусные конструкции; поглощение энергии контакта за счет собственных деформаций; восприятие значительных контактных давлений.

Эластичные кранцы стационарного исполнения должны обладать высокой изгибной жесткостью и высокой энергоемкостью. Контактные давления, неизбежно передаваемые на корпусные конструкции, не должны превышать допустимых пределов.

Все перечисленные требования очерчивают круг задач возникающих при проектировании эластичных кранцев.

Во второй главе дается вероятностная оценка внешних воздействий на эластичные кранцы.

В процессе эксплуатации судовые эластичные кранцы стационарного исполнения подвергаются многочисленным контактам с внешними объектами (судами, причальными сооружениями, лихтерами, подводной техникой и т.п.). Так как контактные операции производятся в различных погодных условиях и разными судоводителями, то очевидна их вероятностная природа. Для оценки внешних воздействий с вероятностных позиций возникает необходимость применения моделирования процесса контакта.

Для задач моделирования весьма существенно умение генери-

ровать качественную последовательность псевдослучайных чисел с заданным законом распределения. Как правило в качестве моделируемой величины выступает скорость контакта. Принято считать, что она распределена по нормальному закону, однако могут быть использованы и другие законы распределения.

Процесс швартовки судна зависит от множества случайных факторов как объективных, таких как погодные условия, защищенность акватории, так и субъективных, связанных с навыками судоводителя. Отсюда при проектировании кранцевой защиты судна возникает задача рассмотрения процесса швартовки с вероятностных позиций. Случайными величинами при таком подходе можно считать скорости и угол подхода судна к причальному сооружению.

Большую роль в подобных задачах играет достоверность описания процесса в детерминированной части. Для решения детерминированной задачи предложен метод определения положения точки контакта судна с причалом.

Доля энергии, воспринимаемая в момент первого контакта кранцевой защиты характеризуется коэффициентом эксцентриситета, определенного с учетом линейной и угловой скоростей швартовки судна.

В качестве примера рассмотрена задача о швартовке судна к причалу.

В качестве случайных величин рассмотрены линейная и угловая скорости швартовки и угол подхода судна к причальному сооружению. Моделирование случайных величин производилось в следующих пределах: для линейной скорости от 0 до 0,26 м/с, для угловой скорости от -0,01 до 0,01 1/с, для угла подхода от 0 до 16 градусов. Все величины считались нормально распределенными в указанных предельных значениях.

Анализ распределения энергии швартовки показывает, что в 90 % случаев швартовки энергия судна составит величину меньше 103,4 кДж. В 10 % случаев швартовки кинетическая энергия судна составит величину от 103,4 до 240 кДж. Гистограмма распределения радиуса точки контакта показывает, что в промежуток от 7 метров до 21 метра по длине судна попадает 80 % случаев швартовки судна.

В этой же главе произведена оценка взаимодействия кранцев прикладного устройства и многоадресной буксируемой системы.

Как правило буксируемые модули имеют различную массу, а следовательно и кинетическую энергию, в момент контакта с приемным

устройством. Так как смена амортизационной защиты в процессе работы не предусматривается, возникает потребность в оценке вероятности отказа средств амортизации, обеспечивающих приемку буксируемых модулей.

Отказом средств амортизации приемки многомодульных систем считается не только событие, в результате которого энергия принимаемого модуля превышает допустимую энергоемкость, но и если в процессе приемки будет превышено допусковое значение ускорения для данного модуля, в результате которого может происходить отказ аппаратуры, располагаемой в модуле.

Приводятся результаты расчета средств амортизации многомодульной системы с проверкой по допускаемой энергоемкости и ускорениям.

Эластичные кранцы ледоколов и ледокольно-транспортных судов используются при проводке методом "тандем".

Изменение сопротивления льда движению ледокола вызывает необходимость гашения кинетической энергии проводимого судна. Кинетическая энергия судна расходуется на деформацию кранцевого устройства ледокола и на образование дифферентов судна и ледокола на корму. Частично энергия судна передается ледоколу, что способствует дальнейшей ломке льда. Дифферент судна вызывает повышенный износ кормовых кранцев ледокола в случае, если их сдвиговые деформации не соответствуют перемещениям носовой оконечности судна относительно кранцев.

Систему дифференциальных уравнений движения ледокола и судна можно представить в следующем виде:

$$M_L \ddot{x}_L = N + Q_g - F \sin t, \quad (1)$$

$$J_L \ddot{\phi}_L + \left[ \frac{I_L}{2} + x_{rL} \right] Q_g + \left[ \frac{I_L}{2} - x_{rL} \right] F_v - \Delta_L N_L \phi_L = 0; \quad (2)$$

$$J_C \ddot{\phi}_C + \left[ \frac{I_C}{2} - x_{rC} \right] Q_g - \Delta_C N_C \phi_C = 0; \quad (3)$$

где  $N$  - усилие предварительного обжатия кранца, имеющее место при совместном движении судна и ледокола;  $Q_g$  - горизонтальная реакция кранца;  $F$  - приращение силы сопротивления ледового покрова движению ледокола во времени  $t$ ;  $x_L$  - ускорение, испытываемое ледоколом, вызванное приращением силы сопротивления  $F$ ;  $J_L$  - виртуальный момент инерции относительно горизонтальной

оси вращения ледокола  $u$ ;  $L_L$  - длина ледокола;  $x_{TL}$  - расстояние оси вращения ледокола от миделя при возникновении угла дифферента  $\phi_L$ ;  $\Delta_L$  и  $H_L$  - соответственно водоизмещение и продольная метacentрическая высота ледокола;  $Q_B$  - вертикальная составляющая реакции краевого устройства;  $J_C$  - момент инерции судна относительно горизонтальной поперечной оси;  $L_C$  - длина судна;  $x_{TC}$  - расстояние оси вращения судна от миделя при возникновении угла дифферента  $\phi_C$ ;  $\Delta_C$  и  $H_C$  - соответственно водоизмещение и продольная метacentрическая высота судна.

Результаты расчета взаимных перемещений и деформаций краевого устройства представлены на рис. I.

Анализ деформаций претерпеваемых краевой защитой ледокола показал, что она должна подбираться не только по характеристикам сжатия, но и по характеристикам сдвига, поскольку оба вида деформаций соизмеримы между собой.

Третья глава посвящена расчету деформативных элементов эластичных краев судового стационарного исполнения.

Определяющими при расчете судовых эластичных конструкций являются такие свойства резины и резноподобных материалов, как однородность, изотропность, несжимаемость, и упругость. Пластичность, релаксация напряжений, саморазогрев и др. несущественно влияют на работоспособность судовых изделий из эластичных материалов или совсем отсутствуют, поэтому в расчетах не учитываются. Эксплуатация судовых эластичных конструкций происходит в значительной временной продолжительности можно предполагать квазистатическую постановку задач о их деформировании. Ряд задач об облатии эластичных конструкций может быть рассмотрен с позиций статистики.

Анализ методов расчета эластичных краев стационарного исполнения, приведенный в начале третьей главы показал, что только к очень простым конструкциям могут быть применены аналитические методы, рассмотренные в работах Адамса Дж., Грина А., Ривлина Р., Томаса А., Димитрова С.И., Лавендела Э.Э., Васпринса Е.А. и др.

Сложность формы и взаимодействия эластичных средств судовой амортизации с реальными конструкциями предопределяли широкое распространение численных методов, основанных на вариационных принципах. Вариационная постановка задачи сводится к оценке стационарности функционала, в качестве которого часто

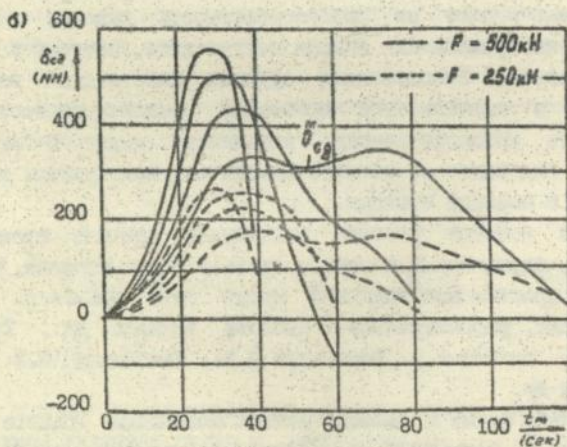
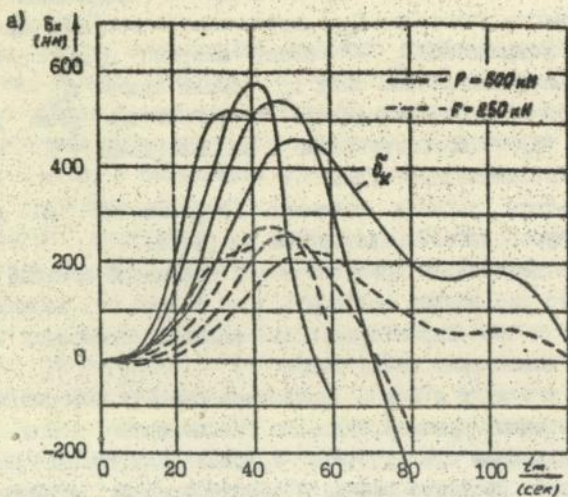


Рис. I Деформации краевого устройства

используется функционал потенциальной энергии. Наиболее универсальным среди численных методов является метод конечных элементов для несжимаемых материалов.

Таким образом в результате рассмотрения применяемых методов расчета эластичных конструкций в характерных для судовых условий диапазонах можно сделать вывод о соответствии метода конечных элементов и метода, предложенного Ю.Н.Коробановым проектным расчетом судовых эластичных кранцев стационарного исполнения.

Анализ эластичных судовых кранцев стационарного исполнения показал, что широкий класс из них принадлежит пустотелым конструкциям. На примере пустотелого деформативного привального бруса рассмотрена задача о сжатии его между жесткими параллельными плитами. Задача решается в рамках обобщенного закона Гука, материал считается изотропным.

Потенциальная энергия деформации срединной поверхности деформативного элемента на каждом из аппроксимированных дугами окружностей радиуса  $r_{i,j}$  участках может быть представлена в виде:

$$u_{i,j} = \frac{1}{8} \int_{\varphi_{k,j}}^{\varphi_{l,j}} \left[ m_{i,j}^2 + \frac{q_{i,j}^2}{f} - \frac{2m_{i,j}q_{i,j}}{fr_{i,j}} + \frac{4\alpha n_{i,j}^2}{f} \right] r_{i,j} d\varphi; \quad (4)$$

где в безразмерном виде представлены:  $m_{i,j}$  - изгибающий момент;  $q_{i,j}$ ,  $n_{i,j}$  - сжимающее и перерезывающее усилия;  $f$  - площадь сечения,  $\alpha$  - коэффициент распределения касательных усилий в сечении.

Деформативное состояние привального бруса было представлено в виде двух расчетных схем: с учетом перегиба срединной поверхности и без него.

Минимизация функционала потенциальной энергии деформации проведена с использованием процедуры Рунца.

Определение перемещений, вызванных воздействием усилия, можно выполнять, воспользовавшись теоремой Кастальяно:

$$\frac{\delta \sum_{i=1}^{i=n} u_{i,j}}{\delta F} = \delta. \quad (5)$$

Применение теоремы Кастальяно приводит к линеаризации задачи, так как потенциальная энергия деформации является функцией

независимых внешних сил и в конечном счете - однородной функцией второй степени от координат. Учесть нелинейность можно, применяя итерационную схему расчета.

Предложенный метод расчета пустотелых эластичных конструкций применим для сравнительно простой конфигурации деформативного элемента, позволяющей производить аппроксимацию срединной поверхности. Наличие трех и более перегибных участков резко усложняет расчетную процедуру. Проектные расчеты эластичных конструкций указанным методом должны строго соотносить количество участков, перегибных зон и шагов поэтапного нагружения эластичной конструкции.

Метод конечных элементов (МКЭ) является прямым вариационным методом.

Зависимости линейной теории упругости используемые в основе метода конечных элементов для несжимаемого материала имеют некоторые отличительные особенности. Материал считается статически деформируемым, однородным, изотропным, несжимаемым, линейноупругим. Используется обобщенный закон Гука.

Несжимаемость материала учитывается введением функции гидростатического давления:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z). \quad (6)$$

Вариационная формулировка задачи имеет вид:

$$\delta\Pi = 0.$$

Функционал  $\Pi$  принимает стационарное значение только тогда, когда искомые функции имеют истинные значения. Наиболее часто применяется функционал потенциальной энергии:

$$\Pi = G \int_V \left[ \frac{1}{4} (u_{,i} + u_{,i}) (u_{,i} + u_{,i}) + \alpha u_{,i,i} \right] dV - \int_{\Omega} p_i u_i d\Omega. \quad (7)$$

Минимизация функционала потенциальной энергии по возможным перемещениям узловых точек приводит к условиям равновесия, а по возможным значениям функции гидростатического давления - к условию несжимаемости, таким образом получается разрешающая система алгебраических уравнений:

$$\frac{\delta \Pi}{\delta u_i} = 0, \quad \frac{\delta \Pi}{\delta v_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_p;$$

(8)

$$\frac{\delta \Pi}{\delta a_j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, N_a;$$

где  $N_p$  - число узловых точек конструкции;  $N_a$  - число конечных элементов.

Метод был реализован при разработке блока программ на алгоритмическом языке "Фортран" для расчета эластичных судовых конструкций из несжимаемого материала.

Результаты решения задачи о деформировании монолитной конструкции были сравнены с аналогичными расчетами выполненными Э.Э.Лавендалом по МКЭ с использованием прямоугольных конечных элементов и расчетами по методу Ритца.

Значение сжимающей силы определялось как:

$$\frac{P}{G} = - \int_{-x}^x \sigma_y dx = 0,3494.$$

Сравнение результата с данными полученными при решении задачи по методу Ритца (где  $P/G = 0,359$ ) и по МКЭ с использованием прямоугольного конечного элемента ( $P/G = 0,329$ ) показывает, что рассмотренный вариант МКЭ с использованием составного четырехугольного элемента позволяет описывать сложные эластичные конструкции и получать достаточно точные результаты численных расчетов.

Оценке эффективности расчета судовых эластичных конструкций МКЭ посвящен последний раздел третьей главы.

Решение нелинейных задач о деформировании эластичных конструкций судовых устройств выполнялись пошаговым нагружением, где результаты одного шага служат исходными данными для другого.

Четвертая глава посвящена рекомендациям и общим вопросам проектирования эластичных кранцев стационарного исполнения. В первом разделе рассмотрены особенности проектирования привальных брусьев и кранцев шнурового исполнения. Покрываемые эластичными средствами амортизации поверхности часто имеют не только большую протяженность, но и ярко выраженную криволинейность. При контакте криволинейной поверхности с плоскими конструкциями по мере сжатия деформативного элемента

резко изменяется протяженность зоны контакта. Изменение протяженности зоны контакта изменяет его упругую характеристику и значения контактных давлений.

Анализ изменений зоны контакта при взаимодействии привального бруса, расположенного на криволинейной бортовой поверхности с плоским причалом основан на возможности аппроксимировать обводы судна и положение причала относительно него уравнениями вида:

$$\begin{cases} y = \varphi \left[ 1 - \left( \frac{x}{L_{hz}} \right)^\beta \right]; \\ y = -x \operatorname{tg} \alpha + a - \delta / \cos \alpha; \end{cases} \quad (9)$$

где

$$\varphi = \frac{B}{2} \left[ \frac{z}{T} \right]^{(1/\beta)-1};$$

$$\psi = \alpha_{nh} / (1 - \alpha_{nh});$$

$B$  - ширина судна, м;  $T$  - осадка судна, м;  $z$  - аппликата ВЛ на которой расположены средства амортизации от ОП;  $\beta$  - коэффициент полноты мидель-шпангоута;  $\alpha_{nh}$  - коэффициент полноты любой ВЛ в носовой части судна:

$$\alpha_{nh} = \alpha_n \left[ \frac{z}{T} \right]^{(\alpha_n / \delta_n) - (1/\beta)};$$

$\alpha_n$ ,  $\delta_n$  - коэффициенты полноты носовой части КВЛ и носовой части корпуса судна;  $L_{hz}$  - расстояние от мидель-шпангоута до носового перпендикуляра к рассматриваемой ВЛ, для наклонного форштевня:

$$L_{hz} = L_{hsvl} - \left[ 1 - \frac{z}{T} \right] \Delta L_{sv};$$

где  $\Delta L_{sv}$  - расстояние от носового перпендикуляра до точки пересечения форштевня с ОП.

Угол подхода судна к причальному сооружению  $\alpha$  предопределяет координаты точки их взаимного контакта. Если задать величину допускаемых деформаций привального бруса  $\delta$ , подставить в систему указанных уравнений, то решением системы являются координаты границ зоны контакта причала с деформативным элементом

привального бруса  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ . Протяженность зоны контакта определяется выражением:

$$l_k = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}; \quad (10)$$

Используя серию значений  $\delta$  в приведенной расчетной последовательности можно получить скорректированную (в функции от протяженности зоны контакта) упругую характеристику деформативного элемента привального бруса свойственную конкретному судну, рис.2.

Привальные брусья или кранцы эластичного исполнения расположенные на криволинейной поверхности могут вступать в контакт с жесткими криволинейными поверхностями другого судна, дебаркадера и пр. Такие же условия эксплуатации эластичных деформативных элементов могут наблюдаться например в случае когда шнуровые деформативные элементы защищают криволинейные участки судовой поверхности от соударения с криволинейными поверхностями корпуса глубоководного аппарата. В таких случаях аппроксимация формы контактирующих тел может быть произведена уравнениями для криволинейных судовых поверхностей, рассмотренными выше.

Пример расчета протяженности зоны контакта для двух однотипных судов показал, что по сравнению с протяженностью зоны контакта судна с прямолинейной причальной стенкой при одинаковой предельной деформации привального бруса сократилась с  $l_k = 4,89$  м до  $l_k = 3,67$  м.

Каждый вид крепления оказывает некоторое влияние на упругие характеристики амортизационной защиты. Результаты расчета различных вариантов крепления показаны на рис.3. На нем показаны упругие характеристики эластичного деформативного элемента трапецевидного сечения с габаритными размерами 120 x 120 мм в зависимости от вида крепления: кривая 1 - для крепления с использованием тавра; кривая 2 - для крепления с использованием шпилек; кривая 3 - для свободного деформативного элемента, сжимаемого между жесткими плитами; кривая 4 - экспериментальные данные для свободного деформативного элемента. Как видно разница в относительном усилии, вызывающем перемещение верхней кромки эластичного деформативного элемента на 0,04 м, составила соответственно 75 % и 50 % для крепления с использованием тавра и шпильки относительно свободно деформируемого деформативного элемента по экспериментальным данным. Упругая характеристика

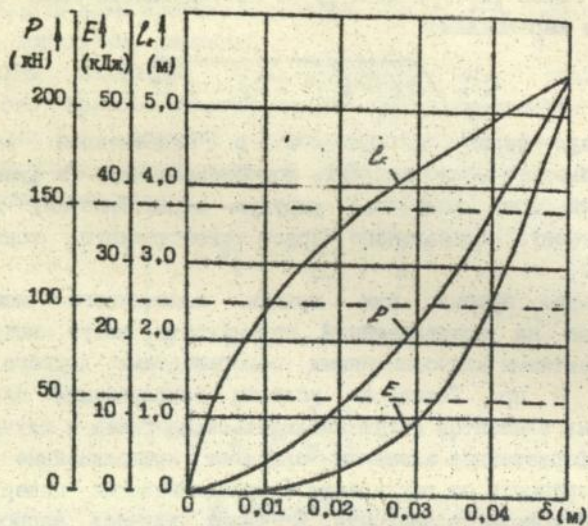


Рис.2 Откорректированная упругая характеристика

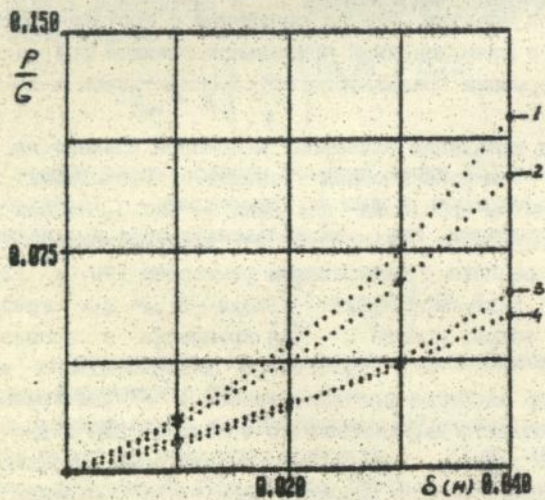


Рис.3 Упругие характеристики трапециевидного деформативного элемента

свободно деформируемого эластичного элемента, полученная экспериментально отличается от расчетного значения на 8 %, что говорит о достаточной точности расчетов. Результаты расчетов показали, что изменение упругой характеристики при смыкании внутренней полости под воздействием нагрузки может составить 25 - 30 % в зависимости от используемого вида крепления.

Эластичные деформативные элементы имеющие наружную поверхность (обращенную к объектам швартовки) в виде цилиндрических, эллиптических и др. тел вращения в процессе обжатия резко изменяют форму контактной зоны. Это обстоятельство вызывает перераспределение контактного давления, передаваемого на корпусные конструкции. Расчеты МКЭ в предположении плоско-напряженного состояния конструкции дают возможность построить диаграмму контактных давлений в зоне контакта, а так же определить ширину зоны контакта, рис.4.

Достоверность результатов расчета МКЭ зон контакта оценивалась таким критерием как ее ширина. Результаты расчета сравнивались с экспериментальными данными.

Анализ средств крепления деформативных элементов имеющих явно выраженную криволинейность к плоским корпусным конструкциям показал, что наиболее распространенным является расположение деформативных элементов в ложементах. Высота ложемента изменяется от 15 - 20 % высоты деформативного элемента до 50 %. В таком диапазоне были рассчитаны цилиндрические деформативные элементы сжимаемые плоской жесткой плитой. Упругие характеристики приведены на рис.5. Как видно из рисунка расхождение по сжимающему усилию при фиксированных деформациях может составлять 200-400 %.

Большое значение в процессе проектирования имеет оценка сдвиговой податливости деформативных элементов. Произведена качественная оценка надежности крепления цилиндрического деформативного элемента помещаемого в ложементы различной высоты определяя каким усилием, прикладываемым в поперечном направлении, вызываются деформации эластичного цилиндра. Результаты расчета показали, что поперечная жесткость цилиндрического деформативного элемента резко возрастает при высоте ложемента, составляющей 0,15 диаметра цилиндрической оболочки и выше.

Заключительный раздел четвертой главы посвящен рекомендациям по проектированию судовых эластичных кранцев стационарного

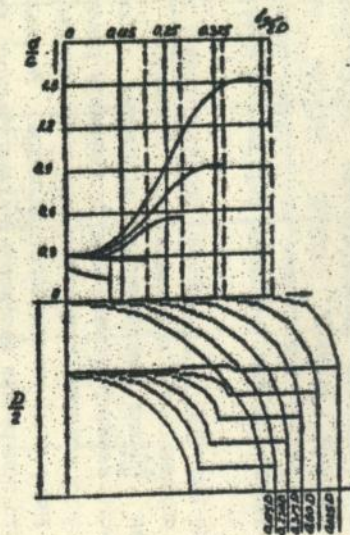


Рис.4 Диаграмма контактных давлений

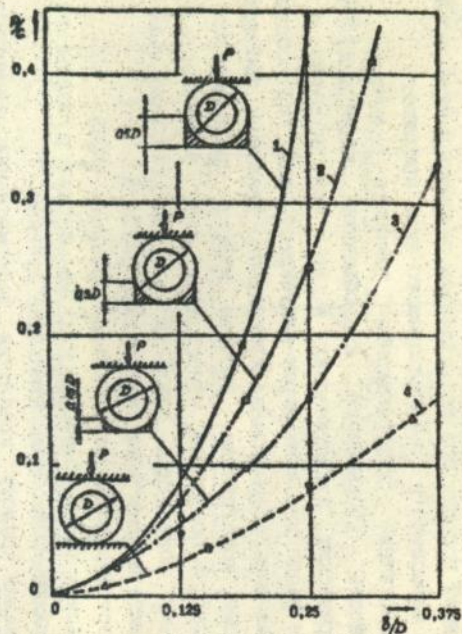


Рис.5 Упругие характеристики эластичной трубы расположенной в ложементах

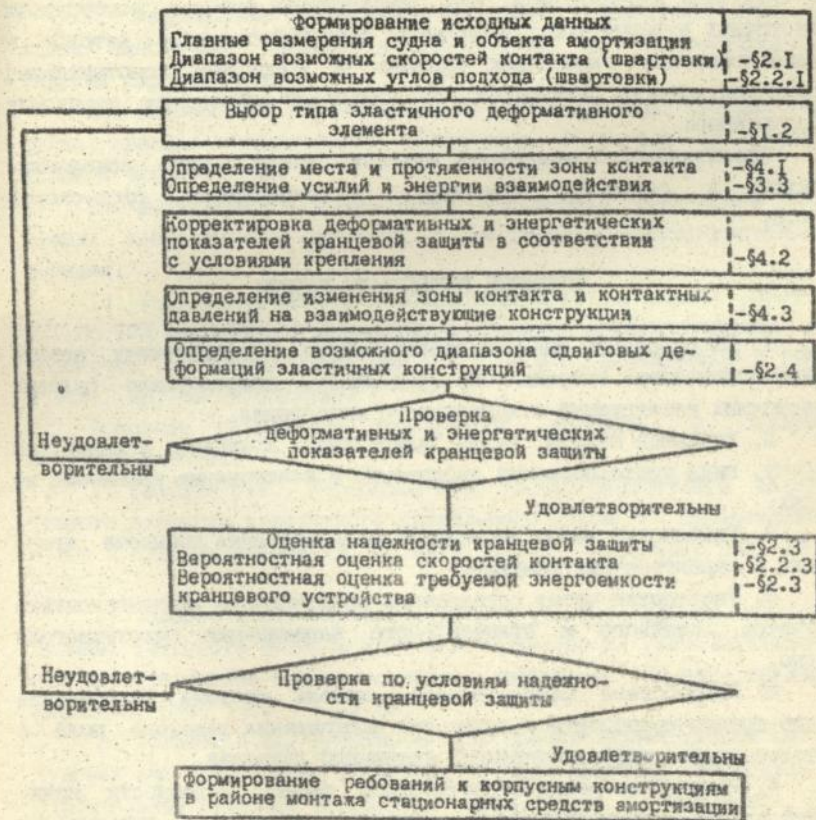


Рис.6 Блок - схема проектирования эластичных кранцев

исполнения.

Проектирование эластичных средств стационарной кранцевой защиты подразделяется на прямую и обратную задачи.

В число проектных задач как прямой, так и обратной входит совершенствование конструкций кранцевых устройств стационарного исполнения. Совершенствование судовых эластичных кранцев возможно по следующим направлениям: совершенствование формы и конструкции эластичных деформативных элементов; совершенствование методов и видов крепления эластичных кранцев к корпусным конструкциям; совершенствование схем размещения кранцевой защиты на корпусных конструкциях.

Проектирование эластичных кранцев стационарного исполнения следует в основном процедуре, представленной блок-схемой рис. 6.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основании анализа отечественных и зарубежных источников установлена актуальность детального исследования судовых эластичных конструкций стационарного исполнения.

2. Выполнен анализ видов эластичных кранцев, условий их работы, виды претерпеваемых деформаций и конструкции крепления на судах.

3. Разработан метод численного моделирования процесса свартовки с вероятностных позиций.

4. Разработан метод определения коэффициента эксцентриситета с учетом линейного и вращательного перемещения швартуемого судна.

5. Разработана математическая модель системы ледокольное судно-кранец-транспортное судно при прохождении ледового поля с использованием дифференциальных уравнений движения.

6. Разработан метод вероятностной оценки надежности кранцевой защиты многомодульных буксируемых систем при приемке их спускоподъемным устройством.

7. Выполнен анализ методов расчета эластичных кранцев с учетом многообразия их форм и условий эксплуатации.

8. Разработана математическая модель эластичной конструкции, построенная на энергетических соотношениях теории упругости с учетом перегибных и бесперегибных участков деформирования.

9. Выполнена реализация метода конечных элементов применительно к расчетам судовых эластичных конструкций, произведена оценка его эффективности.

10. Разработаны схемы расчетов эластичных кранцев с учетом их крепления и деформирования, произведена оценка контактных зон и контактных усилий на поверхности кранца.

11. Разработаны схемы учета пространственных деформаций судовых эластичных кранцев и определения их скорректированных упругих характеристик.

12. Разработаны рекомендации по проектированию судовых эластичных кранцев стационарного исполнения с учетом их реальных условий эксплуатации.

13. Достоверность результатов обоснована сравнением полученных теоретических решений с имеющимися экспериментальными данными.

14. Результаты работы использованы в хозяйственной работе № 2.1.Пр.173 выполненной совместно с проектно-конструкторским бюро "Прогресс", в госбюджетных НИР № 2.1.Пр.518, выполненной в 1991г. и № 2.1.Пр.783 выполненной в 1992 г.

Основные результаты диссертации изложены в следующих печатных работах:

1. Толшев Э.В., Коробанов Ю.Н. Расчет пустотелого деформативного элемента эластичного привального бруса // Проектирование судов и судовых устройств: Сб.науч.трудов - Николаев: НКИ, 1989 - с.38-47.

2. Толшев Э.В., Коробанов Ю.Н. К расчету судовых амортизационных устройств методом конечных элементов // Автоматизированное проектирование судов и судовых устройств: Сб.науч.трудов - Николаев: НКИ, 1990 - с.29-36.

3. Толшев Э.В., Коробанов Ю.Н. Оценка эффективности расчета судовых амортизационных устройств методом конечных элементов // Строительная механика корабля: Сб.науч.трудов - Николаев: НКИ, 1990 - с.48-52.

4. Коробанов Ю.Н., Толшев Э.В. К особенностям численного моделирования процесса швартовки // Проектирование судов и судовых устройств: Сб.науч.трудов - Николаев: НКИ, 1991 - с.41-44.

5. Толшев Э.В. К вопросу расчета швартовки судна к причалу // Проектирование судов и судовых устройств: Сб.науч.трудов - Николаев: НКИ, 1991 - с.38-40.

6. Толышев Э.В., Коробанов В.Н. Особенности проектирования средств амортизации многомодульных буксируемых систем // Проектирование средств освоения океана: Сб. науч. трудов - Николаев: НКИ, 1991 - с.17-21.

7. Коробанов В.Н., Толышев Э.В. Эффективность расчета судовых эластичных амортизационных конструкций стационарного исполнения методом конечных элементов // Девятая Дальневосточная конференция по мягким оболочкам. Тезисы докладов. Приморское краевое правление НТО имени акад. А.Н.Крылова - Владивосток, 1991 - с.67-68.

8. Спускоподъемное устройство судна для многомодульных буксируемых систем: А.С. 1736830 СССР / Коробанов В.Н., Короленко В.А., Толышев Э.В., Хлынов В.А.; Научно-производственный центр при Николаевском кораблестроительном институте и Проектно - конструкторское бюро "Прогресс" - № 4800567/II; Заявл. 11.03.90; Опубл. 30.05.92, Бюл. № 20.

465481

AB 27.682

**AB 27.682**