

МИНИСТЕРСТВО МОРСКОГО ФЛОТА СССР

**ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
ВЫСШЕЕ ИНЖЕНЕРНОЕ МОРСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ
АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА**

УДК 656.614.3.073.434:629.114

На правах рукописи

КАРПОВИЧ ЕВГЕНИЙ БОРИСОВИЧ

**РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКОЙ
ПЕРЕВОЗКИ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ**

Специальность 05.22.19

Эксплуатация водного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ленинград
1989

Работа выполнена в Центральном ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте морского флота.

Научный руководитель - К.Т.Н. Барановский М.Е.

Официальные оппоненты - д.т.н., профессор Аксютин Л.Р.

К.Т.Н., профессор Снопков В.И.

Ведущее предприятие - Азовское морское пароходство.

Защита состоится "17" апреля 1989 года в 10 ч на заседании специализированного Совета Д.101.02.02 при Ленинградском ордена Октябрьской Революции высшем инженерном морском училище имени адмирала С.О.Макарова по адресу: 199026, Ленинград, Косая линия, д. 15-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке училища.

Автореферат разослан "17" марта 1989 года.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес ученого секретаря совета ЛВИМУ: 199026, Ленинград, Косая линия, д. 15-а.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук,
доцент



В.А.Прокофьев.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение эффективности и качества работы морского транспорта при перевозках металлопродукции возможно в результате совершенствования технологии транспортировки, направленного на обеспечение безопасности перевозок, сохранности материальных ценностей, более полное использование грузоподъемности и вместимости транспортных средств.

Большие объемы перевозок металлопродукции, их широкая география, охватывающая все основные морские пути мира, недостаточная изученность транспортных характеристик и свойств металлопродукции неоднократно приводили к авариям морских судов из-за ее смещения, зачастую с тяжелыми последствиями.

Накопленный эмпирический опыт таких перевозок ещё не достаточно обобщен и систематизирован. В этой области рассмотрены лишь отдельные вопросы, что приводит, с одной стороны, к аварийным ситуациям в результате смещения груза, с другой - к чрезмерным расходам на его крепление. Все это потребовало выполнения специальных научных исследований с целью получения обоснованных физических представлений об особых свойствах металлопродукции, проявляющихся при её морской транспортировке.

Целью работы является разработка критерия высшего уровня безопасности при морской перевозке обширной категории грузов - металлопродукции, смещение которой наиболее опасно, а также методов его соблюдения на основе изучения свойств дискретных структур массивов, образующихся при погрузке на судно, и создания математических моделей их поведения в условиях морской перевозки.

Кроме того ставились задачи максимального сокращения затрат времени, труда и материалов на мероприятия, связанные с обеспечением несмещаемости металлопродукции, путем разработки необходимых и достаточных по условиям предстоящего плавания схем крепления.

Методика исследований основана на теоретическом анализе, на лабораторных, модельных и натурных испытаниях и современных методах анализа результатов на ЭВМ.

Новизна научных результатов, полученных автором, определяется введением в научный оборот классификации смещающихся грузов по их механическим моделям, в которой наряду с моделями абсолютно твердого тела и сплошной связно-сыпучей среды введена модель дискретной структуры, смещаемость которой зависит от порядка и способа укладки составляющих ее грузовых мест. Предложен критерий безопасности морской перевозки металлопродукции, все виды которой образуют дискретные структуры, учитывающий комплексное взаимное влияние характеристик груза на динамические характеристики судна, и последних на пределы устойчивости структуры груза. Такой подход на базе установления факторов и причинно-следственных связей, обуславливающих устойчивость структурообразующих грузов, позволил впервые разработать и предложить к практическому внедрению способы повышения устойчивости штабелей металлопродукции трех представительных видов до пределов, обеспечивающих соблюдение критерия несмещаемости. Один из способов повышения устойчивости штабелей - способ размещения связок арматурной стали в трюме судна - защищен авторским свидетельством № 640906 (в соавторстве).

Разработаны математические модели устойчивости структур и методика расчета критерия безопасности морской перевозки металлопродукции. Сравнительными расчетами по результатам экспериментальных рейсов обоснованы их корректность и надежность, обеспечивающие эффективность системы нормирования устойчивости судов по Правилам классификации и постройки морских судов Регистра СССР на единой методической основе с ними, а по уровню безопасности соответствующие принятому в Правилах критерию погоды.

Практическая ценность. Использование модели дискретной структуры при исследовании грузов позволяет отыскивать технические решения, которые повышают устойчивость массивов грузов до пределов, обеспечивающих безопасность их морской перевозки. Использование разработанного алгоритма и программы расчета критерия на микроЭВМ позволяет производить оптимизацию грузовых планов по критерию несмещаемости.

Реализация работы. Результаты исследований в полном объеме использованы при разработке девяти руководящих нормативных документов по безопасности морской перевозки различных видов

металлопродукции, в том числе: "Правила безопасности морской перевозки генгрузов. Часть 2. Специальные требования к перевозке генгрузов по категориям и группам. Металлопродукция. РД 31.11.21.23-82", "Карта технологического режима перевозки труб большого диаметра, в том числе с заводской наружной изоляцией. РД 31.11.21.31-85", "Карта технологического режима перевозки чугуна в чушках с применением несскользящих покрытий. РД 31.11.21.32-85", "Карта технологического режима перевозки профильного проката и стального листа РД 31.11.21.33-85", "Карта технологического режима перевозки труб малого диаметра. РД 31.11.21.41-87".

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и получили положительную оценку на заседании секции Ученого Совета ЦНИИ морского флота в 1977 году, на 15, 16, 17, 18 и 19 научно-технических конференциях ЦНИИ морского флота последовательно с 1975 по 1979 годы, а также на научно-технических советах Азовского, Черноморского, Северного и Балтийского морских пароходств в 1976 - 1987 годах в процессе рассмотрения и согласования проектов нормативных документов, разработанных по результатам исследований.

В полном объеме работа рассмотрена и одобрена на совместном заседании кафедры технологии перевозок и управления работой флота и кафедры управления судном ЛВИМУ им. адм. С.О.Макарова, в феврале 1989 года.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в восьми научных статьях, защищено авторским свидетельством на изобретение и отражено в 11 научно-технических отчетах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы из 96 наименований и 11 приложений.

Работа содержит 205 страниц, в том числе: 148 страниц основного текста, 10 таблиц, 38 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой задачи, излагается цель работы и раскрыто ее основное содержание. Отмечено, что проблемам обеспечения безопасности морских перевозок смещающихся сухогрузов (генеральных и навалочных) посвящены работы А.Н.Крылова, Л.Р.Аксюткина, М.Е.Барановского, М.Н.Гаврилова, В.И.Снопкова, В.Е.Стецюка и других авторов.

В первой главе выполнен анализ номенклатуры и транспортных характеристик металлопродукции, показаны ее объем и относительная доля в перевозках сухогрузов, отмечена устойчивая тенденция к возрастанию обоих показателей.

К транспортным характеристикам, определяющим условия морской перевозки металлопродукции, отнесены прежде всего масса, форма и габариты грузовых мест, степень устойчивости формы последних при восприятии внешних нагрузок, а также удельный погрузочный объем (УПО), занимаемый единицей массы в грузовом помещении судна.

Показано, что многообразие видов металлопродукции, большой диапазон габаритных размеров и УПО, различия в устойчивости формы и в жесткости восприятия внешних нагрузок дают основание предполагать неоднозначность их поведения в условиях морской перевозки.

Обобщены и систематизированы отечественная и зарубежная практика перевозок металлопродукции, различные технические решения, направленные на обеспечение безопасности ее морской перевозки. При анализе известных случаев аварийного смещения различных видов металлопродукции, приведших в том числе и к гибели ряда судов, установлено, что имеет место смещение не отдельного грузового места, а всего массива или его значительной части. Системы найтовов, не обеспечившие несмещаемость грузов, отличаются креплением не каждого отдельного грузового места, а их значительных массивов, неизвестные свойства которых опасно проявляются в условиях морской перевозки.

Анализ предшествовавших нормативов по технологии перевозки показал, что часть из них относится к грузам, которые специальными технологическими приемами могут быть приведены в состояние абсолютно твердого тела, после чего оно находится на судне под действием определенных сил, не зависящих от его свойств. Размещение и крепление таких грузов производится в индивидуальном порядке путем соединения найтовыми с конструкциями корпуса судна.

Значительная группа нормативов относится к грузам, состоящим из отдельных более или менее крупных и однородных частиц - зерновым и навалочным, изучение процессов смещения которых показало, что они образуют на судне сплошную связно-сыпучую среду с постоянными или закономерными и непрерывно

изменяющимися физическими и механическими свойствами, условия смещения которой зависят от прочностных свойств груза.

Остальные нормативы применяются при перевозках ящиков, бочек, пакетов, связок и других грузов, состоящих из отдельных стандартных или однотипных грузовых мест. Здесь основным требованием является создание компактного и плотного каравана с возможно ровной поверхностью - монолитного массива, к которому применимы методы, отработанные при креплении абсолютно твердого тела. При определении усилий, воспринимаемых стендэлями при перевозках лесных грузов на палубе, в свою очередь применена модель, отработанная на навалочных грузах - с использованием угла естественного откоса.

При нормировании морской перевозки металлопродукции особо подчеркивается необходимость тщательного крепления груза от сдвига в условиях качки. Однако, рекомендуемые схемы крепления ориентированы в основном на удобство грузовых работ, а не на обеспечение безопасности судна. При внешней завершенности эти схемы не учитывают некоторые внутренние свойства массивов металлопродукции, неоднократно проявлявшиеся при смещении в процессе морской перевозки.

Различные виды металлопродукции имеют одно общее свойство: они представляют собой стандартные грузовые места, и при размещении на судне создают массивы, со свойствами, зависящими не только от характеристик отдельных грузовых мест, но и от порядка, очередности, способа их укладки, т.е. от их структуры.

Таким образом, между двумя общепризнанными моделями абсолютно твердого тела и сплошной связно-сыпучей среды, из которых для первой характерна независимость условий смещения от внутренних свойств груза, а для второй - прямая зависимость от них, можно поместить третью модель - дискретную структуру. Условия ее смещения зависят не только от свойств грузовых мест, но и от порядка, в котором они уложены, размеров структуры и условий размещения груза (с опорой на судовые конструкции или без) (рис.1.).

Особое место среди грузов, образующих дискретные структуры, занимают различные виды металлопродукции, одни из них - как требующие упорядоченной укладки, другие - как несоздающие сплошной связно-сыпучей среды вследствие значительных размеров частиц и ограниченности числа контактов между ними.

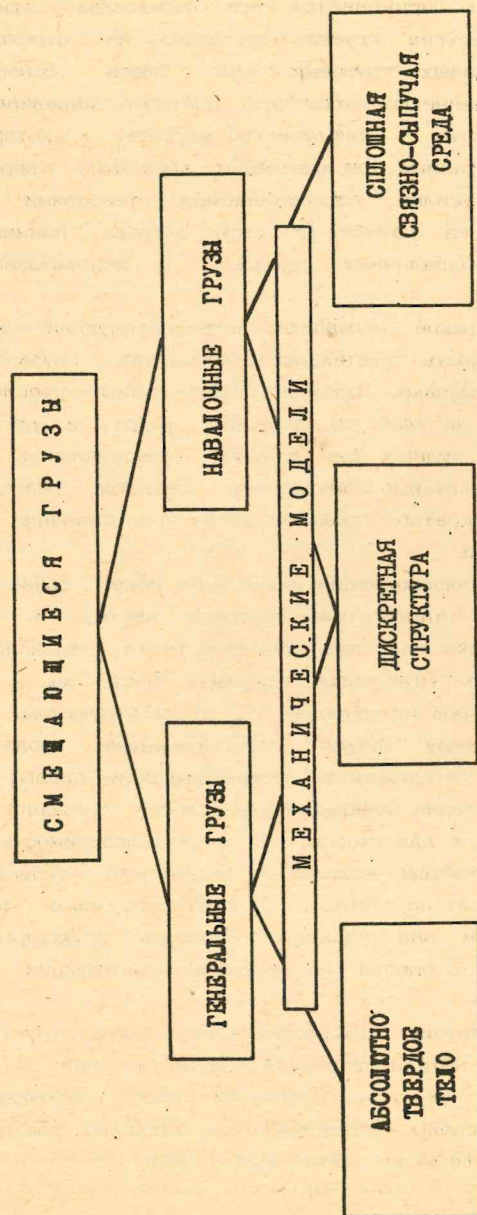


Рис. 1. Классификация смещающихся грузов по механической модели.

Во второй главе выполнена разработка критерия безопасности морской перевозки металлопродукции и методических основ его определения. В качестве объекта исследования выбраны структуры, образуемые тремя наиболее представительными по объемам перевозок (более 1 млн.т/год) видами металлопродукции: из жестких - трубами, перевозимыми поштучно, из деформируемых - арматурной сталью в связках, из навалочных - чугуном в чушках. Кроме того эти виды перекрывают весь диапазон возможных значений удельного погрузочного объема металлопродукции.

Показано, что стальные трубы обладают высокой устойчивостью формы и жесткостью восприятия внешних нагрузок. Это позволило принять в качестве теоретической модели абсолютно твердые трубы одного диаметра, контактирующие в штабеле по всей своей длине с постоянным коэффициентом трения. Тогда условия взаимодействия труб не зависят от их длины, т.е. достаточно рассмотреть структуру плоского поперечного сечения штабеля.

Необходимым условием взаимодействия труб в штабеле является наличие точек контактов, которые можно разделить на рабочие и нерабочие (контакты касания). К рабочим отнесем такие, в которых возникают реактивные силы, определяющие устойчивость трубы в пространстве.

Изучение структуры штабеля с закрепленным от раскатывания нижним ярусом труб в условиях статического наклонения показало, что ее разрушение происходит в виде потери устойчивости формы боковой поверхности штабеля (рис.2). Это позволило в качестве модели явления принять потерю устойчивости стержня при продольном сжатии, описываемую формулой Эйлера

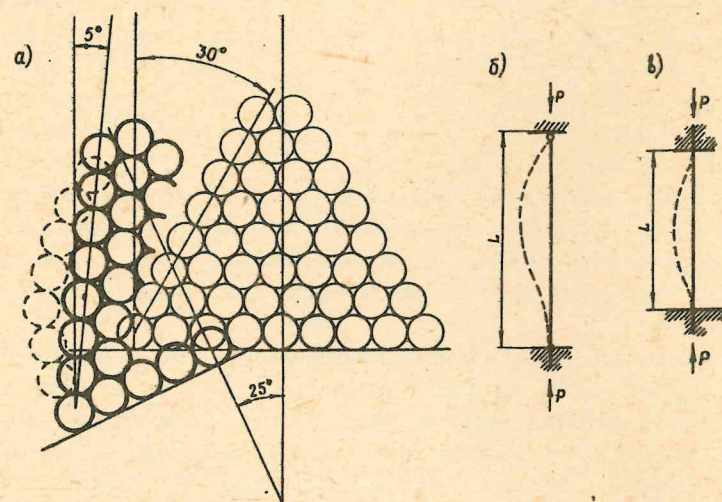
$$P_k = \pi^2 \frac{E J_{\min}}{[\mu l]^2}, \quad (1)$$

где P_k - критическая сила;

$E J_{\min}$ - жесткость стержня;

μl - приведенная длина стержня.

Эта формула дает надежную количественную оценку явления для сплошного стержня. В случае с трубами стержень состоит из нескольких твердых кругов, следовательно имеет переменное сечение с разрывами по длине и не воспринимает растягивающие нагрузки, т.е. обладает жесткостью и упругостью лишь при сжатии.



- — трубы в штабеле без крена;
- — трубы в штабеле, наклоненном на 25° ;
- — трубы в момент начала разрушения боковой поверхности.

Рис. 2. Потеря устойчивости формы боковой поверхностью штабеля труб.

Установлено, что условием формирования штабеля труб является закрепление нижнего яруса от раскатывания, а разрушение его структуры при статическом наклоне происходит в виде потери устойчивости его боковой поверхности.

Определено, что штабель, формируемый путем упорядоченной укладки вдоль судна длинномерных пакетов профильного проката, в частности связок прутков арматурной стали, в поперечном сечении представляет собой дискретную структуру, состоящую из отдельных связок, получаемых в результате обвязки большого числа абсолютно твердых (в рамках решаемой задачи) прутков.

Для связки характерна весьма ограниченная жесткость. Под действием сжимающих и сдвигающих нагрузок она испытывает пластические деформации в виде сжатия, сдвига или перекатывания, сопровождающиеся увеличением объема, в плоской задаче — площади и периметра. Следовательно, жесткость связки определяется, в первую очередь, прочностью увязочных средств, а ее деформациям предшествуют деформации обвязочных материалов.

Связка, первоначально имеющая круглую форму поперечного сечения, при размещении на плоском горизонтальном основании под действием силы тяжести изменяет форму, приобретая плоский участок в зоне контакта с основанием. При наклоне основания происходит смещение отдельной связки путем ее скатывания, соскальзывания или перекатывания. Вид смещения зависит от соотношения коэффициентов трения (углов трения) внутри связки и между связкой и основанием.

Разделение ярусов в штабеле поперечными деревянными прокладками в целях обеспечения застропки при выгрузке позволяет выделить поверхностный ярус связок и проанализировать три возможных варианта поведения структуры при ее наклоне в зависимости от вида смещения отдельной связки. Такой анализ показал, что независимо от вида начального смещения отдельной связки, т.е. от соотношения углов внутреннего и внешнего трения, общей закономерностью является потеря устойчивости формы поверхностного яруса, начинающаяся с вытеснения одной или нескольких связок и заканчивающаяся обрушением всех связок яруса.

Показано, что для модели дискретной структуры характерна зависимость условий смещения не только от внутренних свойств отдельных грузовых мест, но и от порядка их взаимодействия,

размеров структуры, условий размещения груза (с опорой на судовые конструкции или без нее) и т.д., что особо было выявлено при исследовании штабеля чугуна в чушках. Наличие в массиве груза чушек с большим углом наклона к основанию создает вертикальные и горизонтальные контактные связи, формирующие пространственную структурную решетку штабеля. По мере увеличения штабеля и высоты его опирания на борта судна, сопровождающихся ростом нагрузок в точках контакта между чушками, начиная с некоторой высоты возрастает структурная устойчивость штабеля. Установлено, что в качестве измерителя такой устойчивости можно использовать острый угол θ между горизонтальной плоскостью и основанием штабеля при его наклоне в момент потери устойчивости в результате перераспределения нагрузок и обрыва контактов отдельных чушек или нижних чушек и настила.

Характер влияния динамических нагрузок на явление потери устойчивости рассмотренных структур и способы его учета могут быть реализованы критерием безопасности морской перевозки в виде отношения факторов предельного сопротивления смещению к смещающим груз факторам. В качестве обобщающего измерителя способности массива груза противостоять смещению предложено принять угол предельной устойчивости структуры θ_c , острый угол между горизонтальной плоскостью и наклоняемым основанием структуры в момент начала её разрушения (потери устойчивости).

Смещающие груз факторы в обобщенном виде отражают влияние условий взаимодействия элементов системы море - судно - груз. Одним из решающих среди них является принимаемая к учету модель динамических воздействий на груз при морской перевозке. При нормировании она должна учитывать возможность сочетания наихудших ситуаций, поэтому в качестве нормативной для каждой структуры будем выбирать одну из двух принятых моделей, из которых каждая основана на учете резонансной бортовой качки в положении судна без хода лагом к волнам. Одна из моделей дополнительно учитывает нагрузки от участия судна в орбитальном движении частиц воды. Другая - вместо орбитального движения дополнительно учитывает увеличение угла крена от динамически приложенного кренящего момента от действия ветра, в результате чего судно получает максимальный, так называемый динамический крен.

Определение динамического крена основано на условии равенства работ моментов сил, действующих на судно, и описывается нелинейным дифференциальным уравнением

$$(A + \mu_{44}) \ddot{\nu} + \lambda_{44} \dot{\nu} + D l(\nu) = M_p^t - A \ddot{a}_m, \quad (2)$$

где A - момент инерции массы судна относительно центральной продольной оси;

μ_{44} - коэффициент присоединенной массы;

$\nu = \theta - a_m$ - амплитуда качки относительно поверхности волнового склона;

θ - амплитуда качки в абсолютных координатах;

λ_{44} - коэффициент демпфирования;

D - водоизмещение;

$l(\nu)$ - плечо динамической остойчивости;

M_p^t - кренящий момент от давления ветра.

Решение уравнения (2) в абсолютных координатах

$$D l_d = D l_d + M_p^{\max} (\theta_m + \theta_{\text{дин}}), \quad (3)$$

представляет основу для расчета наибольшего динамического крена $\theta_{\text{дин}}$, реально достигаемого в нормальных эксплуатационных условиях при неповрежденном корпусе судна.

Уравнение (3) легко решается относительно $\theta_{\text{дин}}$ путем графического построения на диаграмме динамической остойчивости или аналитически

$$\theta_{\text{дин}} = \frac{l_d - l_m}{l_{\text{max}}} - \theta_m. \quad (4)$$

Учет $\theta_{\text{дин}}$ при расчете ускорений, вызывающих смещение груза, задает достаточно жесткие условия при существенной доле ветрового кренящего момента, что имеет место при качке высокобортных судов или судов с палубным грузом с большой площадью парусности и низкой остойчивостью. Для судов же с минимальным надводным бортом и значительной остойчивостью более жестким является учет в дополнение к нагрузкам от расчетной амплитуды бортовой качки θ_m вертикальных динамических нагрузок от орбитального движения судна.

Устойчивость массивов металлопродукции, размещенных в грузовых помещениях судов, предпочтительно обеспечивать до предельного динамического угла крена, выдерживаемого судном при фактическом варианте загрузки (угла опрокидывания). В этом

случае наличие груза на борту не ухудшает положение судна при аварийном крене, не связанном с грузом.

Целесообразность применения такого высокого предела необходимо рассматривать при разработке методов укладки и крепления грузов в грузовых помещениях с учетом их экономичности и технической исполнимости. Однако в любом случае угол предельной динамической устойчивости θ_c структуры груза, рассчитанный с учетом орбитального движения, не должен быть меньше амплитуды бортовой качки судна θ_m .

Устойчивость же грузов, размещенных на верхней палубе и крышках грузовых люков, следует обеспечивать лишь до угла динамического крена, соответствующего фактическому варианту загрузки судна, и району предстоящего плавания. Тогда при получении аварийного крена, превышающего это значение, будет существовать возможность сброса палубного груза с целью получения запаса плавучести и остойчивости для вывода судна из аварийного состояния.

Оба эти условия можно записать в виде критерия устойчивости структурообразующего груза

$$\lambda_c = \frac{\theta_c}{\theta_m (\text{дин})} \geq 1. \quad (5)$$

Расчет амплитуды качки θ_m или угла динамического крена $\theta_{\text{дин}}$ производится по Правилам Регистра, или по любой другой методике, учитывающей мореходные качества судна конкретного типа.

Выполнена разработка математических моделей предельной динамической устойчивости структуры каждого отдельного вида груза и методов её повышения до значений, обеспечивающих соблюдение критерия устойчивости.

Для обеспечения несмещаемости груза труб большого диаметра при их перевозке на верхней палубе следует учитывать комплекс факторов, последовательно исключаящих: качение труб нижнего яруса, их выпадение из боковой поверхности штабеля, выкатывание из верхнего яруса под действием сил инерции, зависящих от показателей остойчивости, количества груза, площади парусности, района предстоящего плавания.

Можно представить, что крайняя верхняя труба в штабеле находится на плоскости, установленной под углом 30° к горизонту (из геометрии структуры штабеля - рис. 3). Условием её

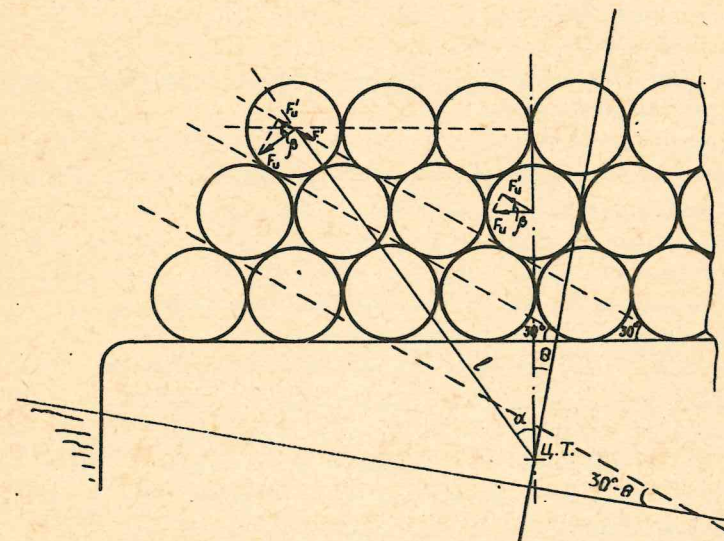


Рис.3. Штабель труб в условиях бортовой качки

предельного равновесия является равенство силы, необходимой для удержания трубы на наклонной плоскости, и силы инерции, возникающей при качке и стремящейся выкатить трубу из её места в штабеле вверх по наклонной плоскости. С увеличением угла крена наклон этой плоскости к горизонту уменьшается до значения $(30^\circ - \theta)$.

С учетом этих условий математическая модель предельной динамической устойчивости структуры штабеля труб на верхней палубе получена в виде

$$\frac{\theta}{\sin(30^\circ - \theta)} = \frac{g T^2}{4 \pi^2 l \cos(30^\circ + \alpha)}, \quad (6)$$

где g - ускорение свободного падения;

T - период бортовой качки;

l - расстояние от центра тяжести трубы до оси вращения судна при бортовой качке;

α - угол между вектором l и диаметральной плоскостью судна.

Показано, что изменяя характер загрузки судна: уменьшая число ярусов труб в штабеле, повышая или понижая метacentрическую высоту путем приема балласта и тем самым изменяя период бортовой качки и, следовательно, силы инерции, можно в значительных пределах варьировать величинами θ_c и $\theta_{\text{дин}}$ добиваясь удовлетворения критерию устойчивости λ_c .

Для обеспечения несмещаемости штабеля длинномерных пакетов профильного проката следует принять меры, исключающие качение связок и потерю устойчивости формы его поверхности. Тогда угол предельной динамической устойчивости θ_c штабеля профильного проката будет зависеть от характеристик остойчивости и района предстоящего плавания судна, определяющих динамику его качки, а также от коэффициента k относительной прочности системы крепления поверхностного яруса штабеля, значение которого должно обеспечить соблюдение критерия λ_c .

В этих условиях математическая модель предельной динамической устойчивости структуры штабеля профильного проката получена в виде

$$\sin \theta + \frac{4 \pi^2}{g T^2} \theta z - f \left[\cos \theta - \frac{4 \pi^2}{g T^2} (\theta y + r_0 \cos \theta) \right] - k = 0, \quad (7)$$

где f - коэффициент трения скольжения связок (пакетов) поверхностного яруса по деревянным прокладкам;

y, z - координаты ц. т. наиболее напряженного узла структуры относительно ц. т. судна с грузом;

r_0 - полувысота волны;

k - коэффициент относительной прочности системы крепления

$$k = \frac{R}{n p}, \quad (8)$$

где R - разрывная прочность системы найтовов;

n - число связок, охватываемых найтовами,

Решая (7) относительно θ при фиксированных k получаем значения θ_m , удовлетворяющие критерию устойчивости λ_c .

Подставляя в (7) расчетное значение амплитуды бортовой качки θ_m и решая его с учетом (8) относительно R :

$$R = n p \left[\sin \theta + \frac{4 \pi^2}{g T^2} \theta z - f \left[\cos \theta - \frac{4 \pi^2}{g T^2} (\theta y + r_0 \cos \theta) \right] \right], \quad (9)$$

получаем минимальную прочность системы найтовов, обеспечивающую удовлетворение критерию устойчивости λ_c .

Поскольку по условиям погрузки высота штабеля чугуна в чушках у бортов меньше чем в центральной части, а вертикальные ускорения на бортовой качке упрочняют зону штабеля у пониженного борта, то их исключение не приводит к снижению уровня безопасности. В этих условиях математическая модель предельной динамической устойчивости структуры штабеля чугуна в чушках получена в виде

$$\sin \theta + \frac{4 \pi^2}{g T^2} \theta z - f \left(\cos \theta - \frac{4 \pi^2}{g T^2} r_0 \cos \theta \right) = 0, \quad (10)$$

Используя фиксированные значения коэффициентов трения f чугуна по определенным видам подстилающих поверхностей можно вычислить значения θ_m , удовлетворяющие критерию устойчивости λ_c при различных материалах настилов грузовых помещений.

При высоте штабеля, с которой начинается увеличение его устойчивости, вместо коэффициента трения f чугуна по подстилающей поверхности можно применять коэффициент статической устойчивости штабеля на металлическом настиле κ , зависящий от высоты H его опирания на борта судна:

$$\kappa = \lg \theta_{\text{пр}} = \Phi(H) \quad (11)$$

Таким образом, для различных видов структур, образуемых грузами при их размещении на судне, вводится единый показатель, обобщающий факторы предельного сопротивления смещению, - угол предельной динамической устойчивости, до которого

обеспечивается несмещаемость структурообразующего груза с учетом мер, принятых для повышения устойчивости структуры.

Многовариантная натурная проверка результатов теоретических исследований характеристик и свойств дискретных структур, образуемых габаритными и массивными грузовыми местами металлопродукции, весьма затруднительна, поэтому особое внимание было уделено лабораторным исследованиям физических моделей грузов, полностью подтвердившим обоснованность математических моделей и позволившим уточнить зависимости и коэффициенты трения и устойчивости.

Лабораторные исследования устойчивости боковой поверхности штабеля труб без найтовов и с найтовыми, в статике и в динамике, без боковой нагрузки и с нагрузкой не только подтвердили обоснованность принятой математической модели, но и позволили определить необходимую относительную прочность системы крепления, обеспечивающую динамическую устойчивость штабеля (рис. 4).

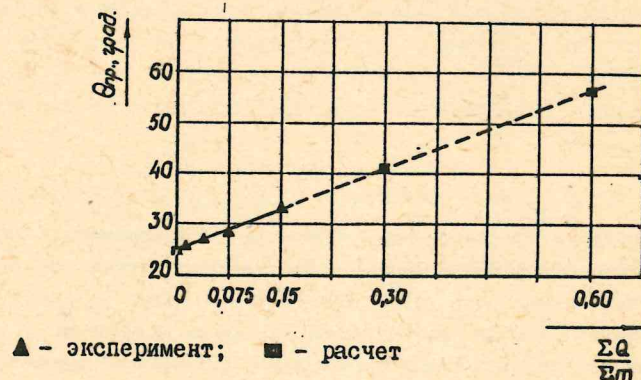


Рис. 4. Угол предельной устойчивости штабеля труб в зависимости от удельной нагрузки

Из графика видно, что создание удельной нагрузки в 0,3 массы штабеля повышает его устойчивость до качки с амплитудой 41° , которая значительно выше максимальных возможных значений углов динамического крена судов с грузом труб большого диаметра в трюмах и на верхней палубе, определяемых по Правилам Регистра. Следовательно величина 0,3 массы штабеля может быть принята в

качестве основы при расчетах прочности системы крепления штабеля труб на верхней палубе судов.

Модельная проверка эффективности способов повышения устойчивости поверхности штабеля профильного проката показала, что размещение поперек штабеля от борта до борта пакетов, закрепленных за связки внутренних ярусов, повысило устойчивость поверхности до угла наклона 80° . Разделение поверхностных ярусов на три блока в соответствии с изобретением по авторскому свидетельству № 640906 обеспечивало устойчивость до 60° , после чего обрушались связки в пределах, ограниченных найтовыми у пониженного борта, при сохранении устойчивости остальной поверхности штабеля.

Лабораторные и натурные исследования смещаемости чугуна в чушках в порту и на судах показали совпадение зависимости угла предельной устойчивости штабеля на металлическом настиле от его высоты как для модели груза, так и для натуральных чушек. Это позволило построить график зависимости угла предельной статической устойчивости штабеля чугуна по аргументу высоты штабеля, выраженной в высотах чушек n (рис. 5).

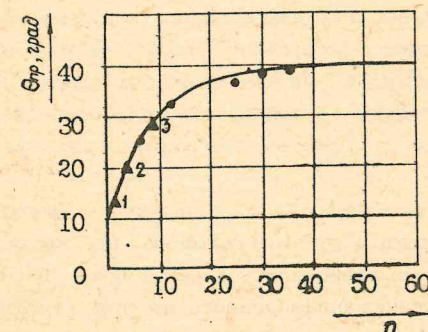


Рис. 5. Углы предельного равновесия чушек и модели на металлическом настиле

1 — одна чушка; 2 — слой высотой в 4 чушки;
3 — слой высотой в 9 чушек; . — модель груза в лаборатории.

По условиям натурных испытаний и масштабу модельных экспериментов приведенная зависимость может быть распространена на суда шириной до 21 метра.

Исследование характера поведения тонкого слоя чугунных чушек в зависимости от вида подстилающей поверхности позволило отметить, что наиболее надежно обеспечивают несмещаемость деревянная решетка (клетка), создающая в нижнем слое ершистую структуру, препятствующую смещению верхних слоев груза, и рулонные материалы рубероид и бризол, повышающие устойчивость до углов 35° и 38° градусов соответственно.

В третьей главе приведены методика организации и результаты экспериментальных рейсов морских транспортных судов с целью проверки представлений о характере смещения груза, полученных по результатам исследований теоретических и лабораторных моделей, замера количественных характеристик устойчивости структур, образуемых грузом на судне, подтверждение необходимости и достаточности мер, принимаемых для обеспечения его несмещаемости.

В двух рейсах на т/х "Джанкой" с трубами большого диаметра характер изменения нагрузок в поперечных найтовах при бортовой качке показал, они не зависят от угла крена. В то же время нагрузки в продольных найтовах, заводимых внахлест поперечных, были пропорциональны углу крена на соответствующий борт, но по абсолютной величине чрезвычайно малы, что при достигнутых значительных амплитудах до 18° свидетельствует о достаточной внутренней структурной устойчивости штабеля и подтверждает создание необходимых реакций в критических точках структуры штабеля.

Проверка эффективности крепления поверхности штабеля пакетированного проката путем повышения ее жесткости поперечно уложенными пакетами проводилась в рейсе п/х "Василий Головин". Специальным маневрированием удалось достичь амплитуды бортовой качки в 17° . Изменений в состоянии груза обнаружено не было.

Высокая эффективность обеспечения несмещаемости чугуна в чушках путем покрытия металлических палуб нескользящими материалами была подтверждена в экспериментальном рейсе т/х "Сванетия". До начала погрузки на металлический настил верхнего твиндека № 1 (продолжение верхней палубы) от борта до борта нанесли нескользящие покрытия шести видов в форме полос шириной

2 м с расстоянием между ними по 0,5 м. Экспериментальные штабели (гряды трапециевидной формы высотой 0,7 м) поверх полос покрытий формировали с применением металлических ковшей и вручную силами бригады портовых рабочих.

Для наблюдения за поведением судна и груза была установлена измерительно-регистрирующая и сигнальная аппаратура. Задачей экспериментального рейса было получение амплитуд качки, приводящих к смещению исследуемой части груза. Этого удалось добиться маневрированием на периферии мощного тропического циклона. Сигнализация о произошедшем смещении исследуемой части груза чугуна в чушках сработала при амплитуде бортовой качки 29° . Заметного крена судно не получило и легло на курс в порт назначения. Осмотром состояния груза было установлено смещение груза по металлическому настилу и клеевым покрытиям. Смещения чугуна по рубероиду и бризолу обнаружено не было.

Исследование влияния критерия устойчивости на провозную способность было выполнено при разработке Типового плана загрузки судна типа "Скульптор Коненков" трубами большого диаметра. Расчеты выполнялись на микроЭВМ "Commodore" по специальной программе на языке Бейсик. При многофункциональной зависимости критерия λ_0 результаты расчетов показали, что наибольшей корреляцией с ним обладает значение УПО груза.

Нормирование условий несмещаемости каждого отдельного вида металлопродукции осуществлялось путем изложения технологии реализации технических решений, повышающих устойчивость штабелей до необходимых пределов, и методик расчета показателей, обеспечивающих удовлетворение критерию безопасности.

Показана экономическая эффективность внедрения результатов исследований на примере перевозок длинномерного профильного проката на судах АМП.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Показано, что все виды металлопродукции на судне образуют массивы, обладающие свойствами, которые отличаются от свойств составляющих их грузовых мест и опасно проявляются в условиях морской перевозки вызывая смещение груза.

2. Впервые разработана классификация смещающихся грузов по механической модели, включающая, наряду с известными моделями абсолютно твердого тела и сплошной сыпучей среды, новую - дискретной структуры. При этом показано, что смещаемость

структуры зависят не только от свойств грузовых мест, но также и от порядка и способа их укладки.

3. Исследованы теоретические модели дискретных структур, образующихся в результате формирования на судне штабелей металлопродукции при упорядоченной укладке как жестких, так и деформируемых грузовых мест, а также при погрузке навалом. На примере трех представительных видов металлопродукции выявлена общая модель смещения - потеря устойчивости структуры.

4. Разработаны нормирующий критерий безопасности морской перевозки грузов, образующих дискретные структуры - критерий устойчивости, как отношение угла предельного динамического равновесия структуры штабеля к углу динамического крена (амплитуде качки) судна, соответствующего его фактической загрузке, и методики его расчета для трех представительных видов металлопродукции.

5. На базе разработанного программного обеспечения для персональных ЭВМ проанализировано влияние критерия устойчивости высококубатурного вида металлопродукции (труб большого диаметра на верхней палубе) на характеристики загрузки судна. Выявлена высокая степень корреляции критерия устойчивости груза и его удельного погрузочного объема.

6. Разработаны, исследованы в лабораторных и натурных условиях и внедрены в практику работы флота способы повышения устойчивости рассмотренных структур штабелей до пределов, обеспечивающих соблюдение критерия безопасности в условиях морской перевозки, путем наложения связей, предотвращающих потерю устойчивости в наиболее вероятных точках. На способ размещения связок арматурной стали в трюме судна получено авторское свидетельство № 640906 (в соавторстве).

7. Подтвержденный экономический эффект от внедрения в пароходствах Минморфлота разработанной технологии морской транспортировки металлопродукции исследованных видов составил более 2,5 млн. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих печатных работах автора:

1. Исследование устойчивости штабеля труб. Труды ЦНИИ морского флота, Л.: Транспорт, 1977, вып.225, с. 52-55.

2. Статическое давление штабеля труб на опорную поверхность. Труды ЦНИИ морского флота. Л.: Транспорт, 1978, вып.235, с.58-63.

3. А.С. 640906. Способ размещения связок арматурной стали в трюме судна. Соавторы Барановский М.Е. и Войнаровский Ю.М. - Опубл. в Б.И. № 1, 1979.

4. Организация экспериментальных рейсов со смешивающимися грузами. - В кн.: Технология морской перевозки грузов. - Л. Транспорт, 1984, с. 45-51. (ЦНИИМФ).

5. Основы безопасной перевозки металлопродукции на морских судах. М., 1984, с.1-10 (Технология морских перевозок. Экспресс - информация, В/О "Мортехинформреклама"; вып.4(126)).

6. Классификация грузов по модели смещения. - В кн.: Сохранная и безопасная перевозка грузов.-Л., Транспорт, 1986, с. 5-10. (ЦНИИМФ).

7. Разработка технологии морской перевозки чугуна в чушках с применением нескользких покрытий взамен клеткования. Соавторы Шевченко А.З. и Новоселов Ю.П. М., 1986, с.2-11 (Технология морских перевозок.Экспресс-информация В/О "Мортехинформреклама"; вып.6(148)).

8. Расчет несмещаемости груза с учетом сил трения.- В кн.: Технология морских перевозок грузов.- Л., Транспорт, 1987, с.28-31. (ЦНИИМФ).

