

ISSN 2949-3684

ВЕСТНИК

МОРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 97 / 2024

Вестник Морского государственного университета. Вып. 97 / 2024 / Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2024. — 73 с. ; цв. ил., табл. — Библиогр. в конце ст. — ISSN 2949-3684.

Вестник Морского государственного университета содержит публикации, посвященные актуальным нормативно-организационным, техническим и технологическим проблемам судовождения и безопасности мореплавания, судоремонта, судовых силовых установок и их элементов, логистических транспортных систем и гидрографии, автоматизации и управления технологическими процессами, обработки информации, системного анализа и управления процессами перевозок на морском транспорте. Материалы содержат теоретические выводы и практические рекомендации, которые могут быть использованы для развития научных направлений и для принятия инженерных, административных и коммерческих решений.

Дата выхода в свет - 27 декабря 2024 г. Выходит четыре раза в год.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-82589 от 30.12.2021.

Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского».

Адрес учредителя, издателя и редакции: 690003, Россия, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а. Электронная почта редакции: vestnik@msun.ru; телефон редакции: +7 (423) 251-76-36.

Главный редактор – Соболенко Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор.

Заместитель главного редактора – Рычкова Виктория Феликсовна, начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности.

Научный редактор – Холоша Михаил Васильевич, кандидат технических наук, доцент.

Выпускающий редактор – Баранникова Анастасия Олеговна, кандидат исторических наук.

Редакционная коллегия:

Азовцев Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор;

Буров Денис Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент;

Войлошников Михаил Владиленович, доктор технических наук, профессор;

Глушков Сергей Витальевич, доктор технических наук, профессор;

Друзь Иван Борисович, доктор технических наук, профессор;

Дыда Александр Александрович, доктор технических наук, профессор;

Лазарев Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент;

Луговец Александр Анатольевич, доктор экономических наук, доцент;

Москаленко Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор;

Надежкин Андрей Вениаминович, доктор технических наук, профессор;

Огай Сергей Алексеевич, доктор технических наук, доцент;

Оськин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент;

Холоша Михаил Васильевич, кандидат технических наук.

Цена свободная.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Молоков К.А., Новиков В.В. Критерий оценки развития повреждений в сварных конструкциях судового корпуса с трещиноподобными дефектами.....	4
Славгородская А.В., Терещенко И.В., Молоков К.А. Об опыте прессования листового металла на упругой подложке.....	14
Садыков Р.Х., Стаценко В.Н., Рудометов И.Д. Исследование жидкостной пленочной нейтрализации выбросов твердых частиц в судовой энергетике.....	21
Стаценко В.Н., Гаврилов В.П. Расчетная методика выбора судовых теплообменников.....	26

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

Кравцов А.С., Сорокина М.П., Шилкин В.П., Шилкина И.Д. Проблема достоверности информации при разработке норм ходового времени судов на внутренних водных путях.....	33
Мотрич В.Н. Динамическая сепарация навалочного груза.....	38

ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

A.A. Panasenko, S.V. Petrashev. Environmental and power impact on the efficiency of heat exchangers.....	70
--	----

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 539.4:669.018.29

Критерий оценки развития повреждений в сварных конструкциях судового корпуса с трещиноподобными дефектами

Молоков Константин Александрович ^{1,2}, к.т.н., spektrum011277@gmail.com

Новиков Валерий Васильевич ¹, к.т.н., leka230243@gmail.com

¹ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

² Владивостокский государственный университет, г. Владивосток

В настоящем исследовании изучается воздействие концентраторов напряжений, аналогичных трещинам, возникающих из-за конструктивных особенностей элементов или в процессе сварки. На основе билинейной модели деформирования разработан критерий, определяющий предельное состояние и надежность металлоконструкций с учетом вероятности развития повреждений.

Особое внимание уделено глубоким концентраторам (дефектам), характеризующимся сложным трехмерным напряженным состоянием возле вершин. Полученные данные демонстрируют значительное влияние трехмерности напряженного поля на критический коэффициент концентрации напряжений в вершинах подобных концентраторов или дефектов. Представленные точечные расчеты допустимой нагрузки и коэффициента концентрации напряжений основаны на разработанном критерии предельного состояния для вершинных зон концентраторов. Результаты исследования подтверждают зависимость критического коэффициента концентрации напряжений от механических свойств материала, его геометрических параметров и ориентации относительно внешнего силового поля. Превышение критического состояния величиной коэффициента концентрации в вершине концентратора (дефекта) свидетельствует о высокой вероятности развития макротрещины.

Результаты исследования имеют практическую значимость при расчетном анализе прочности элементов конструкций и сварных соединений с трещиноподобными дефектами, а также актуальны для разработки методов контроля и предупреждения распространения трещин и других дефектов.

Ключевые слова: сварное соединение, корпус судна, трещиноподобный дефект, теоретический коэффициент концентрации, объемное напряженное состояние, концентрация напряжений, билинейная диаграмма деформирования.

Criterion for assessing the development of damage in welded structures of a ship hull with crack-like defects

K.A. Molokov ^{1,2}, spektrum011277@gmail.com

V.V. Novikov ¹, leka230243@gmail.com

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok

² Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok

The present study examines the effect of stress concentrators, similar to cracks, arising due to design features of elements or during welding. Based on the bilinear deformation model, a criterion has been developed that determines the limit state and reliability of metal structures taking into account the probability of damage development.

Particular attention is paid to deep concentrators (defects) characterized by a complex three-dimensional stress state near the vertices. The data obtained demonstrate a significant effect of the three-dimensionality of the stress field on the critical stress concentration factor at the vertices of such concentrators or defects. The presented point calculations of the permissible load and the stress concentration factor are based on the developed limit state criterion for the vertex zones of concentrators. The results of the study confirm the dependence of the critical stress concentration factor on the mechanical properties of the material, its geometric parameters and orientation relative to the external force field. Exceeding the critical state by the concentration factor at the concentrator (defect) vertex indicates a high probability of macrocrack development. The results of the study are of practical importance in the calculation analysis of the strength of structural elements and welded joints with crack-like defects, and are also relevant for the development of methods for monitoring and preventing the propagation of cracks and other defects.

Keywords: welded joint, ship hull, crack-like defect, theoretical concentration coefficient, volumetric stress state, stress concentration, bilinear deformation diagram.

Введение

Дефекты в сварных соединениях, такие как трещины и концентраторы напряжений (подрезы, несплавления, поры и т.д.), могут значительно снижать как статическую, так и усталостную прочность конструкции. Особую опасность представляют концентраторы напряжений, способные провоцировать образование трещин, особенно при циклических нагрузках, в вершине концентратора напряжений или трещиноподобного дефекта. Вероятность возникновения трещины в вершине концентратора напряжений зависит от его формы, размеров, величины внешней нагрузки и напряженного состояния (НС), которое в свою очередь может зависеть от концентрации напряжений и внешней нагрузки [1].

В сварных конструкциях с концентраторами напряжений даже малые трещины, возникающие при эксплуатации, могут представлять серьезную угрозу [2, 3, 4, 5]. Это связано с тем, что они могут быстро распространяться, особенно в продолговатых и узких концентраторах (рис. 1).

Выбор типа того или иного сварного соединения крупногабаритных корпусных конструкций, часто обусловлены экономическими факторами, поэтому приходится сталкиваться с присутствием концентраторов напряжений. В целом, даже сварные соединения с малой концентрацией напряжений вызывают снижение несущей способности. Разрушение крестовых сварных швов со значительным межцентровым расстоянием $2a$ и дефектами непровара может происходить как при статических нагрузках из-за хрупкого разрушения зоны сплавления, расположенной в вершине эллиптического концентратора, так и под циклическим воздействием, инициирующим образование трещин в вершинах концентратора.

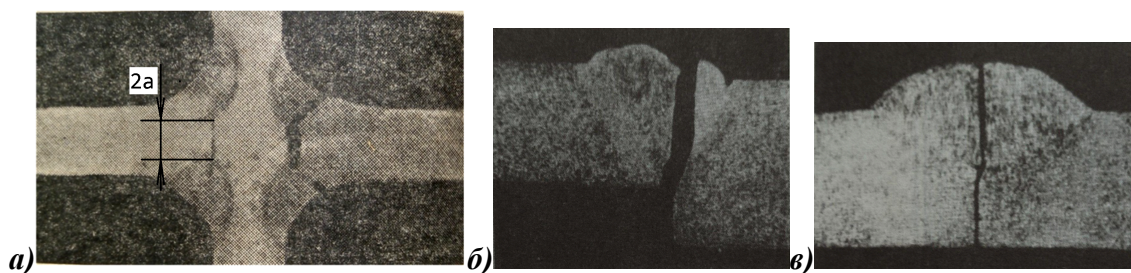


Рис. 1. Разрушения крестовых и стыковых соединений [6, 7] от концентраторов напряжений: а – трещиноподобный концентратор от непроплавления размером $2a$ (соединение без разделки кромок); б – от концентратора образованного ступенчатым переходом в стыке кромок; в – одностороннее стыковое соединение с концентратором от непроплавления

Существующие модели оценки надежности сварных элементов с трещиноподобными дефектами часто не учитывают специфику поведения материала и НС при значительных деформациях. Поэтому актуальной задачей является разработка приемлемого критерия оценки развития повреждений от внешней циклической нагрузки - такого, который бы учитывал нелинейное поведение материала, изменение многоосного напряженного состояния в вершине трещиноподобного концентратора и позволял бы более точно прогнозировать прочность сварных конструкций с трещиноподобными дефектами. Данная работа посвящена разработке и применению критерия, основанного на билинейной аппроксимации истинной диаграммы деформирования материала.

Исследования по расчетной оценке зарождения и развития трещин в районе концентраторов напряжений

Концентрация напряжений, возникающая в сварных соединениях, является одним из ключевых факторов, определяющих их прочность и долговечность. Многочисленные исследования, проведенные как отечественными, так и зарубежными учеными, подтверждают, что концентраторы напряжений являются причиной множества разрушений сварных конструкций, особенно в таких отраслях как кораблестроение, машиностроение и строительство [2].

Концентраторы напряжений возникают в местах резкого изменения геометрии сварных соединений, например, в зонах подрезов, несплавлений, сварочных кратеров и пр. В этих точках происходит перераспределение напряжений, приводящее к локальному повышению их величины. Это повышение напряжений может значительно превышать номинальные значения напряжений, действующих в конструкции в целом, что может приводить к пластической деформации материала или даже к его разрушению.

В стыковых и крестовых соединениях (см. рис. 1), наиболее распространенных типах сварных соединений, область основного металла, непосредственно примыкающая к сварному шву, является наиболее уязвимой. Швы, как правило, имеют значительную длину по сравнению с толщиной металла и концентратором напряжения, например, подрезом в стыковом соединении, или протяженное непроплавление в сварном соединении и др. Подобная геометрия препятствует равномерному распределению напряжений, а совместно с неоднородностью зон соединения приводит к возникновению двухосного, а чаще – многоосного напряженного состояния [8]. В этом исследовании автором дается оценка допустимых коэффициентов концентрации напряжений для трещиноподобных дефектов. Для плоского напряженного состояния в вершине концентратора и внешней нагрузки σ_n ниже предела текучести материала при одноосном растяжении $\sigma_{0,2}$, (т.е., когда для упругого решения выполняются соотношения $\sigma_{max} = \alpha_m \sigma_n \gg \sigma_{0,2}$, а $\sigma_n \approx \sigma_{0,2}$ и $\sigma_n < \sigma_{0,2}$) характерно значение теоретического коэффициента концентрации напряжений $\alpha_m = 7,3$, при котором концентратор можно считать трещиноподобным.

добным. Различия между трещиноподобным концентратором и трещиной должны нивелироваться, если $\alpha_m > 7,3$. При этом жесткость напряженного состояния в его вершине, при определенном радиусе и длине, а также величине внешней нагрузки, может быть сопоставима с жесткостью НС в вершине трещины.

Оценивать величину теоретического коэффициента концентрации напряжений в зоне сплавления для различных сварных соединений и форм поверхностей предлагается по зависимостям, приведенным в [5, 6, 2] и др., которые в основном учитывают эффект концентрации от неплавного перехода и других геометрических параметров соединений.

В случае поверхностных или объемных концентраторов напряжений в массивных телах при плоском напряженном состоянии (σ_n – напряжение на бесконечности), для эллиптических концентраторов целесообразно применять решение Колосова-Инглиса:

$$\alpha_m = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} = 1 + 2\sqrt{a/\rho}, \quad (1)$$

В последней зависимости ρ и σ_{max} представляют радиус кривизны и максимальное касательное напряжение на поверхности в вершине концентратора, а параметр a соответствует большой полуоси эллипса, или половине максимальной длины зоны концентрации, перпендикулярной направлению внешней нагрузки. Полуэмпирическая зависимость демонстрирует высокую степень соответствия экспериментальным данным.

Согласно принятой модели, теоретический коэффициент концентрации напряжений для выреза определяется геометрическими параметрами: 1 – глубиной и радиусом кривизны в вершине; 2 – независимостью от общей формы контура [5].

Применение современных методов численного моделирования, таких как метод конечных элементов (МКЭ), существенно упростило оценку теоретического коэффициента концентрации напряжений, позволяя проводить анализ напряженно-деформированного состояния в рамках как линейно-упругой, так и упругопластической моделей.

Экспериментальные исследования подтверждают, что при достижении определенной концентрации напряжений и воздействии внешней статической нагрузки, в условиях упругопластической деформации материала, в вершине концентратора возникает начальная трещина разрушения. Она обычно распространяется в направлении, перпендикулярном оси растяжения, как это видно на рис. 2, а-б. На данных снимках [9], увеличение размеров повреждения под поверхностью показано слева направо.

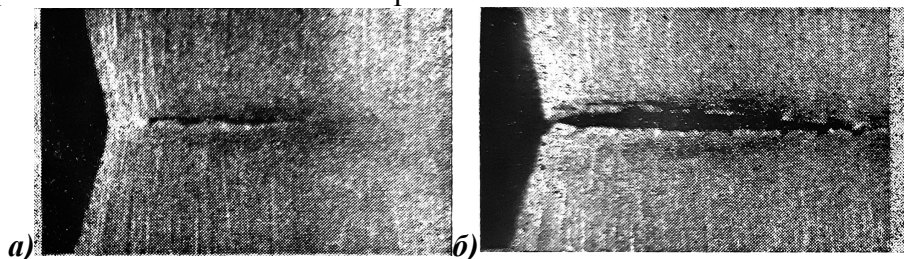


Рис. 2. Образование несплошности под поверхностью в области вершины концентратора при статическом растяжении

При воздействии статической растягивающей нагрузки на деталь с острым концентратором напряжений возникает зона многоосного напряженного состояния. В этой зоне наблюдается повышенная вероятность нарушения сплошности материала, что может привести к образованию подповерхностных дефектов. Известно [5], что возникновение несплошности на мезо- и микро-уровне связано с превышением первого главного напряжения (приведенного напряжения по Мизесу) при условии трехосного напряженного состояния.

В зоне концентрации напряжений увеличивается уровень пластической деформации, а

предел прочности материала в ослабленном месте может повышаться до 160%, в зависимости от типа материала [9].

Для сравнительной оценки чувствительности материала к концентрации напряжений автор [10] рекомендует использовать зависимость:

$$\alpha_m = \frac{\sqrt{E \cdot \varepsilon_{разр} \cdot \sigma_{разр}}}{\sigma_n} \quad (2)$$

Здесь величины $\varepsilon_{разр}$ и $\sigma_{разр}$ можно определять по общепринятым в расчетах формулам $\varepsilon_{разр} \cong \varepsilon_{кр} = \ln[1/(1 - \varphi_k)]$ и $\sigma_{разр} \cong S_{отр} = \sigma_v(1 + 1,4\varphi_k)$, соответственно, где $S_{отр}$ – истинные напряжения разрушения при одноосном напряженном состоянии.

Эта формула была преобразована авторами [1] в несколько другой вид:

$$\frac{\sigma_n^{bc}}{\sigma_{0,2}} = \frac{\sqrt{E \cdot \varepsilon_{разр} \cdot \sigma_{разр}}}{\alpha_m^{bc}(0,9 + 0,1\alpha_m^{bc})\sigma_{0,2}} \quad (3)$$

При этом предлагаемый автором [10] коэффициент α_m , характеризующий условие возникновения трещины при конкретной нагрузке σ_n , на графиках его будем обозначать как значение α_m . Это состояние предложено называть как «наиболее вероятное для зарождения макротрещины в концентраторе» (Worn Crack)). Предлагаемая зависимость учитывает повышение напряжений течения в области вершины концентратора, однако расчеты по ней не учитывают жесткость напряженного состояния в зависимости от внешнего нагружения и концентрации напряжений.

Исследование [11] предлагает аналитическую модель оценки риска, связанного с концентраторами напряжений в трубопроводных системах, основанную на концепции локального коэффициента концентрации напряжений. В работе выведено аналитическое соотношение, устанавливающее связь между обобщенным коэффициентом концентрации напряжений и коэффициентами концентрации интенсивности напряжений и деформаций в упругой области. Данное соотношение, полученное с использованием формулы Нейбера Г. и степенной аппроксимации кривой деформирования материала, позволяет определить критическое значение пластической деформации в зоне концентратора как:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_v \alpha_c^{2/(1+m)}}{E}, \quad (4)$$

где α_c – критическое значение теоретического коэффициента концентрации напряжений, на графиках будем его обозначать α_m ; σ_v – по условной диаграмме условный предел прочности; E – модуль упругости стали; m – показатель степенного упрочнения для основного металла сварного соединения.

В рамках деформационной теории пластичности, используя степенную аппроксимацию диаграммы деформирования, получена формула для численного расчета критического состояния в вершине концентратора по формуле в следующем виде [1]:

$$\sigma_n^{bc} = \frac{2 \cdot (\alpha_m^{bc})^{\frac{-2m}{m+1}} \cdot \sigma_v \cdot (7\varphi_k + 5)}{\alpha_m^{bc} + 9} \quad (5)$$

Последнее соотношение позволяет, при заданной нагрузке, численно определить напряжения σ_n^{bc} или построить диаграмму вероятности образования макротрещин в зоне концентратора. Однако предложенный подход не учитывает влияние трехмерности напряженного состояния в вершине концентратора на зарождение дефекта при достижении критического состояния.

Оценка влияния циклической нагрузки, концентрации и сложного НДС на трещинообразование

В упрочняемых материалах циклическое нагружение в области острых концентраторов напряжений повышает вероятность хрупкого разрушения, это происходит тем больше, чем ниже температура эксплуатации. В связи с этим, критерием опасности принимается теоретический коэффициент концентрации напряжений (α_r), соответствующий пределу хрупкого разрушения при статическом нагружении. Зависимость максимальных напряжений от числа циклов нагружения (N) может быть представлена следующей аппроксимационной формулой:

$$\sigma_{\max} = \sigma'_{\max} + A \cdot \lg(N), \quad (6)$$

где σ'_{\max} – максимальное напряжение в концентраторе в первом полцикле; A – коэффициент, зависящий от уровня исходной деформации и коэффициента асимметрии цикла нагружения в вершине концентратора. По известным данным разупрочнение связано с появлением разрыхлений материала и появлением микронесплошностей. Для упрочняющихся материалов напряжения σ_{\max} с увеличением количеством циклов на первой стадии будут возрастать.

Хрупкое разрушение вблизи острого концентратора напряжений может быть вызвано следующими причинами:

1. Повышенной интенсивностью трехмерного растяжения, когда напряжения вблизи вершины концентратора имеют сложную пространственную структуру, что усиливает растягивающие напряжения и способствует хрупкому разрушению.

2. Увеличением сопротивления пластической деформации, когда вблизи вершины концентратора возрастает сопротивление сдвигу, что затрудняет пластическую деформацию и повышает вероятность хрупкого разрушения. Это явление сильнее проявляется при высоких скоростях нагружения и острых концентраторах.

Вблизи вершины концентратора на поверхности материала преобладает плоское напряженное состояние, а под поверхностью наблюдается трехосное напряженное состояние, которое характеризуется значительно более высокой жесткостью. Вследствие этого хрупкое разрушение, как правило, возникает на некотором расстоянии от поверхности концентратора. Экспериментально установлено, что локальный предел текучести в зоне концентратора напряжения не совпадает с теоретическими значениями, рассчитанными по критерию Мизеса-Губера-Генки. Разница между экспериментальным значением $\sigma_{0,2}^*$ и теоретическим значением $\sigma_{0,2}$ возрастает с увеличением концентрации напряжений, а это означает, что жесткость напряженного состояния изменяется.

В условиях трехосного напряженного состояния зависимости между главными напряжениями при плоской деформации принимают следующий вид:

$$\sigma_1 = \sigma_i/D; \sigma_2 = q\sigma_1; \sigma_3 = \mu_m(1 + q)\sigma_1. \quad (7)$$

Здесь $\mu_m = 0,5$ – коэффициент Пуассона в пластической области, а D – коэффициент перенапряжения, учитывающий повышение первого главного напряжения в случае СНС.

С учетом принятия допущения о линейной зависимости повышения напряжений текучести в области вершины концентратора решим данное уравнение относительно q . Оно будет иметь два решения: первое – для случая возникновения растягивающей компоненты σ_2 ; второе – сжимающей. В условиях действия растягивающей компоненты σ_2 , которая увеличивает жесткость напряженного состояния в случае СНС, после преобразований и сокращений получим следующее выражение:

$$q = 1 - \frac{\sqrt{3}\sigma_{0,2}}{15\sigma_n} \left(1 + \frac{9}{\alpha_T} \right). \quad (8)$$

Для предельного случая, когда $\sigma_n = \sigma_{0,2}$, и $\alpha_T = 7,3$, имеет место достаточно близкое соотношение между нормальными компонентами к соотношениям их для трещины. Таким образом, при таких значениях концентратор можно считать трещиноподобным и, как легко видеть из (8), пропорциональность q будет изменяться в зависимости от значений α_T и σ_n .

Критерий критического состояния для вершины трещиноподобного концентратора напряжений

Истинные напряжения для вершины концентратора напряжений при решении упругой задачи можно найти по билинейной аппроксимации истинной диаграммы деформирования:

$$\sigma_i^y = \sigma_{0,2} + \frac{S_{omp} - \sigma_{0,2}}{Ee_{кр} - \sigma_{0,2}} (\alpha_T \sigma_n - \sigma_{0,2}), \quad (9)$$

где S_{omp} – истинные напряжения отрыва при одноосном растяжении образца, вычисляемые через критическое относительное сужение $\varphi_{кр}$ и временный предел прочности, как $S_{omp} = \sigma_b(1 + 1,4\varphi_{кр})$; $e_{кр}$ – критическая пластическая деформация до разрушения образца; σ_n – напряжение, создаваемое внешней нагрузкой вне области влияния концентратора.

Допуская, что интенсивность истинных одноосных напряжений энергетически эквивалентна приведенным напряжениям при многоосном напряженном состоянии в вершине концентратора, по формуле Губера-Мизеса имеем $\sigma_i^y = \sigma_i$.

Однако за счет многоосного НС при плоском НС, первая главная компонента нормальных напряжений σ_1 увеличивается, и для вершины трещиноподобного концентратора напряжений можно записать через отношение компонент (7) следующим образом:

$$\sigma_i^y = \sqrt{\left[(\sigma_1 - q\sigma_1)^2 + \left(q\sigma_1 - \mu_m(1+q)\sigma_1 \right)^2 + \left(\sigma_1 - \mu_m(1+q)\sigma_1 \right)^2 \right] / 2}, \quad (10)$$

где q – вычисляется по формуле (8) для трещиноподобного концентратора; μ_m – коэффициент Пуассона для пластического состояния материала. Положим что критическое состояние, при котором неизбежно будет развиваться поврежденность для вершины концентратора, будет соответствовать условию достижения

$$\sigma_1 = S_{omp}. \quad (11)$$

Тогда заменив в (10) σ_1 на S_{omp} и приравняв (10) к (9) можно численно найти все пары соответствующих искомым величин α_T и σ_n , удовлетворяющих неизбежному развитию повреждений у вершины трещиноподобного концентратора напряжений. К сожалению, прямую запись формулы относительно α_T или σ_n здесь привести невозможно из-за ее громоздкости.

Сравнительный анализ результатов

Для верификации адекватности модели, определяющей критическое состояние, построены графики зависимости $\sigma_n^{bc}/\sigma_{0,2}$ от α_m^{bc} (рис. 3). В расчетах использованы распространенные в судостроении конструкционные стали феррито-перлитного класса в состоянии поставки (10, 22К, 50, СтЗсп, 37ХН3А, 30ХГСА и др.). Механические характеристики этих сталей приведены в табл. 1, а некоторые результаты расчетов представлены в работах [10, 1] и других публикациях.

Таблица 1 – Характеристики сталей

Марка стали	σ_B , МПа	σ_T , МПа	m	φ_k
10	320	190	0,17	0,73
СтЗсп	450	270	0,16	0,71
22К	540	310	0,16	0,69
50	680	350	0,16	0,62
37ХН3А	1014	743	0,12	0,6
30ХГСА	1750	1360	0,09	0,44

Предложенный критерий применим для оценки опасности дефектов в сварных соединениях, локализованных в зоне сплавления (см. рис. 1). В этой зоне формируются закалочные структуры с механическими свойствами, существенно отличающимися от свойств исходного металла и зависящими от параметров сварки, марки стали и других факторов.

Результаты, полученные с учетом многоосности и использования билинейной диаграммы деформирования, дают критические напряжения несколько отличающиеся от напряжений, рассчитанных по другим критериям (см. рис. 3). В целом при высокой концентрации напряжений (порядка $\alpha_T > 35$) напряжения σ_n^{bc} , рассчитанные по предлагаемому критерию, приближаются к значениям, получаемым по модели (3), однако для области значений $7,3 < \alpha_T < 25$ σ_n^{bc} они становятся значительно ниже. Следует отметить, что для областей, где $\alpha_T > 35$ и $7,3 < \alpha_T < 25$, схождение и расхождение результатов, соответственно сильно зависят от марки стали, а точнее - от ее механических характеристик. Точки пересечения зависимостей с моделью (3) наблюдаются при разных значениях α_T и σ_n^{bc} , и их положение зависит также от марки стали.

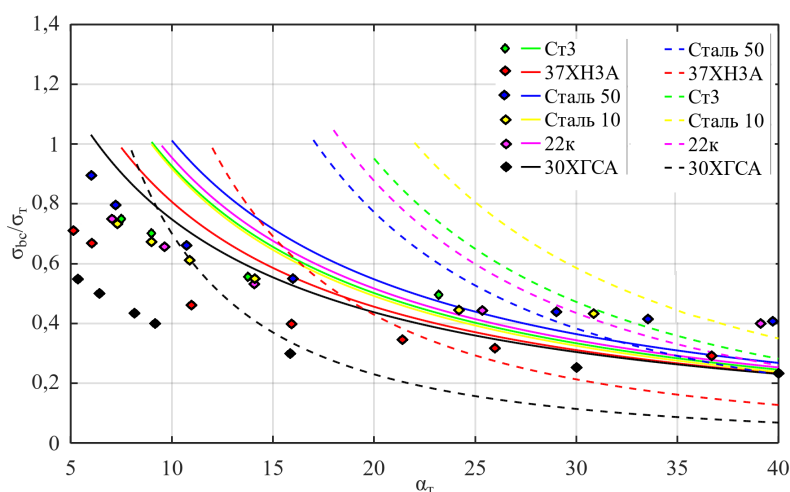


Рис. 3. Изменение относительного уровня безопасных напряжений внешней нагрузки $\sigma_{bc}^{bc}/\sigma_{0,2}$ от α_m для трещиноподобных концентраторов по различным моделям: сплошные кривые – формула (5); пунктирные – формула (3); маркеры – формулы (7)-(11)

Учет объемного напряженного состояния в трещиноподобных дефектах сказывается на снижении допустимых напряжений зарождения и развития повреждений, особенно от границы перехода, когда дефект можно считать трещиноподобным, до α_T порядка 17, причем в большей степени для сталей средней и низкой прочности. Очень вероятно, что для не трещиноподобных дефектов (обычных концентраторов), когда $\alpha_T \ll 7,3$, критерий учета объемного состояния и начального разрушения по условию (11) будет давать заниженные опасные напряжения, гарантируя большой запас прочности и отсутствие процесса образования и развития повреждений от концентратора. Для таких концентраторов необходимо использовать другие критерии, например, описанные в [12, 13].

Учет трехмерного напряженного состояния в моделях приводит к снижению критической пластической деформации до разрушения при статическом растяжении образцов, что свидетельствует о выполнении условия (11) до полного исчерпания пластичности материала. Аналогичные исследования показывают, что более глубокие концентраторы вызывают более значительное локальное повышение предела текучести в их вершине. Экспериментальные данные подтверждают отсутствие пластического течения при чисто гидростатическом нагружении, разрушение происходит хрупко. Однако в зоне концентратора объемное напряженное состояние не является стабильным при увеличении внешней нагрузки, что приводит к бифуркации – образованию трещины или перераспределению пластических деформаций. При этом, первая компонента нормальных напряжений может оставаться неизменной величиной, и условие (11) может не нарушаться. Критическое состояние в зоне концентратора, предположительно, соответствует напряженному состоянию в момент бифуркации, параметры которого существенно зависят от глубины и геометрии концентратора (отношение глубины к толщине детали), механических характеристик материала и размеров зоны концентрации напряжений.

Предложенный подход позволяет выявить корреляцию между уровнем внешней нагрузки и вероятностью возникновения бифуркации, что открывает новые возможности для прогнозирования долговечности конструкций с концентраторами напряжений.

Дальнейшие исследования могут касаться получения дополнительных результатов методом конечных элементов с учетом микроструктурных особенностей материала в очаге концентратора, что позволит уточнить параметры бифуркации и повысить точность предсказания образования макротрещины в очаге. Более того, анализ эволюции напряженно-деформи-

рованного состояния вблизи точки бифуркации с использованием фрактальной геометрии может обеспечить более глубокое понимание механизмов хрупкого разрушения.

Заключение

На основе разработанного критерия предельного состояния для вершины концентратора представлены точечные расчеты допустимого уровня внешней нагрузки и коэффициента концентрации напряжений. Результаты исследования показали, что критический коэффициент концентрации напряжений для трещиноподобных концентраторов зависит от механических свойств материала, геометрии, а также его расположения относительно внешнего поля напряжений.

Полученный критерий для трещиноподобных дефектов корректнее описывает изменение предельных напряжений образования несплошностей, но не для всех степеней концентрации напряжений. Результаты, полученные по данному критерию, являются более жесткими, особенно для области, где концентратор можно отнести к трещиноподобным дефектам.

Экспериментальные данные подтверждают отсутствие пластического течения при чисто гидростатическом нагружении для определенного класса конструкций, разрушение в этом случае носит хрупкий характер. Однако, в области концентрации напряжений, при возрастании внешней нагрузки, стабильность трехмерного напряженного поля нарушается, что приводит к точке бифуркации, проявляющейся в образовании микродефекта или перераспределении пластических деформаций. А при циклических нагрузках, вероятность нарушения этого поля тем больше, чем больше становится циклическая наработка.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетном анализе прочности элементов конструкций и сварных соединений с трещиноподобными дефектами, а также для разработки методов контроля и предупреждения распространения трещин и других дефектов.

Список литературы

1. Молоков К.А., Новиков В.В., Дабалез М. Оценка появления начальных разрушений от концентраторов напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций. *Advanced Engineering Research (Russia)*. 2023;23(1):41–54.
2. Казанов Г.Т., Новиков В.В., Турмов Г.П. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций. - Владивосток: ДВФУ, 2014. - 178 с.
3. Математическая модель для оценки коэффициентов концентрации напряжений в сварных тавровых соединениях / В.В. Ерофеев, А.Г. Игнатъев, Н.И. Олейник [и др.] // Информационные технологии. Проблемы и решения. – 2021. – № 4(17). – С. 28-36.
4. Новиков В.В. Повреждения и расчетный анализ прочности корабельных конструкций / В.В. Новиков, Г.П. Турмов, О.Э. Суров, А.П. Герман, К.А. Молоков, М.В. Китаев. // Монография. - Владивосток: ДВФУ, 2020. - 266 с.
5. Матохин Г.В., Горбачев К.П. Инженеру о сопротивлении материалов разрушению. Монография. - Владивосток: Дальнаука, 2010 - 281 с.
6. Турмов Г.П. Расчет прерывистых связей на прочность с учетом концентрации напряжений. - Владивосток: ДВГУ, 1984. - 152 с.
7. Хажинский Г.М. Деформирование. Разрушение. Надежность: Задачи деформирования и разрушения стали. Методы оценки прочности энергетического оборудования и трубопроводов. -М.: ЛЕНАНД, 2014. - 544 с.

8. Матвиенко Ю.Г. Двухпараметрическая механика разрушения. - М.: Физматлит, 2021. - 208 с.
9. Кишкин Б.П. Конструкционная прочность материалов. - М.: МГУ, 1976. - 184 с.
10. Куркин С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. - М.: Машиностроение, 1976. - 184 с.
11. Ямалеев К.М., Гумерова Л.Р. Структурные аспекты разрушения металла нефтепроводов. - Уфа: АН РБ, Гилем, 2011. - 144 с.
12. Molokov K., Domashevskaja Ya. Estimation of Endurance Limits of Welded Joints by the Criterion of Non-propagating Cracks // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 479-486.
13. Молоков К.А., Новиков В.В., Турмов Г.П., Васильченко Н.П. Оценка надежности судовых конструкций с микротрещинами и остаточными сварочными напряжениями // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. № 3(41). С. 45-54.

Поступила в редакцию 12 ноября 2024 г.

Об опыте прессования листового металла на упругой подложке

Славгородская Александра Владимировна, к.т.н., alexandri-s@yandex.ru

Терещенко Игорь Витальевич, мастер производственного обучения ¹, tereschenkoiv@msun.ru

Молоков Константин Александрович ^{2,3}, к.т.н., spektrum011277@gmail.com

¹ Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток

² Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

³ Владивостокский государственный университет, г. Владивосток

В работе приводится описание способа прессования медного и латунного листов на упругой подложке с целью получения оттиска трехмерной компьютерной модели с помощью дюралюминиевой матрицы–пуансона выполненной на фрезеровальном станке с числовым программным управлением. Представлены преимущества полученного опыта по сравнению с другими традиционными способами изготовления тонкостенных профильных элементов.

Ключевые слова: пресс-форма, прессование на упругой подложке, сплав Д16Т, штамповка, штампованные детали, пуансон, фторопласт

On the experience of pressing sheet metal on an elastic substrate

Slavgorodskaya Alexandra Vladimirovna, PhD, alexandri-s@yandex.ru

Tereshchenko Igor Vitalievich, master of industrial training ¹, tereschenkoiv@msun.ru

Molokov Konstantin Alexandrovich ^{2,3}, PhD, spektrum011277@gmail.com

¹ Maritime State University named after Adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok

² Far Eastern Federal University, Vladivostok

³ Vladivostok State University, Vladivostok

The paper describes a method for pressing copper and brass sheets on an elastic substrate in order to obtain an imprint three-dimensional computer model using a duralumin matrix-punch made on a milling machine with numerical control. The advantages of the experience gained in comparison with other traditional methods of manufacturing thin-walled profile elements are presented.

Keywords: press form, pressing on an elastic substrate, D16T alloy, stamping, stamped parts, punch, fluoroplastic.

Введение

В МГУ им. адм. Г.И. Невельского существует научно-образовательный технологический центр судостроения и судоремонта (НОТЦ СС). На его основе внедряются цифровые технологии судоремонта. Возможности компьютерной графики позволяют спроектировать модель и вывести ее на 3D печать в формате «stl». Эта трехмерная модель может быть из различных материалов, в том числе возможна и резьба по дереву, она может быть выполнена на фрезеровальном станке с числовым программным управлением (ЧПУ) (рис. 1).



Рисунок 1 – Деревянное панно, выполненное на фрезеровальном станке с ЧПУ (трехмерная модель от интернет маркета AliExpress)

Программа ArtCAM Express позволяет моделировать и обрабатывать 2D и 3D модели . Это система начального уровня, и поэтому идеально подходит для неопытных начинающих пользователей имеющих минимум знаний об обработке . Интерфейс этой программы разработан так, чтобы последовательно охватить весь процесс от разработки эскиза до получения законченного изделия или штампа. ArtCAM Express позволяет делать гравировку, обработку металлов, резьбу по дереву и многое другое. Например, выполнить пресс форму (матрицу-пуансон) (рис. 2).

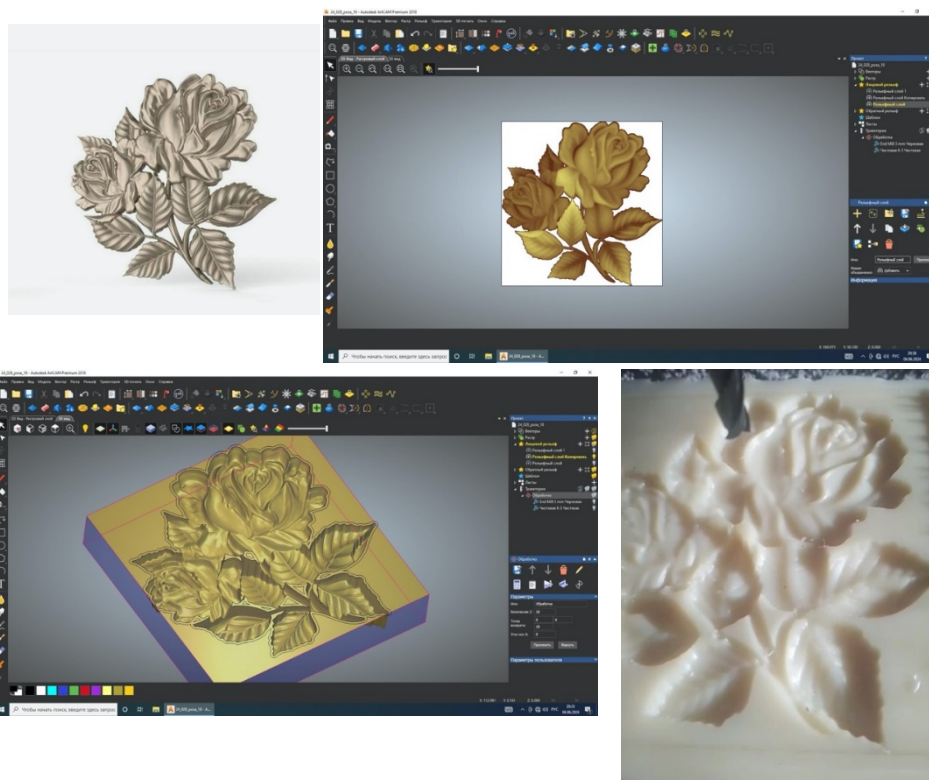


Рисунок 2 – Разработка от рельефного рисунка будущего изделия в программе ArtCAM до изготовления опытной модели пуансона из фторопласта на фрезерном станке с ЧПУ

Цель настоящей статьи это обобщение опыта полученного при изготовлении рельефного оттиска на листах латуни и отожжённой меди толщиной соответственно 0,25 и 0,4 мм односторонним прессованием матрицей–пуансоном из дюралюминиевой плиты марки сплава Д16Т, изготовленной с помощью фрезерного станка. Станок ЧПУ CNC-3658AS предназначен для выполнения широкого спектра работ по пластику, древесине, текстолиту, цветному и черному металлу с высокой точностью [10].

Технологии штамповки, достоинства и недостатки

Сжатие любого конструкционного материала как способ уплотнения структуры приводит как правило к упрочнению и сегодня все чаще при обработке металла используется прессование металла в производстве изделий штамповкой [1].

Обработка материалов давлением позволяет придать заготовке необходимую форму, а именно выдавливать определенный рельеф, узоры или пробивают отверстия практически не требуя снятия стружки и главным достоинством данного способа это экономичность, производительность и высокий коэффициент выхода годного продукта. Эта технология позволят изготавливать детали различных форм, чьи размеры варьируются от миллиметра до нескольких метров [7].

Технологический процесс прессования в зависимости от направления сжимающих усилий представляет собой сложное напряженно деформируемое состояние практически нелинейное сопровождающееся очагами концентрации напряжений в углах форм, неравномерным распределением сил трения на зависящих от качества поверхности и прочностных свойств пуансона и матрицы, со смазкой или без, температурного режима и скорости нагружения.

Различают методы прямого и обратного прессования, с помощью валков, ударного или даже взрывного способа в гидравлической ванне.

Сегодня в производстве чаще всего используется прессование листового металла кристаллическая структура которого улучшена предварительным прокатом в отличие от отливок более однородна, к тому же эффект всестороннего сжатия который возникает в тонком листе при обжатии позволяет избежать роста трещин и появления сколов за счет сил трения в данном случае как раз способствующих исключению отрывающих усилий.

Так при небольшой толщине листа меди или латуни $< 0,4$ мм при условии его отжига мы использовали метод прямого прессования на упругой резиновой подложке, которая обеспечивает мягкое вытягивание профиля и позволяет создавать изображение на металле практически идентичное ручной чеканке.

В НОТЦ СС МГУ им. адм. Г.И. Невельского (директор Максимов Денис Сергеевич) имеется современное оборудование позволяющее освоить новые принципы судоремонта в частности изготовить матрицу пуансон для штампования изделий из листового металла, например прокладок и других профильных элементов в том числе, декоративных элементов.

Плита $100 \times 100 \times 18$ мм. Дюраль-полуфабрикаты Д16АТ, Д16АМ и Д16Т изготавливаются из деформируемого алюминиевого сплава марки Д16. Главные преимущества сплава Д16 заключается в том, что получаемый из него металлопрокат обладает высокими прочностными характеристиками, а его удельный вес в 3 раза меньше чем у стали, к тому же он обладает хорошей механической обрабатываемостью на токарном и фрезерном станках. Требования к химическому составу данного сплава установлены ГОСТ 4794-87. Содержание алюминия в сплаве Д16Т составляет 90,90-94,70%, меди -3,80-4,90%, магния-1,20-1,80%. Плотность сплава- $2,77 \text{ кг/дм}^3$ (рис. 3).

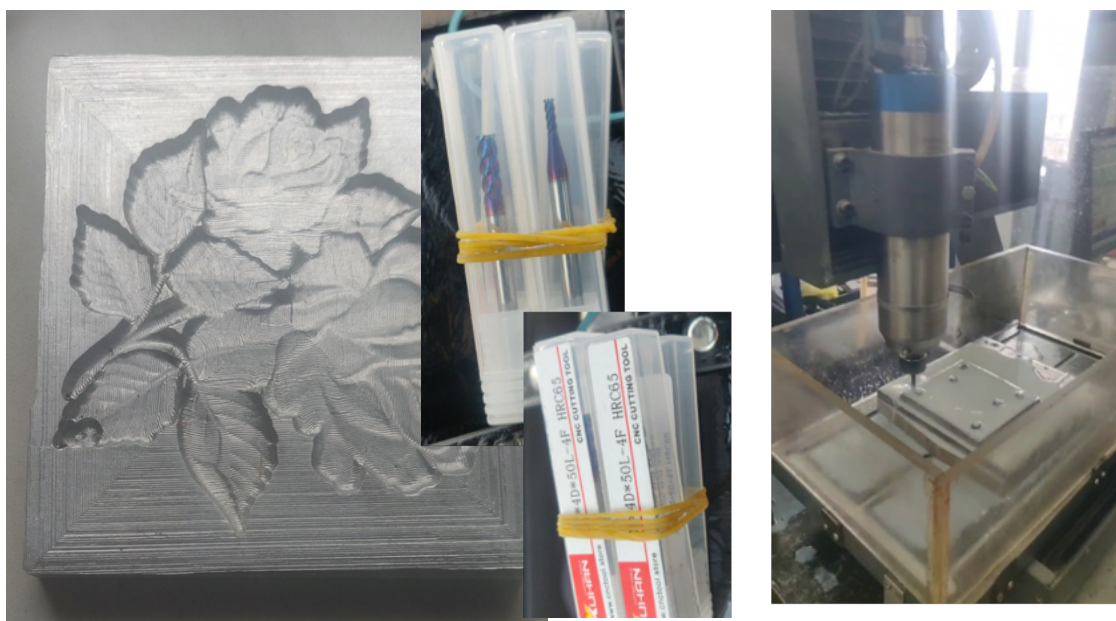


Рисунок 3 – Станок осевой фрезерный с ЧПУ по металлу и изготовленная матрица из дюралюминия Д16Т $100 \times 100 \times 10$ мм, фрезы концевые твердосплавные 65 HRC

Д16Т алюминиевый сплав, который обладает стабильной структурой, малым весом, хорошей прочностью, обрабатываемостью и сопротивляемостью к микроскопической деформации. Относится к сплавам Al-Cu-Mg (алюминий, медь, магний) и легируется марганцем. Маркировка Д16Т позволяет получить информацию об основных свойствах: Д-дюраль, 16-порядковый номер сплава, Т-закалённый, термически упрочненный и естественно состаренный (что отличает его от обычного Д16). За счет такого набора характеристик материал активно используется в корабле-, самолетостроении и даже ракетостроении. Как и любой

сплав, дюралюминий имеет сильные и слабые стороны.

Среди основных преимуществ этого сплава стоит выделить:

- гибкость и пластичность;
- механическую прочность в результате термоупрочнения;
- разнообразие видов обработки;
- широкий сортамент изготавливаемого проката;
- малый удельный вес.

К незначительным минусам следует отнести:

- небольшую подверженность ржавлению.[8].

Фрезы концевые твердосплавные HRC65 для фрезерного станка по металлу с ЧПУ (CNC) изготовлены из монокристаллического твердого сплава (карбид вольфрама WC с добавлением кобальта). Фреза с 4 зубьями и острыми режущими кромками специальной геометрии для увеличенной эффективности, подходит как для черновой, так и для чистовой обработки металла. Количество зубьев определяет количество канавок. Глубокие и спиралевидные канавки в инструменте обеспечивают образование и удаление стружки. Рабочая поверхность фрезы имеет современное нано покрытие на кремниевой основе (Nano blue). Это покрытие обладает высокой жаростойкостью и твердостью, тем самым подходит для обработки закаленных сталей от 50 до 70 HRC без использования эмульсии. Покрытие наносится на фрезу посредством распыления. Угол наклона спирали 45°. Установка канавок под углом позволяет зубу постепенно входить в материал, в результате уменьшается вибрация. Как правило, чистовые фрезы имеют более высокий угол наклона (более плотную спираль) для получения лучшей отделки. Фреза с плоским торцом служит для обработки плоскостей, пазов, фасонных поверхностей, а также для раскроя, выборки. Высокоточный режущий инструмент отличается высоким сроком службы и простотой в эксплуатации. Фреза является универсальной ее можно использовать для широкого спектра материалов, таких как углеродистая и нержавеющая сталь, чугун, медь закаленная и высокопрочная сталь твердостью до 65 HRC [9].

Прессование на упругой подложке возможно при относительно небольшой нагрузке (достаточно 5 тонн для металла толщиной от 0,25 – 0,4 мм, и не больше 25 тонн для дерева толщиной 10 мм плиток размером 100x100 мм). Оно позволяет вытянуть металл пластическим деформированием без нарушения рельефного рисунка. Такое прессование не требует предварительного скашивания прямых углов матрицы. Практически в них происходит мягкое выравнивание формы за счет упругой подложки. Матрица пуансон не требует смазки так как силы трения на внутренней поверхности способствуют равномерному обжатию и создают эффект всестороннего сжатия препятствующего отрыву и разрушению листового материала в опасных сечениях. Полученный эффект имеет важное значение для материалов с дискретной структурой [2], например, плоских (тонких) деревянных образцов, расслоение которых также исключается сложной формой пуансона и для которых не рекомендуется (опять же из полученного опыта) упругая подложка в силу податливости волокнистой структуры (рис. 4) [3].



Рисунок 4 – Рабочая обстановка в процессе прессования на гидравлическом прессе (а) и рельефные оттиски на латунных, медных и деревянных образцах (б)

Аналогичная методика используется в ювелирной практике, когда одностороннее прессование рельефного изображения производится на свинцовой подложке забивающей углы и исключаяющей тем самым разрыва металла. Упругая подложка для прессования обладает много разовым использованием и позволяет применять для нее относительно менее прочный материал в отличие от соответствующих стандартам инструментальных 8А, У10А сталей (при напряжении сжатия 1600 МПа) и высоколегированных сталей марок Х12М, 9ХС и др. (при напряжении сжатия 1900 МПа [8]) так как подвергается небольшим нагрузкам до 5 тс (напряжение сжатия менее 50 кгс/см²) за счет податливости упругой подложки.

Заключение

Возможность изготовления матрицы с помощью фрезерного оборудования с числовым программным управлением существенно расширит границы применения технологии прессования для изготовления мелкосерийных или отдельных уникальных деталей без организации промышленного производства (т.е. практически на уровне малого бизнеса в условиях ремонтного бокса и небольшого пресса мощностью до 5 т).

Ресурс упругой резиновой подложки в нашем случае толщиной 15 мм ограничен величиной сжимающей нагрузки, которая зависит от прочностных характеристик листового металла. Получаемый оттиск практически не требует дополнительной обработки, а именно шлифования, так как обладает, если можно так выразиться, естественной полировкой за счёт не только качественного рельефа матрицы (благодаря цифровым технологиям), но и сглаженных за счет мягкого выдавливания вытянутых углов и форм.

Авторы выражают благодарность Михайлову Владимиру Ильичу и Шевелеву Владиславу Константиновичу – мастерам производственного обучения НОТЦ СС МГУ им. адм. Г.И. Невельского за техническую помощь и консультирование в разработке технологии прессования на упругой подложке.

Список литературы

1. Александров А.В. Соппротивление материалов. / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин; под ред. А.В. Александрова. – 3-е изд. Испр. – М: Высш. Шк., 2003. – 560 с.
2. Оборин, В. А. Масштабно-инвариантные закономерности эволюции структуры и оценка надежности алюминиевых сплавов при последовательных динамических и усталостных

- нагрузениях / В. А. Оборин, М. В. Банников, О. Б. Наймарк // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. – 2010. – № 2. – С. 87-97. – EDN NCXAVF.
3. Славгородская А.В., Андреев В.В. Исследование технологии модифицирования различных пород дерева прессованием для ее применения в создании художественных изделий // Молодежь и научно-технический прогресс: Материалы региональной научно-практической конференции. Научное электронное издание, Владивосток, май-июнь 2024 года. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2024.
 4. Славгородская А.В. Роль компьютерного дизайна в развития технологий энергосбережения и ответственного производства морской техники. Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы: материалы региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Владивосток, 28 декабря 2022 г. – 20 января 2023 г. /Под общ. Ред. Р.А. Полькова. – Владивосток : Изд-во Дальневост. Федерал. Ун-та, 2023. – 1 CD-ROM ; [724 с.]. – Загл. С титул. Экр. – ISBN 978-5-7444-5477-7. – DOI <https://doi.org/10.24866/7444-5477-7>.
 5. Славгородская А В. Подготовка изготовления литейной формы гребного винта с волнистыми лопастями. Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы: материалы региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Владивосток, 28 декабря 2022 г. – 20 января 2023 г. / под общ. Ред. Р.А. Полькова. – Владивосток: Изд-во Дальневост. Федерал. Ун-та, 2023. – 724 с. – ISBN 978-5-7444-5477-7.
 6. ГОСТ 16675-80 ТУ ОКП 399800 Пуансоны, матрицы, державки, подкладные плитки и шпонки штампов для разделительных операций.
 7. Все о современном прессовании металла // Металлообрабатывающая компания VT-METALL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/3FRsDa> (дата обращения: 24.12.2024).
 8. Каталог металлопроката: сплав Д16Т // Компания «Фокс металл» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/3FRsBn> (дата обращения: 24.12.2024).
 9. Фреза концевая твердосплавная HRC65 4 зуба 20*45*20*100*4F для фрезерного станка по металлу с ЧПУ (CNC) // Компания HYPOWER [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/3FRs7y> (дата обращения: 24.12.2024).
 10. Станки с ЧПУ Моделист российского производителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/3FRsHq> (дата обращения: 24.12.2024).

Поступила в редакцию 12 ноября 2024 г.

Исследование жидкостной пленочной нейтрализации выбросов твердых частиц в судовой энергетике

Садыков Руслан Ханафьевич ¹, аспирант, e-mail: sadykov_rh@bk.ru

Стаценко Владимир Николаевич ¹, д.т.н., профессор, e-mail: statsenko_vni@dvfu.ru

Рудометов Илья Дмитриевич ¹, e-mail: rudometov.id@dvfu.ru

¹ Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Для снижения концентрации вредных аэрозолей (твердых мелкодисперсных частиц) в выбросах судовой энергетике предлагается использование жидкостной нейтрализации, при которой организовано пленочное течение жидкости по вертикальным пластинам. При движении газов или загрязненного твердыми мелкодисперсными частицами воздуха между пластинами, пленка жидкости интенсивно абсорбирует газообразные и твердые загрязняющие вещества. На экспериментальном стенде проведено исследование интенсивности абсорбции в пленку воды аэрозолей твердых мелкодисперсных частиц. В экспериментах изменялись скорость газа, расход жидкости, концентрация вредных веществ в газе. В результате анализа полученных результатов было составлено обобщение полученных результатов в диапазоне изменения концентраций аэрозолей, расходов жидкости и скорости движения загрязненного аэрозолями газа; обобщение получено в виде зависимости между числами Шервуда, Рейнольдса и Шмидта. По этим зависимостям возможно рассчитать коэффициенты массоотдачи при различных длинах контакта и габаритные характеристики нейтрализатора вредных выбросов.

Ключевые слова: газовые выбросы, судоходство, жидкостная нейтрализация, пленка, вода, абсорбция, экспериментальный стенд, аэрозоли, критериальное обобщение.

Investigation of liquid film neutralization of particulate emissions in marine power engineering

Sadykov Ruslan Kh. ¹, postgraduate student, e-mail: sadykov_rh@bk.ru

Statsenko Vladimir N. ¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: statsenko_vni@dvfu.ru

Rudometov Ilya D. ¹, e-mail: rudometov.id@dvfu.ru

¹ Polytechnical Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok

To reduce the concentration of harmful aerosols (solid fine particles) in emissions from marine power engineering, it is proposed to use liquid neutralization, in which a film flow of liquid is organized along vertical plates. When gases or air contaminated with solid fine particles move between the plates, the liquid film intensively absorbs gaseous and solid pollutants. A study of the intensity of absorption of aerosols of solid fine particles into a water film was conducted on an experimental stand. In the experiments, the gas velocity, liquid flow rate, and concentration of harmful substances in the gas were changed. As a result of the analysis of the obtained results, a generalization

of the obtained results in the range of changes in aerosol concentrations, liquid flow rates, and the velocity of movement of gas contaminated with aerosols was compiled; the generalization was obtained in the form of a relationship between the Sherwood, Reynolds, and Schmidt numbers. Using these dependencies, it is possible to calculate the mass transfer coefficients at different contact lengths and the overall characteristics of the neutralizer of harmful emissions.

Keywords: gas emissions, shipping, liquid neutralization, film, water, absorption, experimental setup, aerosols, criterial generalization.

Интенсивность развития морского судоходства – пассажиро- и грузоперевозок, рыбодобычи, обслуживания судов, - все эти аспекты привели к созданию принципиально нового гражданского флота с мощными энергетическими установками. Эксплуатация таких судов зачастую сопровождается ростом негативного влияния на окружающую среду, особенно загрязнение атмосферы.

Основной вклад в загрязнение атмосферы приносят газовые выбросы, а именно: вентиляционные пары топливных и сточных цистерн, картеров двигателей и редукторов, утечки хладагентов, испарения лакокрасочных материалов, растворителей и т.п., образующиеся как при нормальной эксплуатации технических средств, так и при техническом обслуживании и ремонтах. Основными загрязнителями являются, поступающие с судов, отработавшие газы главных и вспомогательных двигателей (дизелей), дымовые газы котлоагрегатов и инсинераторов, а также газовые выбросы, образующиеся при работе судовых систем, вентиляция помещений судна [1, 2].

В настоящее время ситуация на флоте осложняется внедрением тяжелых сернистых сортов топлива, по экономическим причинам вытесняющих дизельное. Это приводит к ухудшению рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания, снижению долговечности и износ деталей топливной системы, цилиндро-поршневой группы двигателя, что дополнительно увеличит общую эмиссию мелкодисперстных частиц.

Основными агентами загрязнений служат выбросы окислов серы, окислов азота, окислов углерода, а также твердые мелкодисперстные частицы.

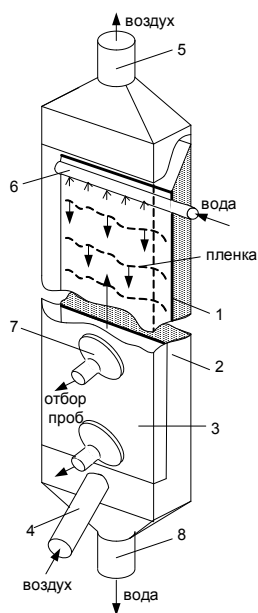
Приложение VI МАРПОЛ ограничивают выбросы окислов серы и азота в 12-ти мильной морской зоне, содержание серы в жидком топливе, используемом на судах в районах контроля выбросов, не должно превышать 1,5 % [3].

Из применяемых методов жидкостной нейтрализации наибольшую степень извлечения токсичных газов и аэрозолей имеет химическая абсорбция, а наибольшее распространение, как наиболее простой, дешевый и доступный имеет физическая абсорбция, абсорбентом в которой используется обычная пресная вода [4].

Цель настоящей статьи – обобщить в критериальной форме полученные в результате эксперимента данные по интенсивности снижения концентрации твердых мелкодисперстных частиц в результате контакта с пленкой пресной воды.

Описание технического решения, методики измерения параметров

Для исследования физических процессов, происходящих в жидкостном пленочном нейтрализаторе, проведены опыты на лабораторной установке, в которой на латунной пластине длиной 600 мм было организовано пленочное течение пресной воды (рис. 1) [5, 6]. На этой установке определена зависимость изменения концентрации аэрозолей с разными плотностями: АО6, ПХ1М, ПТЮ5Н и керамика при противоточном восходящем движении воздушного потока с аэрозолями и нисходящим течением пленки воды по поверхности вертикальных пластин.



а

б

Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) лабораторной установки:

1 – рабочая пластина; 2 – корпус; 3 – крышка; 4 – патрубок подачи аэрозольного потока; 5 – выходной патрубок; 6 – пленкообразователь; 7 – отбор проб; 8 – слива отработанной воды

Результаты экспериментов и обработка результатов

В результате анализа данных по абсорбции аэрозолей, полученных в лабораторной установке, можно сделать важный вывод (рис. 2, а): осаждение аэрозольных частиц происходит на относительно небольшом участке длины контакта 0,3–0,4 м. Интенсивность осаждения значительно снижается с увеличением начальной концентрации частиц в потоке, с увеличением их плотности и скорости воздушного потока. При этом концентрация частиц аэрозолей снижается на 60–100%.

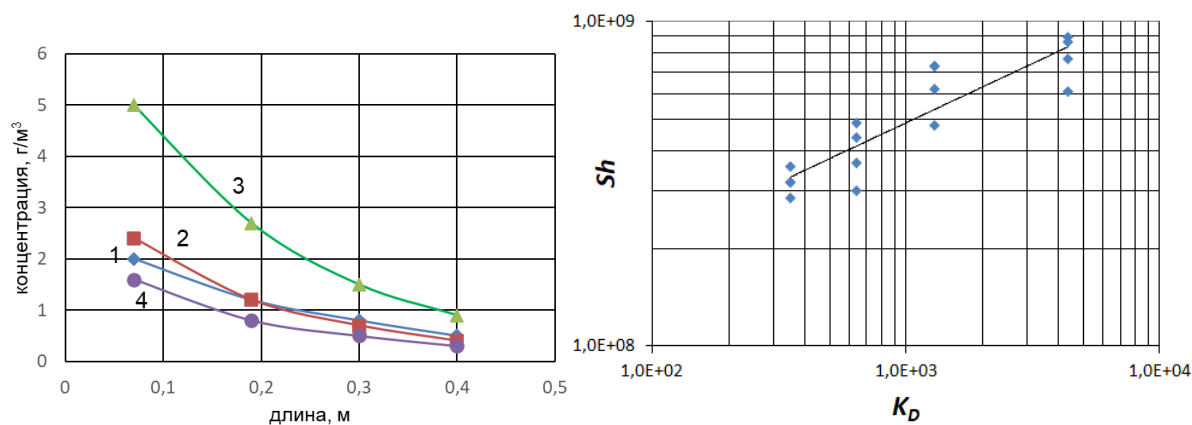


Рис. 2. Снижение концентрации аэрозолей по длине контакта с пленкой воды, критериальная обработка (б):
1 – АО6; 2 – ПХ1М; 3 – ПТЮ5Н; 4 – керамика

Обобщение результатов исследований абсорбции аэрозолей в пленку жидкости произведено в системе безразмерных критериев, аналогичных представленным в [6] для обобщения токсичных составляющих газов CO , CO_2 и SO_2 .

В качестве характеристик процесса абсорбции используются критерии Re_{Γ} (газовый) и $Re_{пл}$ (пленочный)

$$Re_{\Gamma} = \frac{V_{\text{воз}} d_{\text{экв}}}{\nu_{\Gamma}}, \quad Re_{\text{пл}} = \frac{\Gamma_v}{\nu_{\text{пл}}}, \quad d_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}, \quad \Gamma_v = \frac{G_v}{\Pi}, \quad (1)$$

где $d_{\text{экв}}$ - эквивалентный диаметр, м; S - площадь сечения рабочего канала, м²; Γ_v - орошение пластины, м²/с; G_v - объемный расход пленки, м³/с; Π - смоченный периметр, м; ν_{Γ} , $\nu_{\text{пл}}$ - кинематические вязкости воздуха и пленки, м²/с.

Результаты обработки наших данных по локальным значениям абсорбции аэрозолей в пленке пресной воды в широком диапазоне изменения критериев Re_{Γ} , $Re_{\text{пл}}$ представлены на рисунке 2. Критерий K_D , на графиках представляет собой комплекс критериев

$$K_D = Re_{\Gamma}^{0,6} \cdot Re_{\text{пл}}^{0,15} \cdot Sc^{0,33} \left(\frac{\delta}{L} \right) \quad (2)$$

Критериальное уравнение, описывающее результаты наших экспериментов по абсорбции аэрозолей в пленку воды для локальных значений на каждом участке рабочего канала имеет вид

$$Sh = 4 \cdot 10^7 Re_{\Gamma}^{0,22} \cdot Re_{\text{пл}}^{0,055} \cdot Sc^{0,12} \cdot \left(\frac{\delta}{L} \right)^{0,366} \quad (3)$$

Здесь $Sh = \frac{\beta \cdot \delta}{\rho \cdot D}$ - число Шервуда; $\beta = \frac{g_{\Gamma}}{\Delta C}$ - коэффициент массоотдачи, кг/м²·с; $g_{\Gamma} = \frac{G_{\text{аб}}}{S_{\text{аб}}}$ - удельный поток абсорбированного газа, кг/(м²/с); $G_{\text{аб}}$ - поток абсорбированного газа, кг/с; $S_{\text{аб}} = \Pi \cdot \Delta L$ - площадь абсорбции, м²; Π - смоченный периметр, м; ΔL - участок канала, м; ΔC - концентрационный напор (движущая сила абсорбции), кг/кг; ρ - плотность среды, кг/м³; δ - толщина пленки, м; L - длина контакта, м; $Sc = \frac{\nu_{\text{пл}}}{D}$ - число Шмидта; D - коэффициент диффузии, м²/с.

В расчетах критериев Re_{Γ} , $Re_{\text{пл}}$ и Sc использованы экспериментальные и справочные данные. Коэффициент диффузии аэрозолей в воде зависит от их размера, в данной работе этот коэффициент определялся экстраполяцией для размеров частиц, используемых в экспериментах, и задавался значением $D=8 \cdot 10^{-17}$ м²/с.

Погрешность обобщения наших данных составляет ± 15 %.

По полученному критериальному уравнению возможно рассчитать значения коэффициентов массоотдачи и поток абсорбции аэрозолей в пленку жидкости и габаритные характеристики жидкостных пленочных массообменных аппаратов в широком диапазоне изменения концентраций аэрозолей, расходов жидкости и скорости движения загрязненного воздуха или газа.

Список литературы

1. Зубрилов С.П., Ищук Ю.Г., Косовский В.И. Охрана окружающей среды при эксплуатации судов / С.П. Зубрилов, Ю.Г. Ищук, В.И. Косовский. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с: ил.

2. Курников А.С. Концепция повышения экологической безопасности судна: монография / А.С. Курников. - Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2002. – 80 с.
3. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г. (МАРПОЛ) и Протокол 1978 г. – Введ. 2.10.1973 – М.: ЦРИА «Морфлот», 1980. – 364 с.
4. Очистка технологических газов / под ред. Т.А.Семеновой. 2-е изд. перераб, и доп. М.: Химия, 1977. 488 с.
5. Стаценко В.Н., Волегов Д.А., Бернавская М.В. Снижение концентрации аэрозольных выбросов методом жидкостной пленочной нейтрализации. Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2020. № 4(45). С. 58–66.
6. Стаценко В.Н., Садыков Р.Х., Гридасов А.В. Исследование жидкостной пленочной нейтрализации сварочных газовых выбросов (научно-технический журнал университета им. Вернадского) №1 (91) с.25-34.

Поступила в редакцию 12 ноября 2024 г.

Расчетная методика выбора судовых теплообменников

Стаценко Владимир Николаевич ¹, д.т.н., профессор, e-mail: statsenko_vni@dvfu.ru

Гаврилов Владислав Павлович ¹, м.н.с., e-mail: gavrilov.vp@dvfu.ru

¹ Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Представлена технология выбора судовых теплообменников из ОСТ ВД5.4254-86 по условной площади теплообмена, которая в этом стандарте задается с довольно большим шагом. Соседние значения площадей могут отличаться друг от друга в 1,5 - 2 раза. Это позволяет заключить, что для расчета необходимой площади теплообмена возможно использовать методики с упрощением сложных расчетов теплообмена. В предлагаемой методике площадь теплообмена рассчитывается по приближенной методике на основе исходных данных: расхода охлаждаемой среды, её температуры, необходимого перепада температур для охлаждения, расхода и температуры охлаждающей среды.

По представленной методике проведены расчеты площадей теплообмена для разных сочетаний исходных параметров при охлаждении воды, масел турбинного и веретенного. Сопоставление расчетных значений площадей теплообмена и представленных в стандарте табличных данных показывает, что их отличие не превышает 5-20 %.

Ключевые слова: судовой теплообменник, стандарт, приближенная методика, площадь теплообмена, исходные данные, вода, масло турбинное и веретенное.

Calculation method for selecting marine heat exchangers

Statsenko Vladimir N. ¹, e-mail: statsenko_vni@dvfu.ru

Gavrilov Vladislav P. ¹, e-mail: rudometov.id@dvfu.ru

¹ Polytechnical Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok

The technology of selection of marine heat exchangers from OST VD5.4254-86 by the conventional heat exchange area, which in this standard is specified with a fairly large step, is presented. Adjacent area values may differ from each other by 1.5 - 2 times. This allows us to conclude that for calculation of the required heat exchange area it is possible to use methods with simplification of complex heat exchange calculations. In the proposed method, the heat exchange area is calculated by an approximate method based on the initial data: flow rate of the cooled medium, its temperature, the required temperature difference for cooling, flow rate and temperature of the cooling medium. According to the presented method, heat exchange areas were calculated for different combinations of initial parameters when cooling water, turbine and spindle oils. Comparison of the calculated values of heat exchange areas and the tabular data presented in the standard shows that their difference does not exceed 5-20%.

Keywords: marine heat exchanger, standard, approximate method, heat exchange area, initial data, water, turbine and spindle oil.

Судовое энергетическое оборудование имеет различный набор теплообменных аппаратов - охлаждения пресного контура главного двигателя, охлаждения масла, нагрева морской и пресной воды для бытовых целей и многие другие.

Для этой цели используются теплообменные аппараты, выпускаемые в соответствии с отраслевым стандартом, например ОСТ ВД5.4254-86 "Охладители масла и воды судовые кожухотрубчатые с прямыми трубами. Технические условия". В этом стандарте устанавливаются основные типы, параметры и размеры теплообменников. В табличном виде приведены данные по схемам подвода и отвода рабочих сред, количеству охлаждающей и охлаждаемой сред, количеству и размеру теплообменных труб, конструктивным размерам всего теплообменника в целом, его массе в сухом и рабочем состоянии. Также приведен перечень материалов, использованных в теплообменниках.

Одним из основных параметров теплообменника, определяющим его выбор из всего ряда теплообменников, является площадь теплообмена. Анализ данных по этому параметру показывает, что теплообменники выпускаются с довольно большим шагом. Типоразмеры условной площади теплообмена (m^2) теплообменников типа ОКН (охладители воды и масла) по ОСТ ВД5.4254-86 приведены в следующем ряде [1]: 0,2; 0,8; 1,0; 2,5; 3,7; 7,5; 9,7; 15,8; 17; 26,9; 58,0; 90,0; 108; 190; 220; 265; 376. Соседние значения площадей могут отличаться друг от друга в 1,5 - 2 раза.

При проектировании и особенно при ремонте и модернизации судового оборудования возникает необходимость выбора стандартных теплообменников. Исходными параметрами, которые имеются у проектанта являются - расход охлаждаемой среды G' , её температура и необходимый перепад температур для охлаждения $\Delta t'$, расход G'' и температура охлаждающей среды. Для судовых условий в качестве охлаждаемой среды может быть пресная или морская вода и масло, в качестве охлаждающей - морская вода.

Описание технического решения, методики расчетов

При конструкторском расчете обычно находится необходимая площадь теплообмена теплообменника, при которой обеспечиваются необходимые параметры охлаждаемой и охлаждающей среды. В этот расчет входит определение количества теплоты передаваемой охлаждающей среде, определение среднего логарифмического температурного напора, коэффициентов теплоотдачи от охлаждаемой среды к теплообменной стенке и от неё к охлаждающей среде, общего коэффициента теплопередачи. При этом учитываются теплофизические параметры сред (плотность, теплоемкость, теплопроводность, вязкость), геометрические параметры теплообменных поверхностей, гидродинамические характеристики теплоносителей, направления их взаимного движения и многие другие параметры. Обычно этот расчет достаточно сложен и имеет высокую трудоемкость.

Это не оправдывается тем, что после расчета рабочая площадь теплообмена выбирается из типоразмера теплообменников с значительным отличием двух соседних значений. Это позволяет заключить, что для расчета необходимой площади теплообмена возможно использовать приближенные методики с упрощением сложных расчетов теплообмена и температурного напора.

В настоящей работе предложена такая методика, основанная на обобщении контрольных параметров охладителей типа ОКН, приведенных в отраслевом стандарте ОСТ ВД5.4254-86.

При этом обобщении были использованы стандартные формулы расчета теплообмена в теплообменниках. Для упрощения расчета температурный напор определялся как среднеарифметический

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{ex} - \Delta t_{вых}}{2} \quad (1)$$

где Δt_{ex} , $\Delta t_{вых}$ - температурные напоры между средами на входе и выходе из теплообменника. При использовании этих значений при $\Delta t_{вых} / \Delta t_{ex} > 0,6$ погрешность расчета по сравнению с расчетом среднелогарифмического напора не превышает 3 % [2].

Из табличных данных контрольных параметров в стандарте выбраны соответствующие значения площади теплообмена S_l (м), перепад температур вход-выход $\Delta t'$ и расход G' (кг/с) охлаждаемых сред, температуру на входе ($^{\circ}\text{C}$) и расход G'' (кг/с) охлаждающей среды. Затем, используя баланс теплоты в теплообменнике, определяется температура охлаждающей среды на выходе ($^{\circ}\text{C}$)

$$t_2'' = t_1'' + \frac{G' \Delta t'}{G''} \quad (2)$$

и средний арифметический температурный напор ($^{\circ}\text{C}$)

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t' (1 - G' / G'') - 2t_1''}{2} \quad (3)$$

Обобщение всех контрольных параметров производилось зависимостью комплекса M от расхода охлаждаемой среды G' . В качестве комплекса использовалось соотношение

$$M = S \frac{\Delta t_{cp}}{\Delta t'} \quad (4)$$

Результаты обобщения данных по воде, турбинному и веретенному маслам приведены на рис. 1. Эти данные описываются аппроксимирующими зависимостями:

- для воды

$$M = -0,234 G'^2 + 4,4 G' + 0,53, \quad (5)$$

- для турбинного масла

$$M = -0,632 G'^2 + 10,5 G' - 6,77 \quad (6)$$

- для веретенного масла

$$M = -0,2 G'^2 + 4,5 G' - 0,82. \quad (7)$$

Достоверность аппроксимации для воды составляет $R^2=0,84$, для турбинного масла $R^2=0,79$ и для веретенного масла $R^2=0,98$.

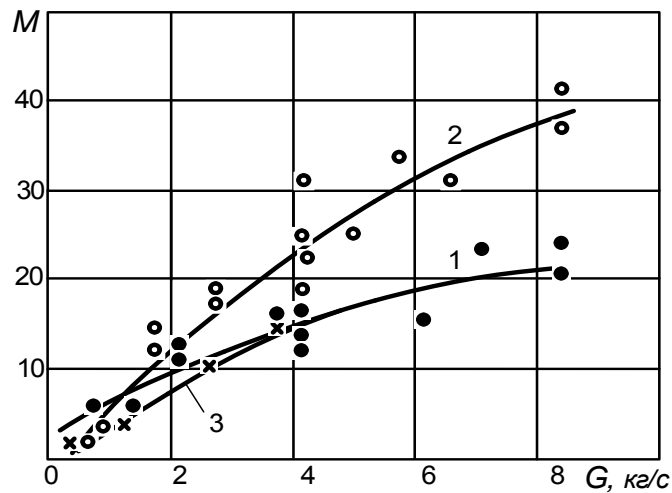


Рис.1. Обобщение данных по теплообменникам для воды и масла;
1 – вода; 2 – мало турбинное; 3 – масло веретенное

Таким образом, выбор необходимой площади теплообмена должен производиться по следующей схеме.

1. Для заданного расхода охлаждаемой среды G' (кг/с) по зависимостям (5-7) находится комплекс M .
2. Для заданных перепада температур $\Delta t'$ (°C) и расхода G' (кг/с) охлаждаемой среды, температуры на входе (°C), расхода G'' (кг/с) охлаждаемой среды по зависимости (3) находится средний арифметический температурный напор (°C).
3. Из комплекса M (4) находится необходимая площадь теплообмена (m^2)

$$S = \frac{M \Delta t'}{\Delta t_{cp}} \quad (8)$$

4. Из таблиц отраслевого стандарта [1] выбирают теплообменник с ближайшим значением площади теплообмена.

Результаты расчетов

Сравнение исходных данных по площади теплообмена и рассчитанных по зависимости (8) приведено в таблице 1.

Сравнение табличных данных по площади теплообмена и рассчитанных по зависимости (8) при охлаждении воды, масел турбинного и веретенного приведены в таблицах 1-3.

Таблица 1

Сравнение табличных и расчетных данных по площади теплообмена при охлаждении воды

$S_{\text{таб}}, m^2$	Вода пресная				Вода охлаждающая		Площадь теплообмена	
	$G', \text{ кг/с}$	$t'_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$t'_2, \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t', \text{ }^\circ\text{C}$	$G'', \text{ кг/с}$	$t''_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$S_{\text{расч}}, m^2$	$DS, \%$
0,7	0,16	50	35	15	1,38	2	0,46	33

0,7	0,22	90	48	42	2,77	2	0,95	36
1,2	0,13	100	65	35	0,83	30	0,77	35
2,5	0,3	45	40	5	4,16	39,5	3,24	29
2,5	0,88	18,5	15,0	3,5	1,94	9	2,12	15
2,6	2,77	30	25	5	4,72	7	2,86	10
3,4	0,83	36	22	14	2,78	15	4,72	39
4,1	3,88	37	35	2	6,94	28	3,78	7,7
4,1	6,11	37	35	2	8,33	28	5,14	25
4,1	2,78	37	35	2	6,94	28	2,88	29
4,1	2,79	37	35	2	6,94	28	2,89	29
4,1	6,12	37	35	2	8,33	28	5,14	25
4,1	6,13	37	35	2	8,33	28	5,15	25
7,7	8,33	90	76	14	8,33	32	6,66	13
7,7	8,34	90	73	17	13,9	30	7,67	0,3
9,7	2,22	85	44	41	17,5	28	11,06	14
9,7	11	75	60	15	11,1	28	9,64	0,5
9,7	2,24	85	45	40	17,5	30	11,35	17
9,7	2,25	85	54	31	17,5	21,4	6,21	35,9
14,6	4,16	51,7	45	6,7	6,38	40	16,06	10,0
14,6	6,94	38	35	3	6,94	30	11,87	18,6
14,6	4,15	47	36	11	8,33	28	15,08	3,3

Таблица 2

Сравнение табличных и расчетных данных
по площади теплообмена при охлаждении масла веретенного

$S_{\text{таб}}, \text{м}^2$	Масло веретенное				Вода охлаждающая		Площадь теплообмена	
	$G', \text{кг/с}$	$t_1', \text{°C}$	$t_2', \text{°C}$	$\Delta t', \text{°C}$	$G'', \text{кг/с}$	$t_1'', \text{°C}$	$S_{\text{расч}}, \text{м}^2$	$DS, \%$
0,16	0,4	57,7	55	2,7	0,4	32	0,111	30
0,16	0,7	58	56,5	1,5	0,55	32	0,137	13
0,16	0,7	56,5	55	1,5	0,7	34	0,159	0,3
2,5	3,58	50	47	3	4,16	32	2,51	0,4
2,5	0,95	70	50	20	2,38	30	2,51	0,7

2,5	1	60	40	20	2,77	20	2,63	5,4
15,8	1,11	40	30	10	4,16	25	4,53	71

Таблица 3

Сравнение табличных и расчетных данных
по площади теплообмена при охлаждении масла турбинного

$S_{\text{таб}}, \text{ м}^2$	Масло турбинное				Вода охлаждающая		Площадь теплообмена	
	$G', \text{ кг/с}$	$t_1', \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2', \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t', \text{ }^\circ\text{C}$	$G'', \text{ кг/с}$	$t_1'', \text{ }^\circ\text{C}$	$S_{\text{расч}}, \text{ м}^2$	$DS, \%$
15,8	4,16	65	50	15	11,1	25	13,12	16
15,8	4,44	70	55	15	13,8	25	11,71	25
15,8	8,33	52	40	12	11,1	15	16,68	5,5
15,8	8,33	52	45	7	11,1	28	14,43	8,6
15,8	4,36	60	48	12	19,4	20	9,92	37
15,8	4,16	65	47	18	11,1	25	16,92	7,1
15,8	2,77	55	35	20	6,97	20	16,61	5,1
17,9	2,7	55	35	20	6,94	20	16,08	10
17,9	1,8	120	40	80	6,94	20	16,25	9
17,9	1,8	110	40	70	6,94	20	15,37	14
17,9	2,22	120	40	80	15,2	24	21,41	19
17,9	2,22	120	46	74	15,2	32	21,79	21
26,9	4,16	56	40	16	13,8	32	30,58	13
26,9	5	56	40	16	27,7	32	32,90	22
27	2,7	132	50	82	11,1	30	27,28	1,0
27	2,7	120	35	85	11,1	20	30,59	13
54	6,55	120	35	85	25	20	63,96	18
54	5,55	132	50	82	25	30	50,62	6,2

Заключение

Сопоставление представленных табличных и расчетных значений площадей теплообмена показывает, что их отличие не превышает $DS=5-20\%$.

Результаты настоящей работы получены для расходов охлаждающих сред до 8 кг/с (30 т/ч). Для более высоких значений расходов погрешность предложенных аппроксимирующих формул (5-7) значительно возрастает.

Предложенная методика может быть использована для выбора теплообменников без трудоемких расчетов.

Список литературы

1. ОСТ ВД5.4254-86 «Охладители масла и воды судовые кожухотрубчатые с прямыми трубами».
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия. 1973. – 319 с.

Поступила в редакцию 9 ноября 2024 г.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 656.078

Проблема достоверности информации при разработке норм ходового времени судов на внутренних водных путях

Кравцов Андрей Сергеевич ¹, студент, dogreyrange2018@gmail.com
Сорокина Мария Павловна ², менеджер по маркетингу, m.sorokina@kotlin-sc.ru
Шилкин Владимир Петрович ¹, к.э.н., доцент, shilkin.v.p@mail.ru
Шилкина Ирина Дмитриевна ¹, к.э.н., профессор, shilkina_irina@mail.ru

¹ Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О.Макарова, г. Санкт-Петербург

² ООО «Котлин СК», г. Санкт-Петербург

В ходе разработки норм следования судов по внутренним водным путям России при обработке статистической информации возникает проблема достоверности исходных данных. Используя один из вариантов логического метода контроля достоверности данных, авторы разработали алгоритм, который позволяет повысить достоверность определения типа судна по его названию. В результате использования предлагаемого алгоритма определения типа судна можно добиться большей достоверности статистических данных, необходимых для составления норм ходового времени судов по внутренним водным путям России. Это позволит более точно определять плановую (прогнозную) продолжительность рейса и повысить эффективность использования грузового флота.

Ключевые слова: нормы следования, внутренние водные пути, достоверность данных, грузовой флот.

The problem of the reliability of information in the development of standards for the running time of ships on inland waterways

Andrey Sergeevich Kravtsov ¹, student, dogreyrange2018@gmail.com
Sorokina Maria Pavlovna ², Marketing Manager, m.sorokina@kotlin-sc.ru
Shilkin Vladimir Petrovich ¹, PhD in Economics, associate Professor, shilkin.v.p@mail.ru
Shilkina Irina Dmitrievna ¹, PhD in Economics, Professor, shilkina_irina@mail.ru

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg

² ООО «Kotlin SC», St. Petersburg

During the development of standards for the navigation of ships on the inland waterways of Russia, the problem of the reliability of the initial data arises when processing statistical information. Using one of the variants of the logical method of data reliability control, the authors have developed an algorithm that allows to increase the reliability of determining the type of vessel by its name. As

a result of using the proposed algorithm for determining the type of vessel, it is possible to achieve greater reliability of statistical data necessary for compiling standards for the running time of ships on inland waterways of Russia. This will make it possible to more accurately determine the planned (forecast) duration of the voyage and increase the efficiency of using the cargo fleet.

Keywords: traffic regulations, inland waterways, reliability of data, cargo fleet.

В ходе разработки норм следования судов по внутренним водным путям России при обработке статистической информации возникает проблема достоверности исходных данных [1]. Существуют следующие методы контроля достоверности данных статистических наблюдений [2]:

- счетные методы;
- методы математической статистики;
- методы включения избыточной информации;
- логические методы.

Обработке были подвергнуты данные администраций водных путей в виде дислокации флота (название судна, местоположение, время, тип операции и направление движения). Такой источник данной информации априори можно считать достаточно надежным, но несмотря на это, данные требуют дополнительной проверки их достоверности [3]. Из всех возможных методов контроля достоверности был выбран вариант логического метода.

Для установления норм следования необходимо установление типа каждого судна, который необходимо находить только по названию судна и указывать вручную, так как согласно Приказу Министерства транспорта РФ от 15 февраля 2017 г. № 52 “Об утверждении Порядка присвоения названий судам внутреннего водного транспорта” [4] названия судов могут повторяться. Поэтому для повышения достоверности данного параметра авторами был разработан алгоритм, который будет рассмотрен далее.

Реализация алгоритма начинается с анализа операции в исходных данных. Если встречается аббревиатура «БУК» (выполняется операция “буксировка”), то данная единица флота однозначно является буксиром (фрагмент дислокации представлен на рис. 1), в противном же случае необходимо переходить к следующему этапу алгоритма.

Наименование судна	Тип судна	Дислокация	Время	Операция	Направление
Богенбай Батыр	Буксир	Астрахань	10.11.21 16:00	БУК	вверх
Богенбай Батыр	Буксир	Красноармейск	26.11.21 06:20	СЛБ	вниз

Рисунок 1 – Определение типа судна по операции

Вторым этапом является визуальная идентификация судна, для этого необходимо скопировать название судна из исходных данных и перейти в раздел «картинки» любой поисковой системы, сформировать запрос, состоящий из: названия + «судно». Если на изображениях преобладает одно и то же судно, а также можно однозначно определить его тип (как в случае изображенном на рис. 2, где видно, что это сухогруз), то на этом определение типа судна завершается.

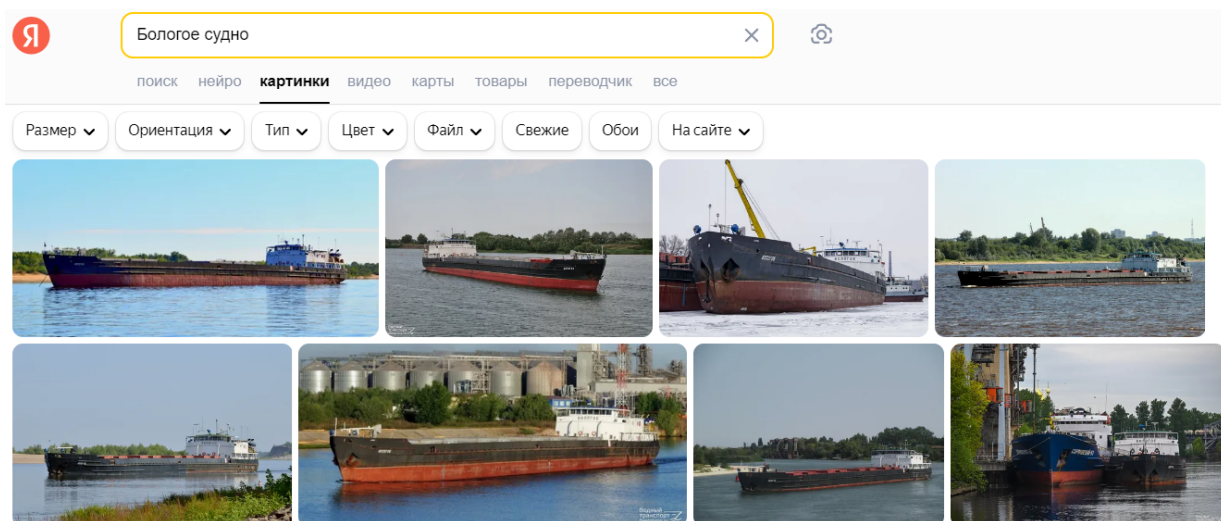


Рисунок 2 – Визуальная идентификация судна

Но бывают случаи, когда нет современных фотографий судна или когда встречаются совершенно разные суда с одинаковым названием или суда, не характерные для данных водных путей (пример приведен на рис. 3).

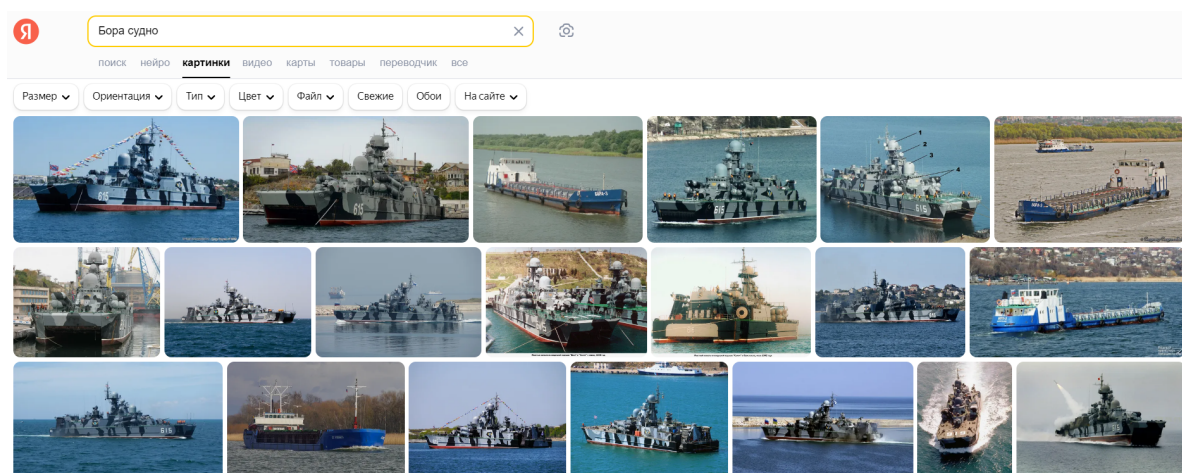


Рисунок 3 – Сложный случай визуальной идентификации судна

В таком случае необходимо проверить данное судно через электронный сервис «Водный транспорт» [5] (рис. 4), который предоставляет более расширенный поиск.

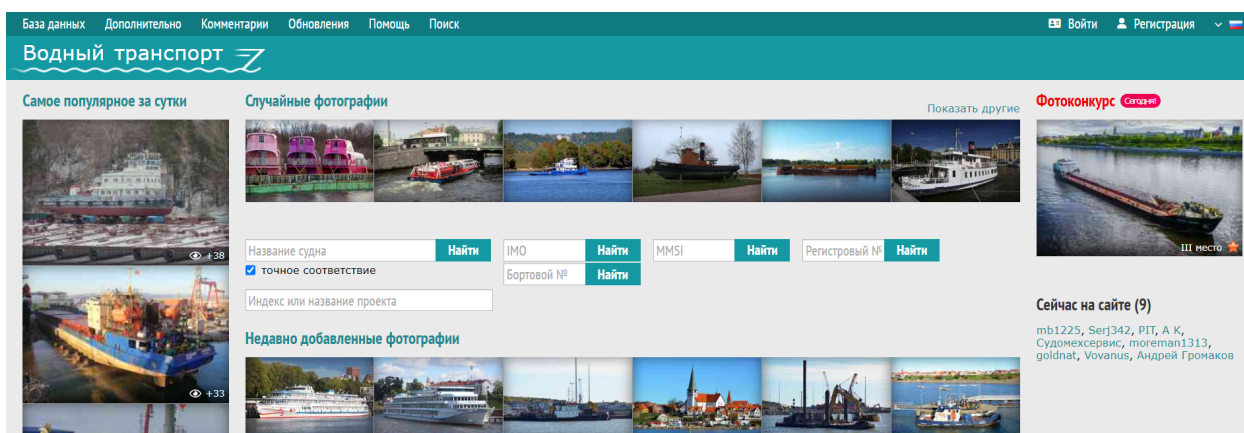


Рисунок 4 – Электронный сервис «Водный транспорт»

После ручного ввода названия судна сервис предоставляет информацию сразу по всему одноименному флоту с определенной сортировкой (рис. 5): желтым цветом (строка 1) выделены суда, которые больше не эксплуатируются, коричневым (строка 5 – 6) – судьба которых не установлена, а красным (строка 7 – 10) – которые уже утилизированы. В связи, с чем остается изучить только не выделенные суда (строка 2 – 4), переходя на их страницы. Далее можно отследить дату присвоения данного названия и сравнить её с датой исследуемой дислокации, посмотреть фотографии на изучаемую дату и сравнить геолокацию фото с дислокацией флота из исходных данных, а также увидеть тип судна или узнать его через проект.

бора	Найти	IMO	Найти	MMSI	Найти	Регистровый №	Найти
Название	Проект		Построено		Приписка		
1 Бора	Тип Сатурн / Антон Мазин, проект 04983, тип Антон Мазин, шифр «Эюйд»		04.1995		Керчь		
2 Бора	Проект МРВ-14		2012		Ленинградская область Новороссийск		
3 Бора Borghild, Jori, Волна-4	Проект 400 (ФРГ)		09.1985		Калининград Коулавогор, Наантали, Санкт-Петербург, Ленинград		
4 Бора Raba, Mareike, LYS Coast, Erkaburg, LYS Coast, Erkaburg	Тип Petena, проект (ФРГ)		15.12.1984		Астрахань Линасол, Щецин, Вилленстад, Лер		
5 Бора Нептун, Нептун-7, Нептун, Надежда, 665, (Стр. №665)	Тип Ярославец (пр. 376 всех модификаций), проект РВН-376		04.11.1970		Ростов-на-Дону Москва, Нижний Новгород, Горький		
6 Слага Бора, Sлага	Парусные и парусно-моторные яхты		1900		(Германия) ВМФ СССР, Российский Императорский флот, (Германия)		
7 Бора	Геофизические, геологические, сейсмографические		1958		Баку		
8 Бора	Проект 730, тип Аян		1958		Одесса		
9 Бора	Тип Ярославец (пр. 376 всех модификаций)				Одесса		
10 Бора Brunsholm	Тип Brunshausen - Гавана, проект (ФРГ)		03.1960		Таллин Ганбург		

Рисунок 5 – Результат обращения к электронному сервису «Водный транспорт»

В результате использования приведенного выше алгоритма определения типа судна можно добиться большей достоверности статистических данных, необходимых для составления норм ходового времени судов по внутренним водным путям России. Это позволит более точно определять плановую (прогнозную) продолжительность рейса и повысить эффективность использования грузового флота.

Список литературы

1. Шилкин В.П., Шилкина И.Д., Боград Я.А. Совершенствование информационного обеспечения планирования работы флота. Логистика: современные тенденции развития. Материалы XXII Международной научно-практической конференции, часть 2. – СПб, издательство ГУМРФ имени адмирала С.О.Макарова, - 2023. С. 260-264.
2. Статистика: учебное пособие. Часть 1. / Н. Д. Воронцова – Киров: ФГБОУ ВПО ВятГУ», 2015. – 63с
3. Байрамов Э.Ф., Шилкин В.П., Шилкина И.Д., Середетин Т.Г., Боград Я.А. Проблемы обработки диспетчерской информации при разработке норм ходового времени судов на внутренних водных путях. Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы. Материалы III Международной научно-практической конференции. – Москва, издательство Российский университет транспорта, - 2023. С. 53-57.
4. Приказ Министерства транспорта РФ от 15 февраля 2017 г. № 52 “Об утверждении Порядка присвоения названий судам внутреннего водного транспорта”
5. Электронный сервис «Водный транспорт» URL: <https://fleetphoto.ru/>

Поступила в редакцию 25 декабря 2024 г.

Динамическая сепарация навалочного груза

Мотрич Владимир Николаевич ¹, доцент кафедры судовождения, MotrichVN@msun.ru

¹ МГУ им. адм. Г. И. Невельского, г. Владивосток

На примере гибели теплохода «Bulk Jupiter» описано неизвестное ранее явление динамической сепарации навалочного груза. Рассмотрены свойства бокситов, как груза, предъявляемого к транспортировке морем, существующая технология и приведен краткий обзор нормативных документов и некоторые рекомендации по предотвращению аварий судов с навалочным грузом. За последнее десятилетие парк балкеров вырос с 10 000 судов в 2013 году до почти 12 200 к январю 2024 года и составляет более 40% мирового тоннажа. Поэтому такие рекомендации могут оказаться полезными для снижения аварийности флота.

Ключевые слова: аварии, навалочный груз, балкер.

Dynamic separation of bulk cargoes

Motrich Vladimir N. ¹, MotrichVN@msun.ru

¹ Maritime State University named after Adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok

The previously unknown phenomenon of dynamic separation of bulk cargo is described using the example of the loss of the vessel "Bulk Jupiter". The properties of bauxite as a cargo proposed for transportation by sea, the existing technology are considered and a brief overview of normative documents and some recommendations for preventing accidents of ships with bulk cargo are given. Over the past decade, the bulk carrier fleet has grown from 10,000 vessels in 2013 to almost 12,200 by January 2024 and accounts for more than 40% of the world's tonnage. Therefore, such recommendations may be useful to reduce the accident rate of the fleet.

Keywords: accidents, bulk cargoes, bulker.

Незерновые навалочные грузы в общем объеме международной морской торговле составляют 30-35%. Однако по сравнению с другими перевозками они связаны с высокой степенью риска из-за разжижения, сухого смещения или агрессивных химических свойств груза, погруженного массой. По данным Регистра Ллойда из 1035 судов, затонувших в период с 1919 по 1955 годы (исключая годы войны), навалочными грузами было загружено 570 судов.

Суда при перевозке незерновых навалочных грузов чаще всего терпели крушения в октябре-феврале, т.е. аварии при перевозках этих грузов относятся к «авариям плохой погоды», что косвенно подтверждая опасность смещения навалочного груза при усиленной качке. Ширится номенклатура навалочных грузов, перевозимых морем в качестве энергоносителей или промышленного сырья, свойства которых мало изучены.

На Конференции по охране человеческой жизни на море 1960 года проблемы, связанные с перевозкой навалочных грузов были признаны настолько серьезными, что Резолюция 55 призвала все страны-участницы Конвенции обратить на это особое внимание. Взяв за основу представленные в секретариат национальные правила перевозки США, Канады и других стран в 1965 году подкомитетом по грузам и контейнерам ИМО был разработан первый Кодекс безопасной практики перевозки навалочных грузов, носивший рекомендательный характер.

Принятие Кодекса положительно сказалось на статистике аварийности. За последующие 10 лет (1964-1974 гг.) аварийность такого рода сократилась почти в 3 раза. Этот документ претерпел много изменений, как по структуре, так и по содержанию, а с 1 января 2011 года вместе с новым названием Международный кодекс перевозки навалочных грузов (МКПНГ) он приобрел обязательную силу согласно положениям Конвенции СОЛАС.

К сожалению, за опыт перевозки навалочных грузов пришлось расплачиваться человеческими жизнями. Эти жертвы достойны, чтобы о них помнили: теплоход «Умань», теплоход «Тикси» и балкер «Bulk Jupiter», одна из крупнейших потерь XXI века.

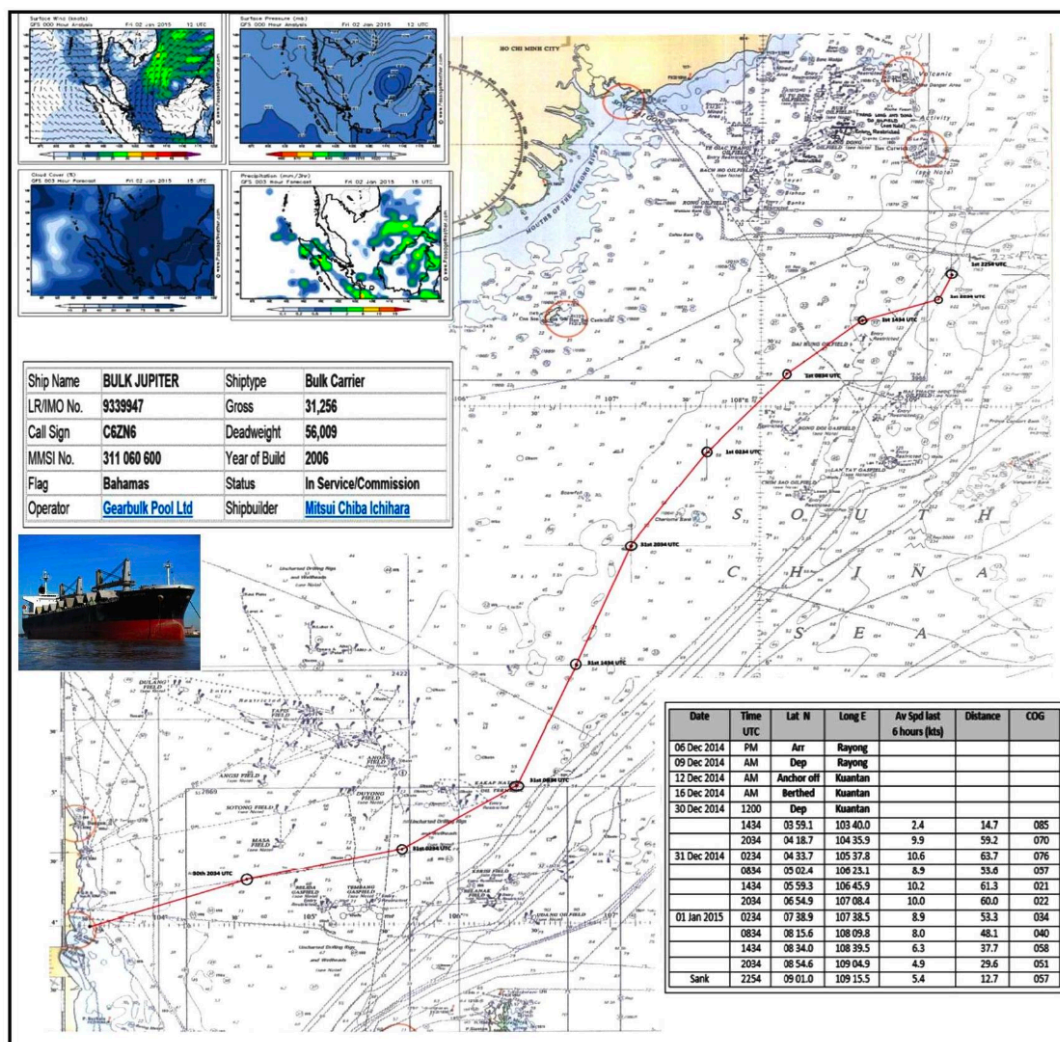


Рисунок 1 – Маршрут теплохода «Bulk Jupiter»

Теплоход “Bulk Jupiter” валовой вместимостью 31256 был построен в 2006 году на судовой верфи “Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd.” в Японии и относился к классу Handymax; его размерения (длина наибольшая 189,99 м, ширина 32,26 м, осадка по летнюю

грузовую марку 12,55 м) позволяли беспрепятственно проходить Суэцким и Панамским каналами. Корпус имел усиленный набор для перевозки руды и других тяжелых грузов, при этом допускалась чередующаяся загрузка с порожними трюмами №2 и №4. Дизельный двигатель мощностью 9480 кВт сообщал судну скорость 14,5 узлов. В августе 2011 года судно прошло полное освидетельствование на класс Nippon Kaija Kyokai (NKK) и сменило флаг с панамского на флаг Багамских островов, где находился офис судовладельца Gearbulk Shipowning Ltd, Bermuda.

В мае 2014 года в Шанхае “Bulk Jupiter” прошел докование, во время которого был произведен ремонт повреждений днища, полученных при посадке на мель в сентябре 2013 года. Последующий осмотр всех грузовых помещений и балластных танков дефектов корпуса не выявил, и техническое состояние судна было признано годным для дальнейшей эксплуатации, включая перевозку навалочных грузов, что подтверждалось выдачей всех необходимых сертификатов.

В целом судно успешно прошло ежегодную проверку администрацией государства флага. Кроме того, в соответствии с системой управления безопасностью суперинтендант компании также проинспектировал состояние корпуса и механизмов. На судне действовала компьютерная программа планового технического обслуживания AMOS и все записи об уходе за водонепроницаемыми закрытиями, палубными механизмами и спасательными средствами были в порядке.

Совершив морской переход протяженностью 603 мили, 12 декабря 2014 года “Bulk Jupiter” прибыл из порта Маптахут (Таиланд), куда доставил груз 53565 тонн угля, и прибыл на внешний рейд порта Куантан (Малайзия), где состоялась передача судна в тайм-чартер компании Winning Shipping Ltd., базировавшейся в Сингапуре. Здесь было получено распоряжение фрахтователя принять груз 46400 тонн бокситов назначением на Китай вместе с информацией о грузе и инструкциями по транспортировке.

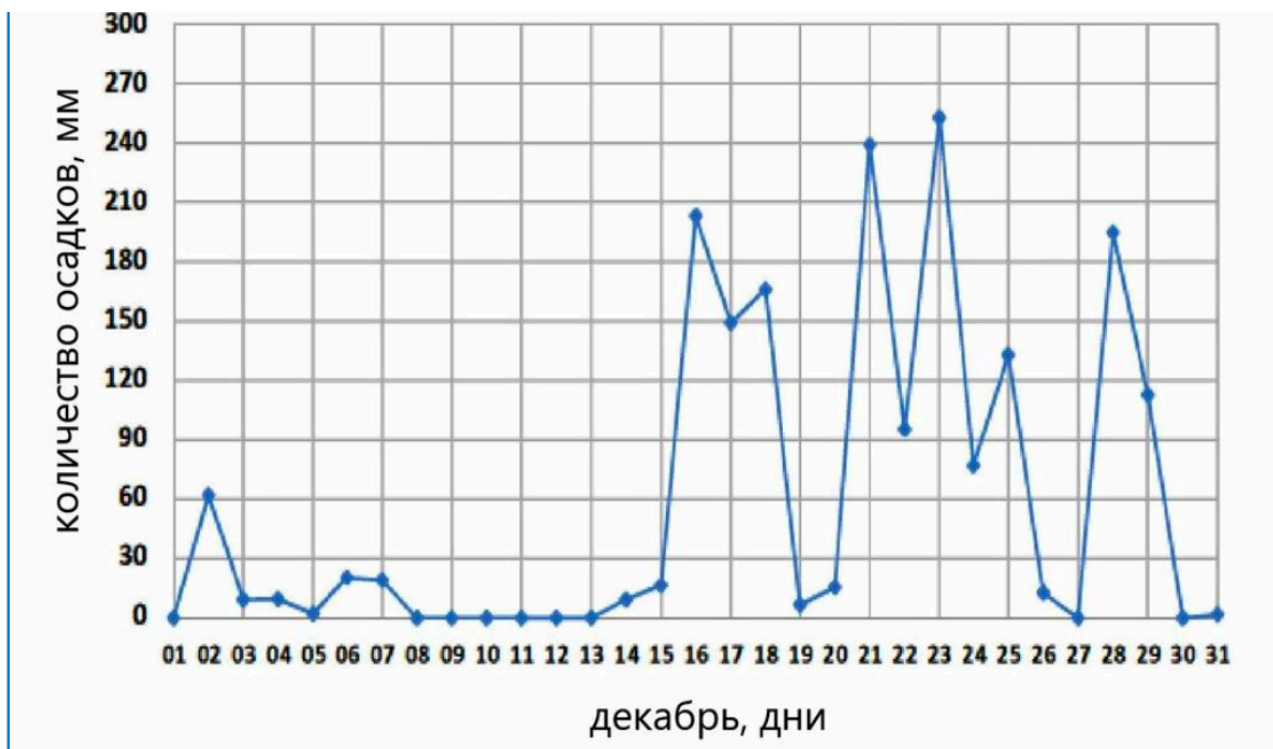


Рисунок 2 – Количество выпавших осадков в Куантане в декабре 2014 г. по данным Департамента метеорологии Малайзии

Однако судно простояло на якоре до 16 декабря в ожидании причала. Погрузка началась лишь в 22.00 местного времени (UTC+8) следующих суток судовыми средствами и продолжалась 13 дней с перерывами из-за тропических ливней и простоями из-за проблем с электродвигателями грузовых кранов. Всего потери стояночного времени в период с 17 по 30 декабря составили 202,81 часа (8.45 дней). Метеостанция Марди Сунгаи Багинг, находившаяся в 6 км от порта, зарегистрировала 1806,4 мм выпавших осадков, что превысило прежний рекорд 1915 года.

В процессе погрузки производилась штивка бульдозерами с целью равномерного распределения груза по всем пяти грузовым трюмам. Грузовые операции были завершены 30 декабря 2014 года в 21.24, и судно под проводкой лоцмана отошло от причала, имея осадку 11,2 м на ровный киль. Лоцман не заметил ничего необычного в поведении судна. Расчеты, выполненные с помощью одобренной компьютерной программы LOAD-ACE, показывали, что остойчивость и прочность судна удовлетворяла всем критериям безопасности.

Погода стояла хорошая. Шел прилив. Высота полной воды в порту Куантан составляла 2,3 м. “Bulk Jupiter” покачивался на океанской зыби с амплитудой в 2-3⁰. После того, как судно прошло последний буй, ограждающий фарватер, лоцман благополучно покинул борт судна и наблюдал, как балкер дал полный ход и лег на очередной курс 70⁰ в соответствии с планом перехода. Капитан сообщил об ожидаемом времени прихода в порт назначения Циндао 8 января 2015 года в 10.00 утра. Дальность перехода составляла 2460 миль. По пути фрахтователь планировал организовать бункеровку в порту Гонконг.

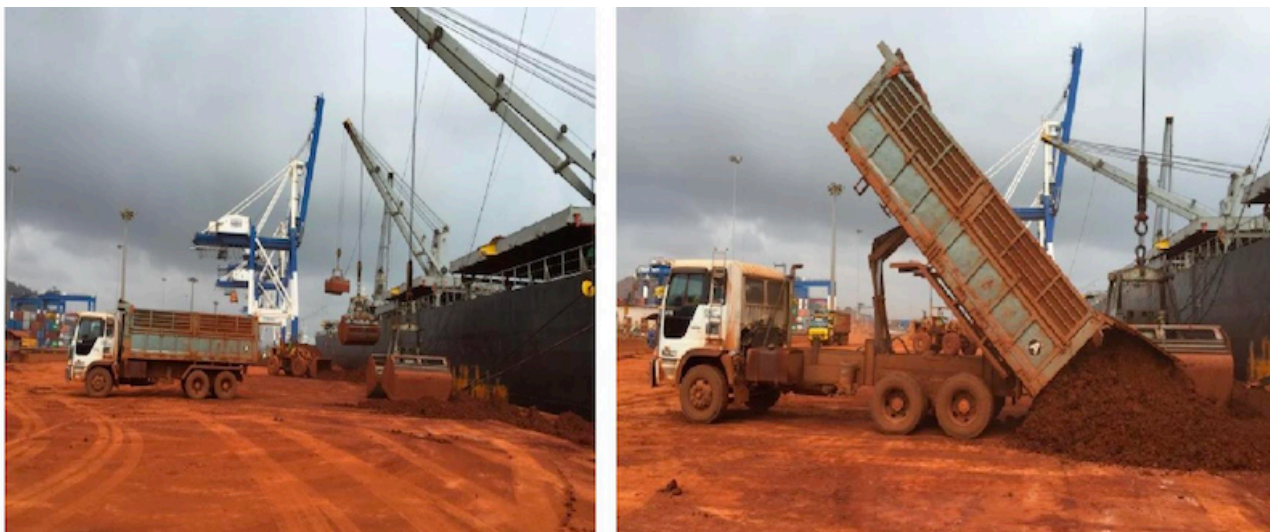


Рисунок 3 - Погрузка бокситов в порту Куантан

Судно было укомплектовано полностью филиппинским экипажем в составе 19 человек – 9 членов палубной команды, 6 членов машинной команды, 2 работника пищеблока, что даже превышало численность экипажа по Свидетельству о минимальном безопасном составе. Все члены экипажа были дипломированы в соответствии с Международной конвенцией ПДНВ-78 с поправками. Возглавлял экипаж 45-летний капитан, обладавший капитанским дипломом без ограничений, выданным Морской Администрацией Республики Филиппины 18 ноября 2008 года. Он отработал на “Bulk Jupiter” четыре контракта и имел достаточный опыт перевозки бокситов навалом в трех рейсах общей продолжительностью 300 суток.

Новый 2015 год экипаж встретил в тесном кругу в столовой команды. По словам повара, алкогольных напитков на вечеринке не было, если не считать бутылку традиционного

шампанского. 1 января в 01.30 все члены экипажа разошлись на отдых по своим каютам, а судовой повар в 6 часов утра был уже на камбузе и готовил завтрак для команды. К 23.00 31 декабря погода начала заметно портиться. Подул северо-восточный ветер силой 6-7 баллов, разогнав волну высотой 2,5-4 м. Скорость судна начала падать за каждые 3 часа на полузла. К вечеру 1 января 2015 года она составляла 4,3 узла. Можно предположить, что капитан сбавил ход намерено, чтобы избежать явление слеминга и уменьшить удары волн о корпус. Свидетельств о том, что имелись какие-либо технические проблемы с главным двигателем, не имеется.

Погода в Южно-Китайском море определялась тропической депрессией Джангми, доминировавшей над морем Сулу и медленно смещающейся на юго-запад. Утром 2 января по известному расстоянию от ватерлинии до комингса трюма №3 определили высоту волны 4,7 м. О пятиметровой волне и северо-восточном ветре 30 узлов сообщал теплоход ‘Toisa Dauntless’, следовавший в том же районе. Гидрометеоцентр FleetWeather, взявший ‘Bulk Jupiter’ под проводку по заявке фрахтователя, прислал рекомендацию изменить курс на восток и следовать в Циндао под прикрытием тайваньского берега. В ответ капитан сообщил, что получил распоряжение следовать в Гонконг, расположенный в 1020 милях к юго-западу от Циндао, и запросил новые рекомендации, рассчитывая достичь бункеровочной станции 5 января к 09:00 утра. Но в Гонконг ‘Bulk Jupiter’ не прибыл.

2 января 2015 года в 06.54 центр береговой охраны Японии принял сигнал тревоги. Неоднократные попытки связаться с аварийным судном по всем каналам связи закончились безрезультатно. Сигнал бедствия от ‘Bulk Jupiter’ немедленно был ретранслирован всем судам, и была инициирована поисково-спасательная операция.

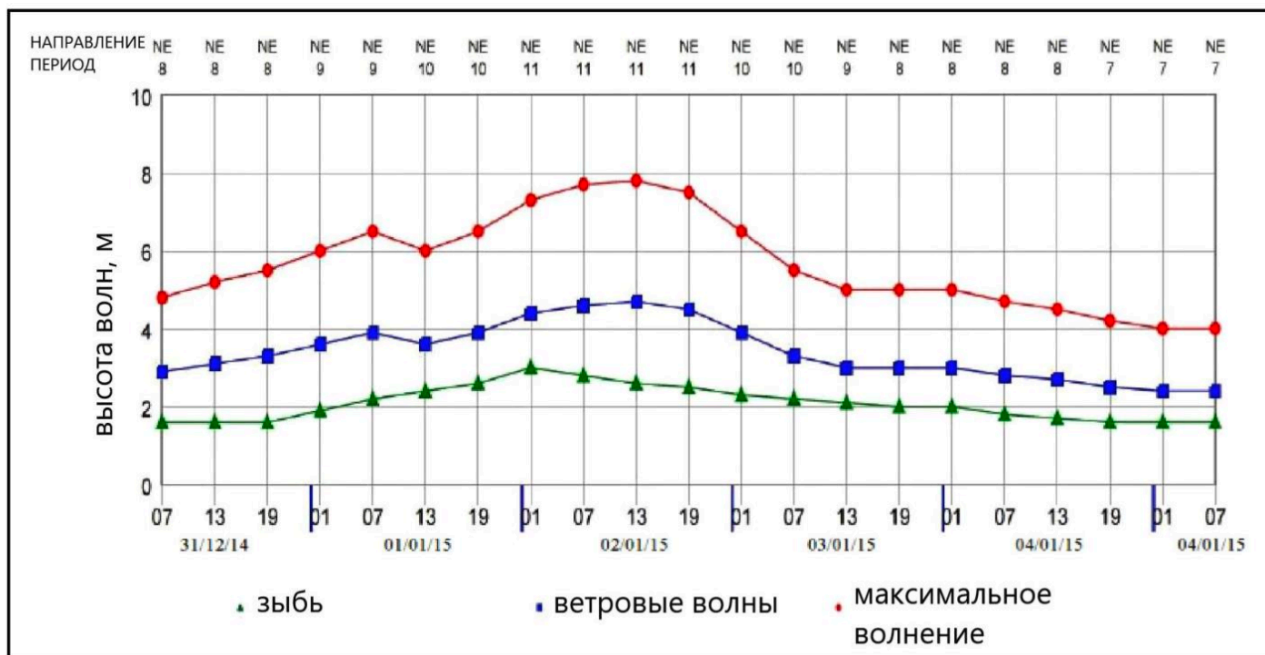


Рисунок 4 - Характеристика волнения в районе гибели ‘Bulk Jupiter’

2 января в 07.00 VINAMARINE (Vietnam Maritime Administration) был принят сигнал от аварийного радиобуя и установлены координаты судна, терпящего бедствие, которые были переданы всем станциям по системе NAVTEX.

Рассвет наступил в 07.12. Первым на место трагедии прибыл контейнеровоз ‘ZIM Asia’ под либерийским флагом, который обнаружил пустую шлюпку и спасательный плот также без людей.

В 14.10 с контейнеровоза обнаружили в воде два человека в гидрокостюмах. Их поднял на борт подошедший на помощь буксир “OLNG Muttrah” под флагом Омана. Это был судовой повар, в момент аварии работавший на камбузе, и капитан, чье состояние здоровья вызывало серьезные опасения. Спасенного после нахождения в течение 8 часов в штормовом море повара доставили в госпиталь в Вунг-Тау, а капитан, к сожалению, не выжил.

Вечером по проблесковому огню спасательного жилета было найдено тело моряка, которого поднять на борт не удалось из-за сильного волнения. Одно тело было поднято на борт сингапурского балкера “Kota Nekad”, в котором был опознан старший помощник капитана затонувшего судна.

Поисково-спасательная операция, в которой приняли участие 9 судов и 3 самолета, продолжалась еще три дня, но больше людей обнаружить не удалось. “Bulk Jupiter” затонул в 150 милях к юго-востоку от Вьетнама в координатах 09⁰⁰1’01”N, 109⁰⁰15’26”E. Из 19 членов экипажа выжил лишь один, 16 человек числятся пропавшими без вести.

Расследование этого аварийного случая, которое проводило государство флага, сосредоточилось на двух вопросах: 1) установить причину потери 18 членов экипажа и 2) установить причину внезапного возникновения чрезмерного крена.

Как следовало из актов инспекций государственного портового контроля и отчетов визитов суперинтендантов, учения по оставлению судна в соответствии с Правилom 19 Главы III Международной конвенции СОЛАС проводились каждый месяц и за время нахождения экипажа на борту было проведено шесть учебных шлюпочных тревог, во время которых осуществлялся сбор всех членов экипажа у мест посадки в шлюпки и надевание спасательных жилетов и гидрокостюмов. Капитан отмечал, что в первых двух учениях экипаж действовал медленно, в последующем замечаний не было. В последний раз такую тревогу сыграли 6 декабря 2014 г. Учение со спуском шлюпок и маневрированием на воде с распланированным экипажем в соответствии с тем же правилом было проведено один раз в трехмесячный срок 29 ноября 2014 года во время стоянки на якоре на рейде порта Танджунг Бара, Индонезия. Учения показали, что обе спасательные шлюпки выполняли свои функции исправно, но как быстро они были спущены на воду информации нет. Важно помнить, что Правило 31 Главы III Международной конвенции СОЛАС требует обеспечить на грузовом судне возможность спуска на воду всех спасательных шлюпок и плотов с полным комплектом людей и снабжения в течение периода времени, не превышающего 10 минут с момента подачи сигнала об оставлении судна.

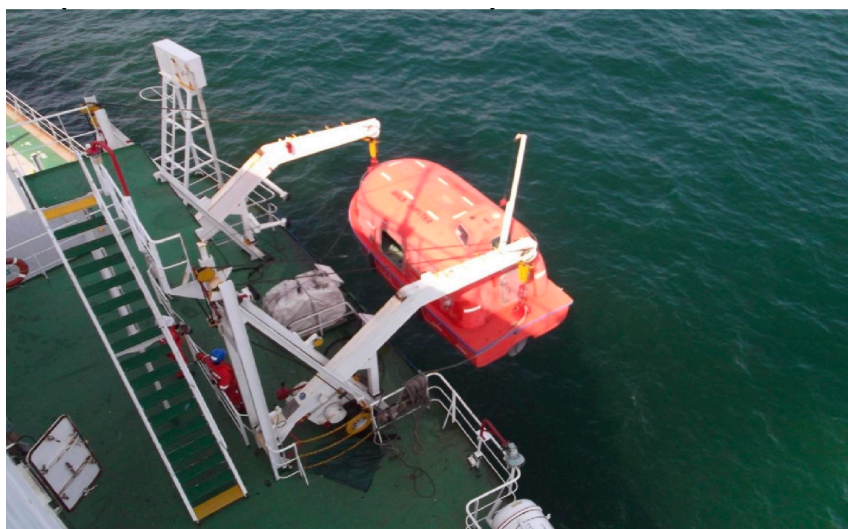


Рисунок 5 – Шлюпочная палуба теплохода “Bulk Jupiter”

Известно, что успех действий экипажа в аварийной ситуации во многом зависит от умелого руководства. Как вспоминал повар, в 06.40 была объявлена общесудовая тревога и по судовой трансляции была подана команда собраться на мостике. Повар забежал в свою каюту, чтобы надеть гидрокостюм и взять документы, но по дороге на мостик встретил нескольких членов экипажа, которые передали распоряжение капитана готовить шлюпку №2. У трапа на шлюпочную палубу повар, увидя капитана, пошел за ним, но в это время судно получило внезапный крен 45° на правый борт, а набежавшая волна смыла их в море. Держась вместе, они отплыли на безопасное расстояние, а когда оглянулись, судно уже скрылось под волнами. Судьба остальных членов экипажа ему не известна.

Судя по промежутку времени между временем объявления общесудовой тревоги в 06.40 и автоматическим срабатыванием аварийного радиобуя в 07.00, судно затонуло в течение 20 минут. Однако организованной эвакуации с судна не было, драгоценное время было упущено за счет сбора экипажа на мостике, а не на шлюпочной палубе, как предписано расписанием. Учитывая время суток, большая часть экипажа крепко спала в своих каютах, не имела представления о грозящей опасности и плохо понимала, что надо делать. Все это значительно снизило их шансы на выживание.

Особого признания заслуживает экипаж контейнеровоза “ZIM Asia”, возглавившего поисково-спасательную операцию, хотя ее эффективность была невысока и высокобортное судно с большой парусностью мало подходило для таких работ. Дополнительные трудности создавали сложные метеоусловия и отсутствие опыта у экипажа.

Северо-восточный ветер и волнение воздействовали с носовых курсовых углов на “Bulk Jupiter”, следовавший малым ходом. Поэтому судно скорее испытывало вибрацию и сотрясения от ударов волн, чем бортовую качку. Однако с учетом незначительного износа корпуса по результатам освидетельствования в доке, маловероятно, чтобы океанское судно получило конструктивные разрушения в далеко не экстремальных условиях плавания.

БОКСИТ		
ОПИСАНИЕ Коричневато-желтый глиноподобный и землистый минерал. Влагосодержание: 0% – 10%. Нерастворим в воде.		
ХАРАКТЕРИСТИКИ		
УГОЛ ЕСТЕСТВЕННОГО ОТКОСА	ОБЪЕМНАЯ ПЛОТНОСТЬ (кг/м³)	УДЕЛЬНЫЙ ПОГРУЗОЧНЫЙ ОБЪЕМ (м³/т)
Не применимо	1190–1389	0,72–0,84
РАЗМЕРЫ	КЛАСС	ГРУППА
70%–90% комков: 2,5 мм – 500 мм 10%–30% порошка	Не применимо	С
ОПАСНОСТЬ <u>Особых опасных свойств нет.</u> Это негорючий или малопожароопасный груз.		
РАЗМЕЩЕНИЕ И РАЗДЕЛЕНИЕ Специальных требований нет.		
ЧИСТОТА ТРЮМА Специальных требований нет.		
МЕРЫ ЗАЩИТЫ ОТ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ Специальных требований нет.		
ПОГРУЗКА Разравнивать согласно соответствующим положениям, требуемым разделами 4 и 5 настоящего Кодекса.		
МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ Колодцы льял должны быть чистыми, сухими и должны быть закрыты, как это требуется, для предотвращения попадания в них груза.		
ВЕНТИЛЯЦИЯ Специальных требований нет.		
ПЕРЕВОЗКА Специальных требований нет.		
ВЫГРУЗКА Специальных требований нет.		
ОЧИСТКА Специальных требований нет.		

Рисунок 6 – Описание боксита в МКМПНГ

Известно, что за последнее десятилетие основной причиной гибели судов с навалочным грузом было разжижение груза, на долю которого приходится 55 жизней или 61,8% от общего числа человеческих потерь. Поэтому следует рассмотреть и эту версию, хотя в течение многих десятилетий перевозка бокситов осуществлялась безопасно. Международный кодекс морской перевозки навалочных грузов (МКМПНГ) относит бокситы к группе С (грузы, которые не способны разжижаться и не имеют опасных химических свойств). Индивидуальная опись боксита в МКМПНГ издания 2008 г., действовавшего на день погрузки балкера “Bulk Jupiter”, приведена на рис.6.

В Кодексе есть предупреждение, что эти сведения не являются исчерпывающими и приведены лишь для справки. Перед погрузкой важно получить от грузоотправителя актуальную информацию о всех физических и химических свойствах грузов, предъявленных к отправке.

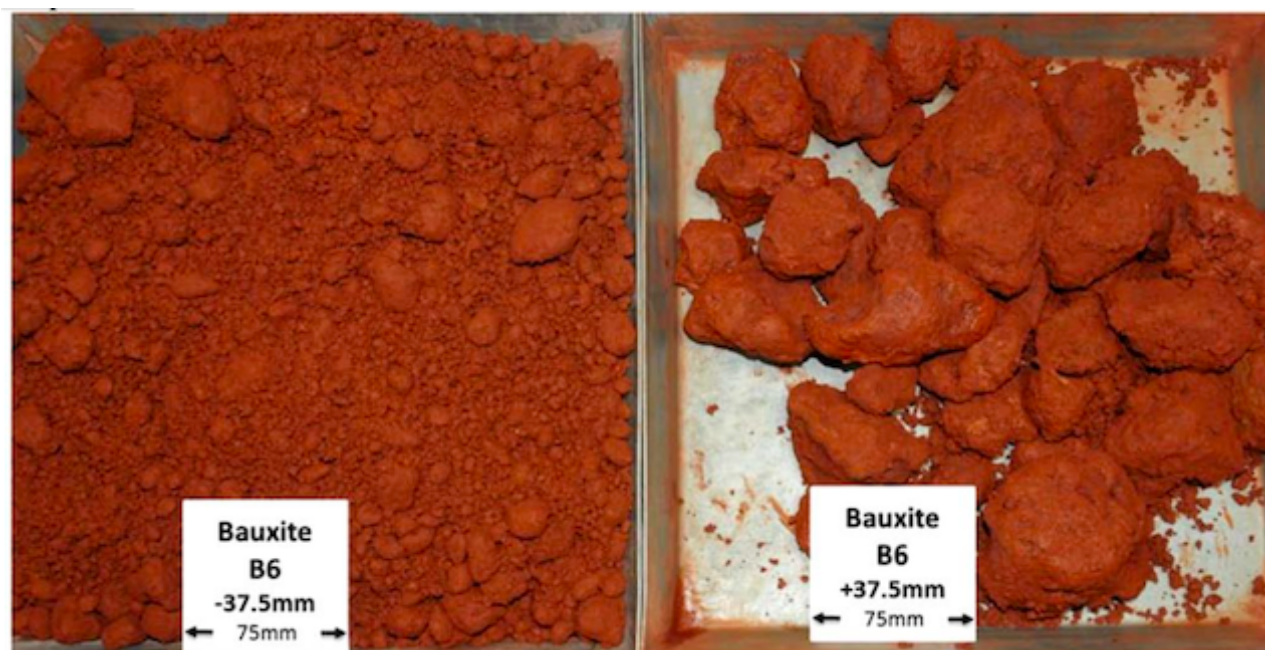


Рисунок 7 - Лабораторные образцы рядового боксита

Бокситы - основное сырье мирового производства алюминия, третьего по распространенности элемента в земной коре. Свое название боксит получил от селения Ле-Бо (Les Baux) на юге Франции, где в 1821 году французским геологом Пьером Бертье было впервые обнаружено, что минерал богат алюминием.

Боксит - это горная порода, образовавшаяся в результате выветривания силикатных (гранит, базальт) или карбонатных (известняк, доломит) пород. После длительного выщелачивания кремнезема и других растворимых материалов, обычно во влажном тропическом или субтропическом климате, происходит осаждение гидроксидов алюминия в приповерхностном слое обычно около 5 м, но может достигать глубины до 40 м.

Бокситы не имеют строго определенного химического состава, поскольку представляют собой смесь гидроксидов алюминия, глинистых минералов и нерастворимых материалов, таких как кварц, гематит, магнетит, сидерит и гетит. Алюминиевые минералы в бокситах могут включать гиббсит $\text{Al}(\text{OH})_3$, бемит $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$ и диаспор $\beta\text{-AlO}(\text{OH})$. Железо обычно содержится в бокситах в виде гетита $\text{FeO}(\text{OH})$ и/или гематита Fe_2O_3 . Бокситы могут также включать глинистый минерал каолинит $\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$ и небольшие количества титановых минералов анатаза TiO_2 , ильменита, FeTiO_3 и FeOTiO_2 . Как правило, коммерчески выгодные сорта бокситов содержат до 50% гидроксида алюминия, до 35% кремнезема, обычно в виде кварца, до 15% гематита/гетита и до 15% каолинита.

Боксит, как правило, представляет собой мягкий материал от белого до серого или красновато-коричневого цвета с землистым блеском. Бокситы обычно добываются открытым способом, так как они почти всегда находятся вблизи поверхности земли. Несмотря на то, что бокситы, как правило, состоят из схожих минералов, они имеют большие различия в гранулометрическом составе в зависимости от месторождения и последующей переработки.

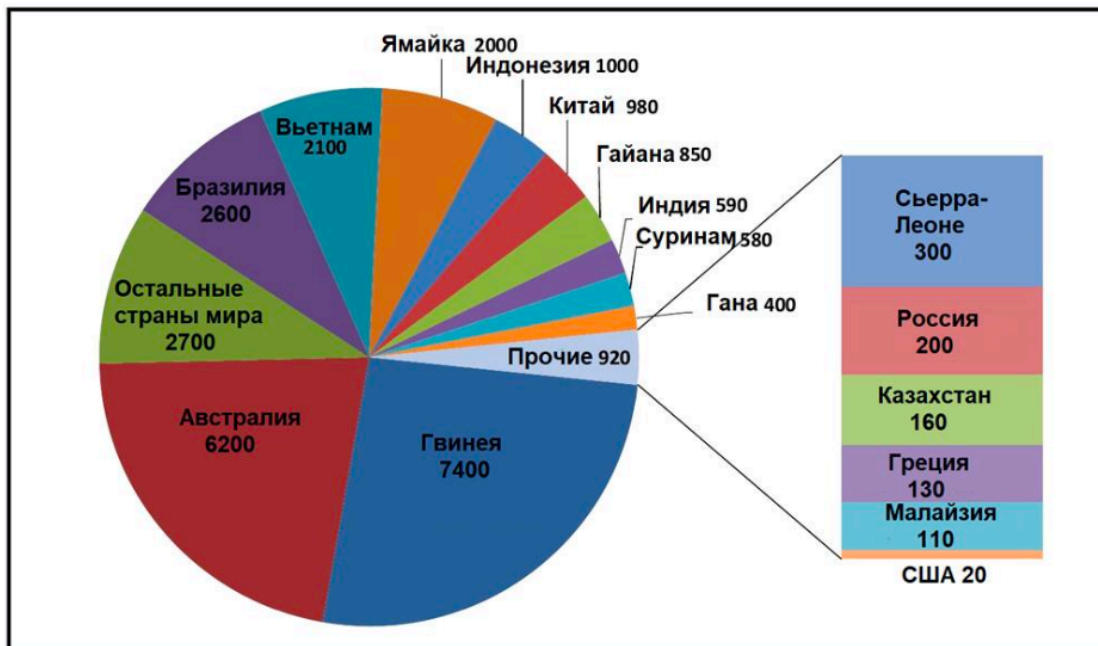


Рисунок 8 – Мировая добыча бокситов, млн. тонн

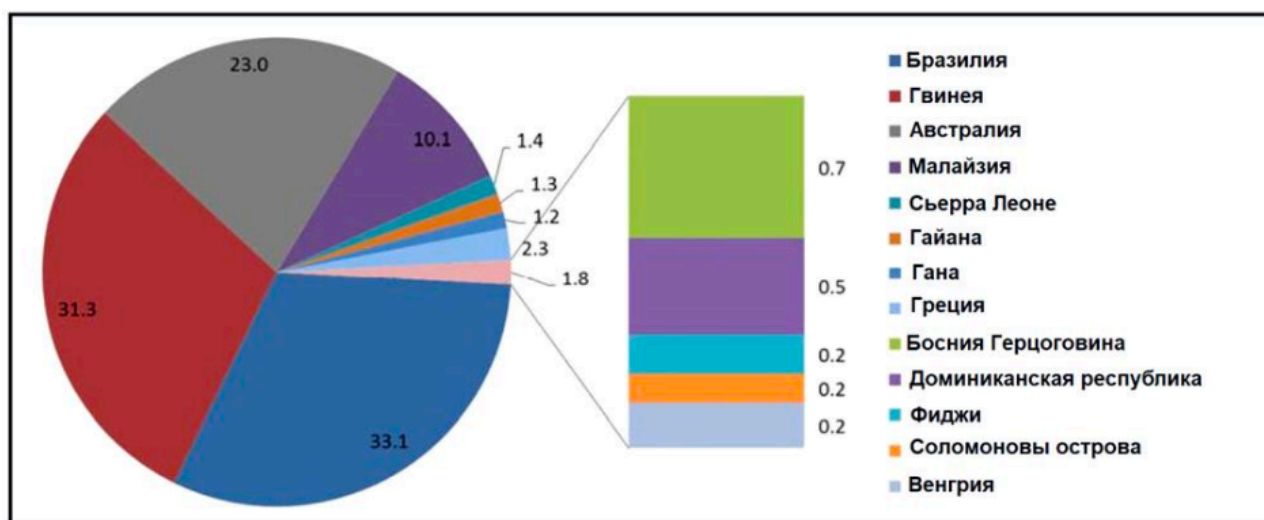


Рисунок 9 - Мировые морские перевозки бокситов по странам, млн. тонн

Крупные залежи бокситов располагаются в основном в тропических и субтропических районах Африки, Южной Америке и Австралии. Менее значительные месторождения встречаются в Европе. В России бокситы добываются большей частью в Свердловской области.

Гвинея и Австралия обладают самыми крупными запасами бокситов в мире, за ними следуют Бразилия, Вьетнам и Ямайка. Следующими по величине запасами бокситов являются Индонезия, Китай и Гайана (около 1000 млн. тонн), за ними следуют Индия, Суринам и Гана (около 500 млн. тонн).

В общей сложности ежегодно морским транспортом перевозится около 100 млн. тонн бокситов. Бразилия и Гвинея доминируют в морских поставках, отправляя на экспорт более 30 млн. тонн бокситов в год каждая. Австралия экспортирует более 20 млн. тонн бокситов в

год, а Малайзия - около 10 млн тонн в год. Небольшие объемы поставляются на мировой рынок из Сьерра-Леоне, Гайаны, Ганы и других стран-экспортеров.

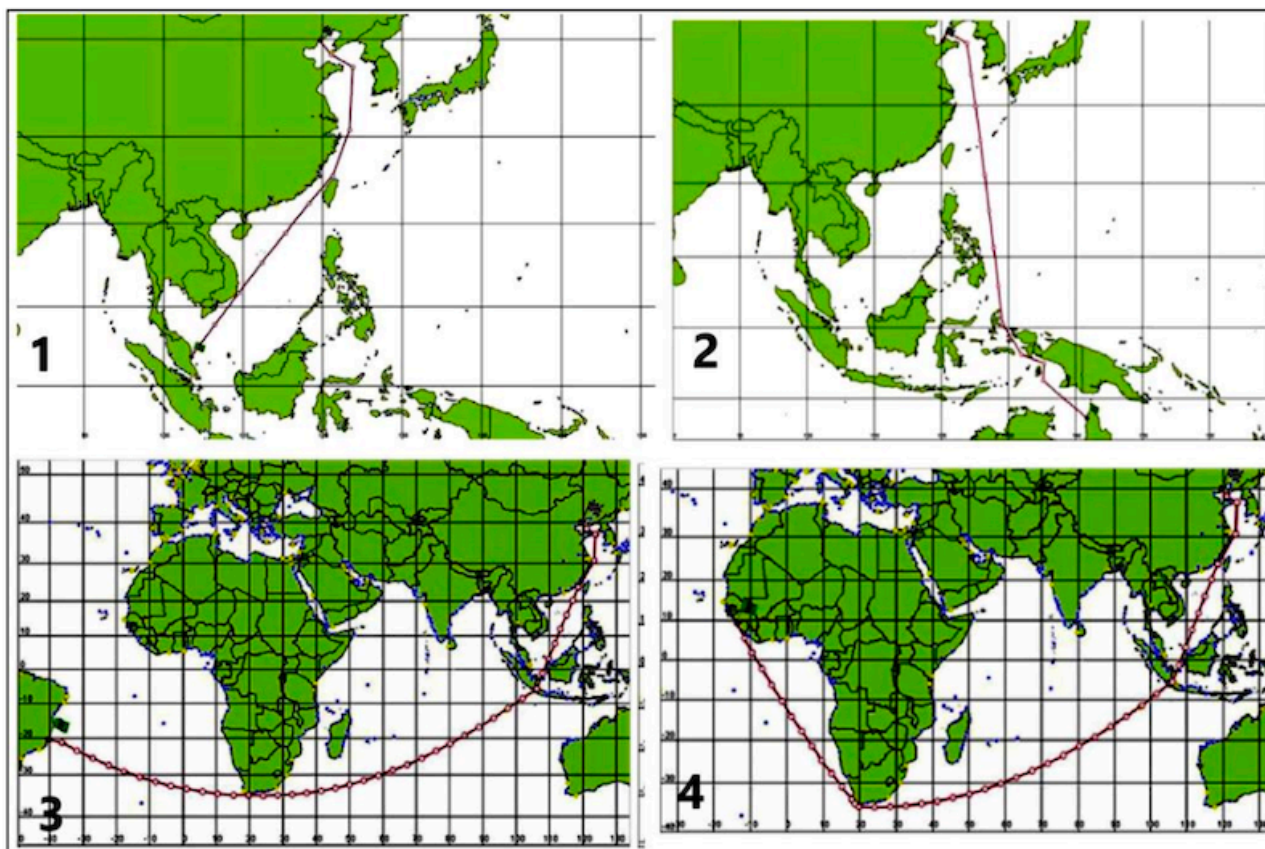


Рисунок 10 - Основные маршруты морской перевозки бокситов: 1 – Малайзия-Китай; 2 - Австралия-Китай; 3 – Бразилия-Китай; Гвинея-Китай

Индонезия поставляла морские бокситы в объеме до 50 млн. тонн в год до того, как правительство этой страны ввело запрет на экспорт бокситов в 2014 году. С тех пор другие поставщики, в частности Малайзия, Гвинея и Китай, увеличили производство, чтобы удовлетворить потребности китайских заводов по переработке бокситов.

Большая часть морских перевозок осуществляется на судах типа Panamax (дедвейтом ок. 80 тыс. тонн), при этом примерно по 10% в настоящее время перевозится на судах Capesize (дедвейтом более 170 тыс. тонн) и Handymax (дедвейтом ок. 50 тыс. тонн).

Что касается предварительной обработки добытой руды перед погрузкой на судно, то бокситы, доставляемые морем, можно отнести к одной из трех категорий:

1. Руда, доставляемая напрямую (Direct Shipped Ore): минимальное просеивание и дробление для удаления крупногабаритных материалов и органических загрязнений (корни деревьев и т.д.).

2. Обогащенная руда: руда измельчается, просеивается и промывается для удаления мелких частиц.

3. Высушенная для удобства транспортировки руда.

Порт Куантан расположен на восточном побережье Малайзии, обращенном к Южно-Китайскому морю и начал функционировать в 1984 г.

Куантан исторически экспортировал железную руду, но в связи с падением на нее цен объем этой торговли значительно сократился. Вокруг порта открылось много новых боксито-

вых карьеров, а международный спрос привел к оживлению недостаточно используемой портовой инфраструктуры. Экспортом бокситов занимаются около десяти компаний и весь этот груз предназначался для портов Китайской Народной Республики. Пик экспорта пришелся на ноябрь 2014 года и составил 839 583 тонны.

Порт располагает более чем 4-километровым фронтом причалов для обработки широкого спектра грузов, включая наливные (нефть), тарно-штучные грузы, контейнеры и грузы, перевозимые навалом, такие как минеральные руды, удобрения, зерно и корма для животных. Погрузка и выгрузка навалочных грузов осуществляется на причалах общего назначения с использованием собственных грузовых средств судов. Бокситы обычно загружаются в грузовые автомобили с открытым кузовом и доставляются к причалам непосредственно с карьера. Крытых хранилищ, обеспечивающих защиту от дождя или поверхностного стока воды здесь нет.

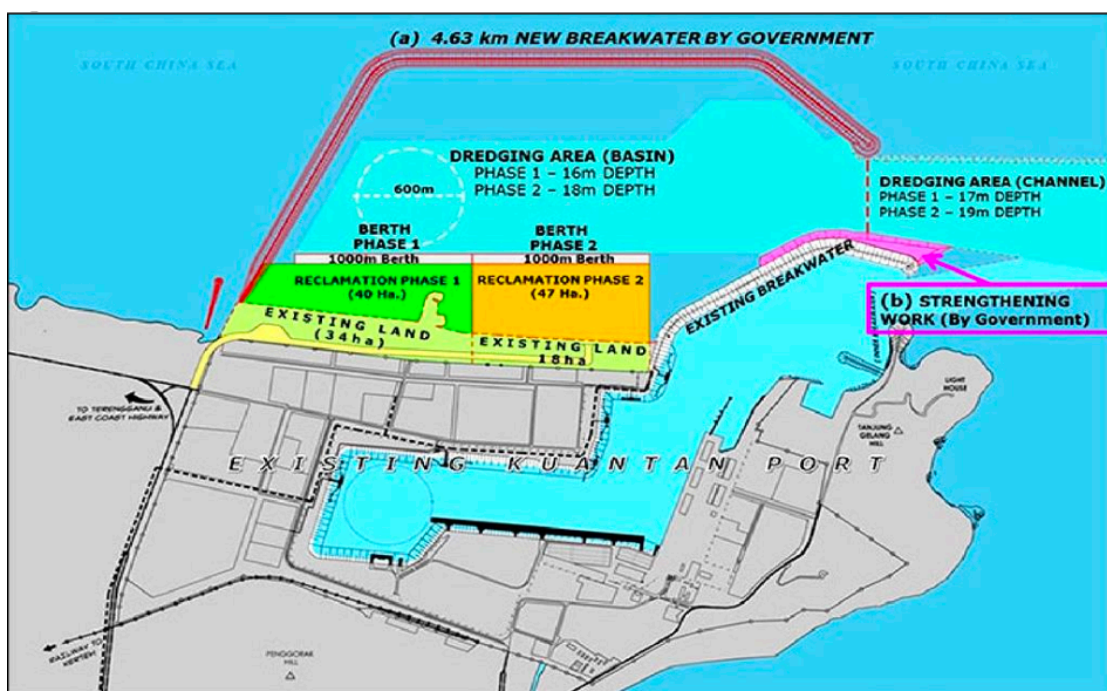


Рисунок 11 – План порта Куантан

Стивидоры, работающие с кранами, используют грейферы для погрузки груза на борт в соответствии с планом погрузки, предоставленным судном. Количество загруженного груза рассчитывается по осадке в начале и по завершении грузовых операций.

Во время дождей суда, как правило, закрывают люки, чтобы предотвратить попадание воды в грузовые отсеки и сохранить груз в сухом состоянии. Однако любой груз, оставленный на причале, остается незакрытым и подвергается воздействию непогоды.

В соответствии с Правилем 2 «Информация о грузе» главы VI «Перевозка грузов» Международной конвенции СОЛАС грузоотправитель должен обеспечить капитана судна или его представителя соответствующей информацией о грузе достаточно заблаговременно до погрузки, с тем чтобы дать возможность обеспечить меры предосторожности, которые могут быть необходимы для надлежащего размещения и безопасной перевозки груза.

Далее раздел 4 МКМПНГ конкретизирует, что в случае навалочного груза информация должна содержать: удельный погрузочный объем; группу груза (А и В, А, В или С); вероятность смещения, включая угол естественного откоса, если применимо; необходимость штивки, класс опасности, токсичные или воспламеняющиеся газы, которые может выделять груз,

если применимо; воспламеняемость, токсичность, коррозионная активность и склонность груза к поглощению кислорода, если применимо; свойства самонагревания груза, если применимо; свойства по выделению воспламеняющихся газов при контакте с водой, если применимо, - радиоактивные свойства, если применимо; и любые другие сведения, требуемые национальными властями.

Капитану “Bulk Jupiter” была представлена декларация о свойствах груза, подписанная компанией ОХУ PTE LTD от имени грузоотправителя 11 декабря в Куантане, за 6 дней до начала погрузки судна. В ней дословно повторялась информация, приведенная в индивидуальной карточке боксита МКМПНГ и указано содержание влаги 10%, что представлялось маловероятным для груза, хранившегося под открытым небом в разгар сезона тропических ливней.



Рисунок 12 – Груз боксита на причале после дождя



Рисунок 13 – Груз боксита в трюме “Orchid Island”

Ровно такого же содержания были выданы декларации на панамские суда “Medi Okinawa” и “Orchid Island”, на которые также велась погрузка бокситов на том же причале. Уже после получения сообщения о гибели “Bulk Jupiter”, эти данные были перепроверены независимой сюрвейерской компанией SGS Malaysia. На первом судне содержание влаги в грузе составило 15,01%, на втором - 21,3%. На “Orchid Island” наблюдались признаки неста-

бильности боксита. По сообщению капитана из льял трюмов было откачено около 72 куб. метров воды.

Среди прочих инструкций было указание ежедневно сообщать о количестве воды, удаленной из льял трюмов осушительной системой, которое больше было вызвано предотвращением претензий к количеству груза, чем заботами о безопасности судна. Судно находилось в плавании в течение 56,5 часов, и такая информация была бы полезна для оценки состояния груза в трюмах. Но, к сожалению, компания Winning Shipping отказался сотрудничать в этой области.

Гибель “Bulk Jupiter” вызвала оживленное обсуждение в ИМО на заседаниях подкомитета по грузам и контейнерам. После обращения к ведущим компаниям по добыче, производству и транспортировке бокситов была создана Глобальная рабочая группа по изучению поведения бокситов при морской транспортировке, научным координатором которой стал профессор Токийского национального горного института Сусуми Ота.

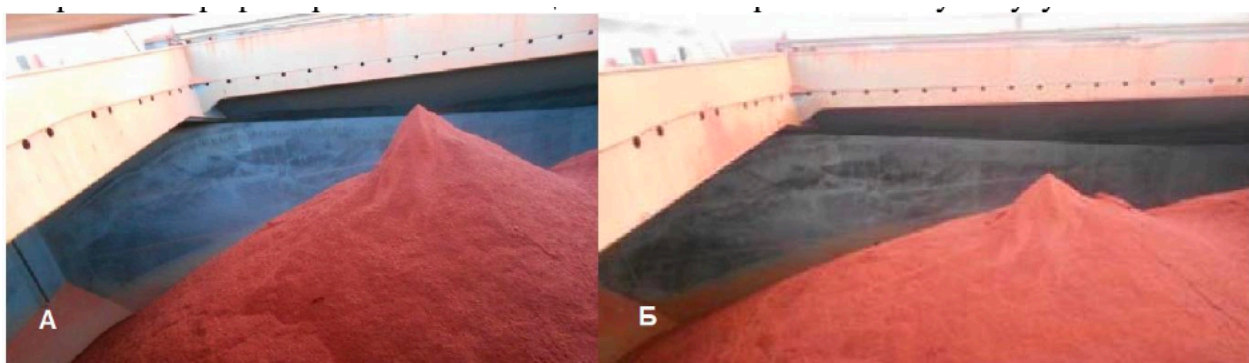


Рисунок 14 – Штабель груза бокситов в трюме А – после погрузки, Б – перед выгрузкой

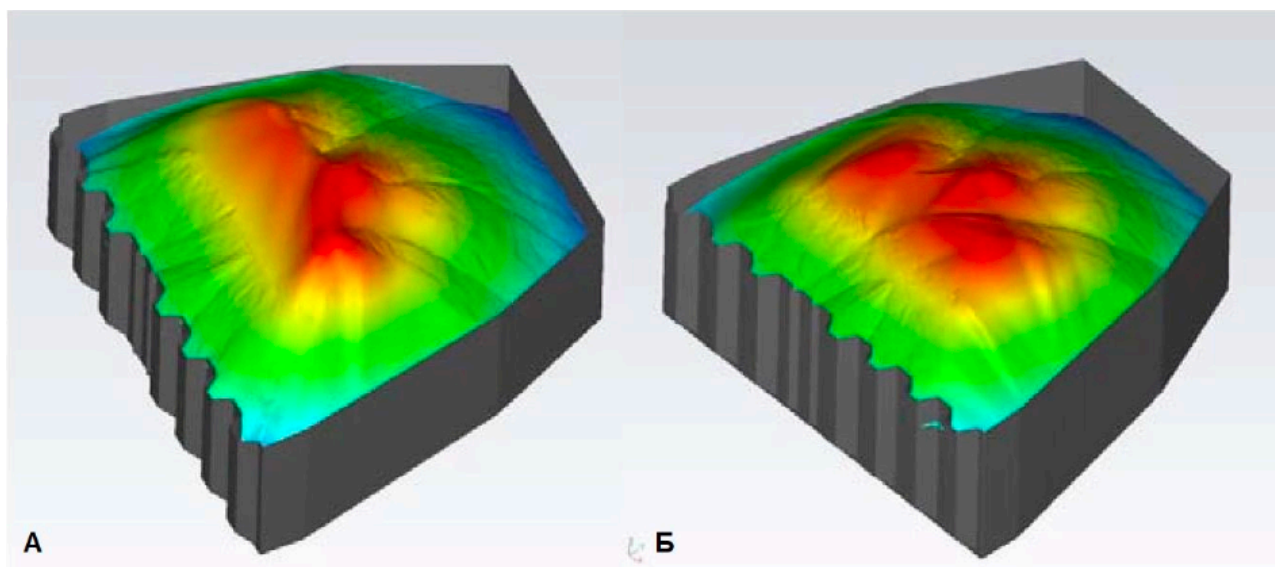


Рисунок 15 – Профиль штабеля бокситов в трюме, полученный с помощью лазерное сканирование А – после погрузки и Б – перед выгрузкой

Натурные наблюдения за поведением австралийских, бразильских и гвинейских бокситов производились на судах класса Panamax, а бокситов происхождения из Малайзии на судах класса Handymax, как наиболее характерных на данных направлениях.

Большинство рейсов проходило в относительно спокойных условиях (волнение моря до 2,0 метров), в некоторых рейсах наблюдались прохождения циклонов или тайфунов (волнение достигало 8,0 метров). Наиболее тяжелые погодные условия наблюдались в Восточно-Китайском море, хотя некоторые неблагоприятные условия наблюдались и у побережья Северной Австралии.

В среднем период качки судов составлял около 10 секунд или 0,1 Гц.

Плотность навалочного груза необходимо знать для оценки его свойств, так как от этого зависит передача усилий в его массе, а также сыпучесть и способность к усадке. Она обычно характеризуется коэффициентом пористости, который указывает на соотношение между объемами, занимаемыми твердыми частицами груза и порами между частицами. В условиях морской перевозки изменение плотности массы груза зависит от способа и высоты его загрузки в грузовых помещениях судна, а также от интенсивности действия таких внешних динамических сил, как вибрация и качка судна.

Результаты наблюдений показали, что суда Handymax испытывают наибольшие колебания при сходных условиях состояния моря. Носовой отсек испытывает наибольшее ускорение, которое обычно составляет менее 1g. Лазерное сканирование и фотограмметрия позволили точно оценить максимальное уплотнение 14,8%, минимальное 0,1%. Среднее уплотнение составило 2,7%.

Международный кодекс морской перевозки навалочных грузов (МКМППГ) в Разделе 7 особо рассматривает опасность разжижения навалочных грузов с высоким содержанием влаги, которые относятся к грузам Группы А. Поэтому специальными целями детального изучения поведения бокситов Глобальной рабочей группы были определены:

1. Разработка научно обоснованных критериев для включения бокситов в группу С или группу А.

2. Разработать глобально применимую методику испытания бокситов группы А по определению транспортабельного предела влажности (ТПВ).

Наличие влаги в навалочном грузе оказывает существенное влияние на взаимосвязь между частицами груза, а следовательно, и на его свойства.

Общепринятой четкой классификации видов влаги, содержащейся в сыпучем материале, в настоящее время не имеется, однако укрупнено можно подразделить виды воды в навалочном грузе на следующие:

- конституционная, или прочносвязанная, - влага, которая входит в состав вещества груза;
- водяной пар, или гигроскопическая влага – впитывается или отдается массой груза в зависимости от температуры и влажности окружающей среды;
- пленочная, или молекулярная влага, - обволакивает частицы груза и удерживается силами молекулярного притяжения;
- гравитационная и капиллярная вода – свободная вода, заполняющая полностью или частично поры между частицами груза (поровая вода).

В зависимости от наличия в грузе того или иного вида влаги принято подразделять грузы на сухие, содержащие только конституционную влагу, воздушно-сухие, содержащие конституционную с гигроскопической влагой, и влажные, содержащие поровую воду.

Влажность груза, как правило, определяют путем высушивания образца в сушильном шкафу при температуре 105-110°C до достижения постоянной массы пробы. Величина влажности находится как процентное отношение массы влаги, испарившейся после высушивания, к первоначальной массе образца:

$$W = \frac{A-B}{A} 100\%, \quad (1)$$

где W – искомая влажность, %;

A – масса образца до высушивания, г;

B – масса образца после высушивания, г.

Понять взаимодействие компонентов сложного конгломерата, который представляет собой навалочный груз, в значительной мере помогает один из разделов инженерной геологии «Механика грунтов», основы которой заложил Ш. Кулон в 1773 году своей работой о давлении грунта на подпорные стенки. Эта дисциплина изучает условия нарушения устойчивости и прочности грунтов в основании различных сооружений, а также деформации грунтов под воздействием приложенных сил.

В механике грунтов влажность принято характеризовать величиной коэффициента влагонасыщенности, который определяется как отношение природной влажности грунта к его полной влагоемкости:

$$I_w = \frac{W}{W_n}, \quad (2)$$

где I_w – коэффициент влагонасыщенности;

W – природная влажность;

W_n – полная влагоемкость, т.е. влажность, соответствующая полному заполнению пор водой.

В зависимости от степени насыщения грунтов водой их разделяют на маловлажные ($0 < I_w < 0,5$), очень влажные ($0,5 < I_w < 0,8$) и насыщенные водой ($0,8 < I_w < 1$).

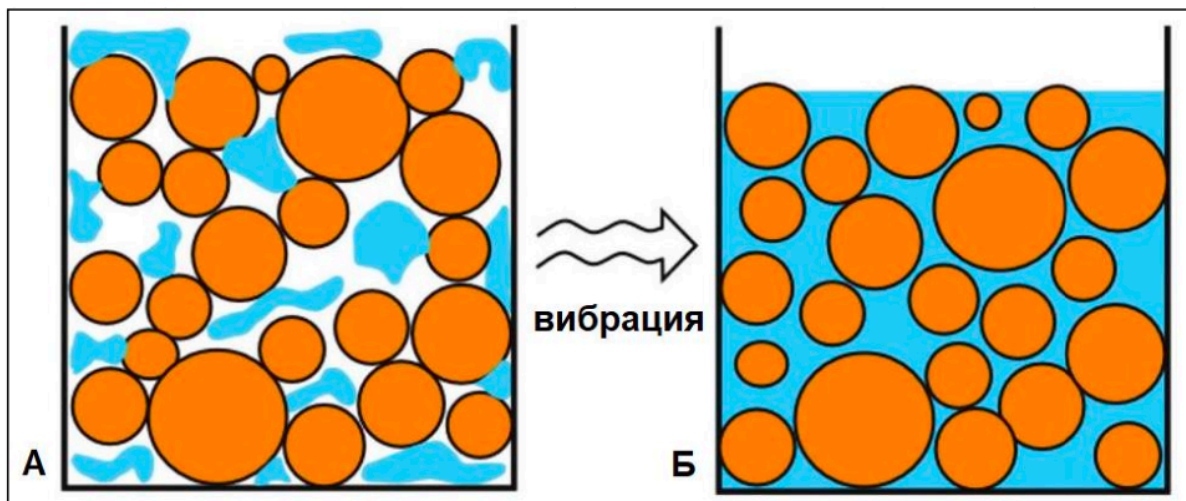


Рисунок 16 – А – когда частицы находятся в контакте друг с другом, за счет трения между ними поддерживается структура груза даже при наличии в порах воды и воздуха; Б - когда частицы не находятся в контакте друг с другом, вода свободно течет между ними, груз разжижается



Рисунок 17 - Пример полного разжижения груза

Механизм разжижение груза в условиях морской перевозки может быть представлен следующим образом. При погрузке судна частицы груза укладываются довольно рыхло, и штабель представляет собой ненасыщенную массу, содержащую: сухие вещества, воду и воздух.

Если судно неподвижно стоит в порту, ничего не происходит. Как только судно выйдет в море, оно начнет испытывает качку, удары волн, вибрацию от работы двигателя и знакопеременные деформации корпуса, которые передаются грузу. Эти силы приводят к уплотнению штабеля и увеличению его насыпной плотности. Происходит гравитационное перемещение воды сверху вниз. В тихую погоду этот процесс протекает медленно, а при наличии качки – более интенсивно. Сокращение пространства между частицами приводит к повышению давления воды, что снижает трение между ними, приводя к уменьшению сопротивления груза сдвигу.

При динамическом воздействии умеренной интенсивности уплотнение груза происходит не так быстро, вода остается внизу и происходит разжижение нижнего слоя груза.

Протекание процесса разжижения зависит от характера динамического воздействия. При ударном воздействии и полном насыщении груза водой обычно происходит разжижение всего груза. Действие вибрации вызывает послойное разжижение груза и распространение зоны разжижения от верхних слоев в глубинные.

Максимальное содержание влаги в грузе, которое считается безопасным для перевозки его на судах, называется транспортальным пределом влажности (ТПВ) груза, *способного разжижаться*. Эта величина определяется процедурами испытаний, одобренными компетентным органом.

В контексте МКМПНГ к одобренным методам относятся:

1. Испытание на виброударном столе с постепенным увеличением влажности образца на 1-2% до наступления состояния разжижения. Этот тест был впервые применен в 1980-х годах и стал стандартным испытанием для определения точки текучести мелкодисперсных концентратов. Он применим для минералов с минимальным размером частиц 1 мм и может использоваться для частиц с максимальным размером до 7 мм. Суть теста заключается в передаче физической энергии образцу аналогично тому, что происходит в трюмах судна. Горизонтальная платформа совершает 25 падений в течение двух минут с высоты 12,5 мм. Состояние текучести определяется визуально по тому как образец проявляет пластическую деформацию и не крошится. Тест очень прост, но результат в значительной степени зависит от квалификации персонала, проводящего тест.

2. Испытание на пенетрацию впервые начали применять в 1990-х годах и основано на принципе прямой зависимости между потерей прочности на сдвиг в результате циклической вибрации и разжижением. В ходе процедуры материал, помещенный в цилиндрический сосуд, подвергается вибрации. Влажность разжижения определяется по глубине проникания индикатора. Подтверждением того, что влагосодержание пробы превышает величину влажности разжижения, принято считать проникновение установленного на поверхности пробы стержня на глубину более 50 мм. Метод может использоваться для испытания материалов с крупностью частиц до 25 мм и меньше зависит от квалификации лаборанта.

3. Испытание по методу Проктора-Фагерберга воспроизводит плотность насыпи в сухом виде, которая наблюдается в трюмах судна, за счет использования энергии уплотнения. При каждом испытании методом уплотнения к пробе высушенного испытываемого вещества добавляется надлежащее количество воды, после чего проба тщательно перемешивается в течение 5 минут. Примерно одна пятая часть перемешанной пробы помещается в форму, ее поверхность разравнивается, а затем добавленная часть пробы утрамбовывается равномерно по всей ее поверхности. При трамбовании молот массой 350 г, находящийся в направляющей трубке, сбрасывается 25 раз с высоты 0,2 м. При объеме емкости 1000 см³ рассчитывают коэффициент пористости: e (объем пустот, деленный на объем твердого вещества), степень насыщения, процентное содержание по объему: S , общее содержание воды, процентное содержание по массе. Затем наносят данные на график. Критическому влагосодержанию соответствует точка пересечения кривой уплотнения с линией, соответствующей степени насыщения $S = 70\%$. Кривые уплотнения должны быть построены с использованием стандартных методов расчета, и результаты в значительной степени зависят от точности определения удельного веса.



Рисунок 18 – Одобренные методы испытаний: А - на виброударном столе; Б - на пенетрацию; В - по методу Проктора-Фагерберга; Г - кривая уплотнения

При использовании первых двух методов транспортный предел влажности рассчитывается как 90% от влажности разжижения, что дает небольшой запас безопасности, а при использовании метода Проктора-Фагерберга находится по графику как критическое содержание воды при степени насыщения 70%.

Характерными представителями грузов группы А являются концентраты руд различных металлов, при обогащении которых используется метод флотации. Увлажненные концентраты способны разжижаться под действием динамических нагрузок, причем в момент разжижения груза его сопротивление сдвигу может стать равным нулю и груз будет вести себя как жидкость. Если перевозится концентрат или другой груз, способный разжижаться, грузоотправитель должен снабдить капитана судна или его представителя подписанным свидетельством о транспортном пределе влажности (ТПВ) и подписанным свидетельством или декларацией о влагосодержании. В свидетельстве о ТПВ должен содержаться или прилагаться к нему результат испытаний по определению ТПВ. В декларации о влагосодержании должно содержаться или прилагаться к ней заявление грузоотправителя о том, что влагосодержание является, насколько ему известно и как он считает, средней величиной влагосодержания груза на момент вручения декларации капитану.

Глобальной рабочей группой были выполнены испытания бокситов из самых различных месторождений всеми известными методами. Их результаты не продемонстрировали ни малейшей их склонности к разжижению. В целом при перевозке бокситов морем в различных климатических зонах в штабеле груза обеспечивался хороший дренаж в льяльные колодцы и скопления влаги в нижних слоях не наблюдалось. В этом случае движение частиц ограничено сцеплением, и давление воды в пространствах между частицами груза не повышается. Значит, причина нестабильности бокситов, создающей угрозу безопасности судна, была в другом.

Во влажных мелкозернистых материалах могут иметь место тиксотропные явления, которые изучает коллоидная химия. Тиксотропность — это способность уменьшать вязкость (разжижаться) от механического воздействия и увеличивать вязкость (сгущаться) в состоянии покоя.

Коллоиды занимают промежуточное место растворами, частицы которых состоят из ионов диаметром не более 5 нм (т.е. 5×10^{-9} м) и суспензиями, компоненты которых диаметром порядка 1000 нм (10^{-6} м или 1 мкм) находятся во взвешенной среде. Коллоиды находятся в дисперсной фазе с диаметром частиц от 1 до 500 нм. Коллоидные частицы не осаждаются, и их нельзя отделить от дисперсной среды обычными методами, такими как фильтрация либо с использованием центрифуги.

Способностью к тиксотропным превращениям обладают многие материалы, в том числе и природные глинистые грунты. Природа обратимости явления разупрочнения и восстановления объясняется особенностями коагуляционных связей, имеющих между частицами грунта. Эти связи осуществляются за счет сил молекулярного притяжения частиц через остаточные слои адсорбированной воды, экранирующих эти силы. Чем толще пленка адсорбированной воды, тем слабее связь между частицами, тем, следовательно, меньше прочность материала. Чем больше в материале коллоидных частиц, тем отчетливее протекают в нем тиксотропные превращения.

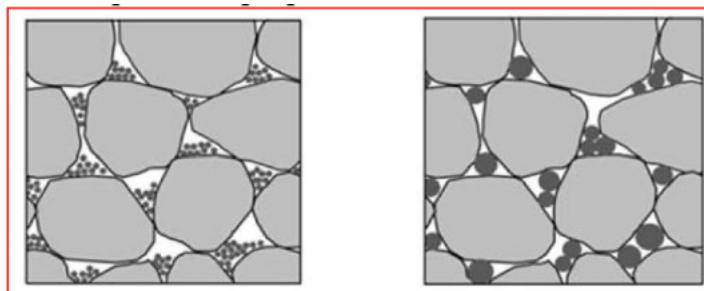


Рисунок 19 - Заполнение порового пространства между сеткой зерен мелкодисперсной фракции малого диаметра или крупнозернистой фракции большего диаметра

В виду того, что бокситы разрабатывается открытым способом с применением экскаваторов, бульдозеров и даже проомышленных взрывчатых веществ, предъявляемый к перевозке груз весьма разнообразен по гранулометрическому составу и содержит частицы диаметром от 100 мм (размер булыжника) до мелкого ила (6 микрон). Скальные породы перемежаются с рыхлыми, глинистого характера. При добыче взрывами порода частично превращается в мелкодисперсионную и пылеобразную массу, частично в кусковатую. Крупные глыбы разрушаются дополнительными взрывами.

Диапазон состава частиц, наблюдаемый в бокситах, отражается в диапазоне поведения, которое может произойти при увеличении содержания мелких частиц с почти нулевого уровня до чистой матрицы, состоящей только из мелких частиц. По мере увеличения содержания мелких частиц поровое пространство между крупными частицами частично заполняется мелкодисперсионными частицами, хотя небольшое их количество может образовывать перемычки между крупными частицами. Это называется тканью с недостаточным наполнением. Полученный материал называется материалом с недостаточным наполнением. Его поведение под нагрузкой будет зависеть от прочности и жесткости сетки из крупных частиц (крупнозернистой сетки), поскольку именно на них приходится большая часть нагрузки.

Дальнейшее увеличение содержания мелких частиц достигает критического состояния, когда они полностью заполняют поровое пространство крупнозернистой сетки (ткань с критическим наполнением). При загрузке нагрузка распределяется между крупнозернистой сеткой и матрицей из мелких частиц, заполняющих пустоты. Поведение материала под нагрузкой обусловлено совместным действием крупнозернистой сетки и мелкодисперсной матрицы.

Наличие в составе боксита существенной доли мелкодисперсионных частиц, предопределяет изменчивость его транспортных свойств в зависимости от влажности.

Степень подвижности навалочных грузов в общем случае принято характеризовать величинами внутреннего трения и сопротивления сдвигу.

Сопротивление сдвигу складывается из сопротивления трению твердых частиц груза между собой по поверхности скольжения и сопротивления связности, которая определяется силами сцепления частиц.

В толще навалочного груза возникают напряжения сжатия σ и касательные напряжения среза τ , которые связаны между собой определенной зависимостью. Для случая предельного равновесия сыпучей среды эта зависимость по закону Кулона может быть представлена в двух основных видах:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (3)$$

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (4)$$

где τ – касательное напряжение среза, или величина сопротивления сдвигу;
 σ – напряжение сжатия, или нормальное давление (нагрузка);
 φ = угол внутреннего трения;
 $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент внутреннего трения;
 c – сцепление частиц груза.

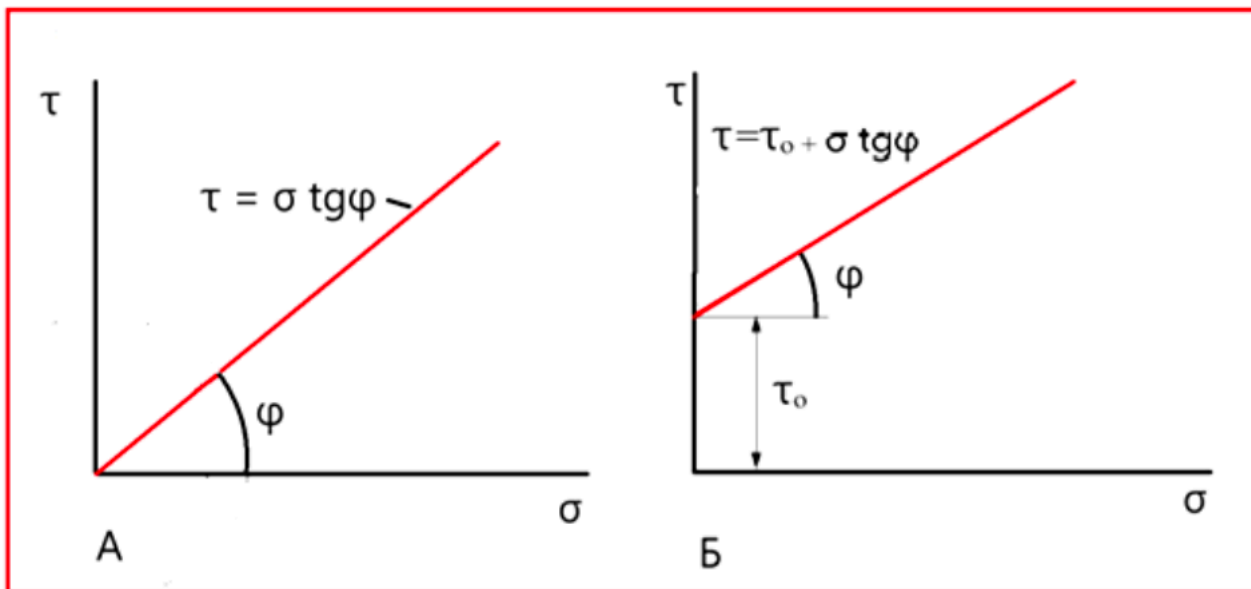


Рисунок 20 - Диаграммы предельных касательных напряжений

Графически указанные зависимости изображены на рис. 20, а и б в виде диаграмм предельных касательных напряжений (диаграмм сдвига).

Различают чисто механическое сцепление частиц груза и сцепление, вызванное молекулярными силами притяжения пленочной жидкости, обволакивающей поверхности частиц навалочного груза. Фактор сцепления зависит от плотности засыпки груза, а также шероховатости и формы грузовых частиц.

Испытания физико-механических свойств насыпных грузов показали, что для сухих и воздушно-сухих грузов, обладающих повышенной сыпучестью, величина сопротивления сдвигу может быть определена по формуле (3), а для влажных и плохосыпучих (связных) – по формуле (4).

К связным и вязким сыпучим телам принято относить грузы, которые оказывают ощутимое сопротивление сдвигу при незначительных нормальных нагрузках. Свойство связности характеризуется силами сцепления частиц груза c .

Экспериментальное определение величины сопротивления сдвигу и основных параметров груза φ и c производится обычно методами прямого среза, одноосевого и трехосевого сжатия.

Метод испытания на одноосевое (простое) сжатие – раздавливание применим только для оценки общего сопротивления сдвигу связных сыпучих тел при условном допущении, что во всех точках испытываемого образца сохраняется однородное напряженное состояние. Наиболее надежные результаты испытаний характеристик связного сыпучего тела дает метод трехосевого сжатия, позволяющий исследовать прочность образца груза при всестороннем сжатии.

К сожалению, не один из этих методов не позволяет непосредственно определить устойчивость груза во время морской транспортировки. Однако успешный подход и методология исследования устойчивости груза включают в себя изучение свойств груза и поведения на море в сочетании с численным и физическим моделированием.

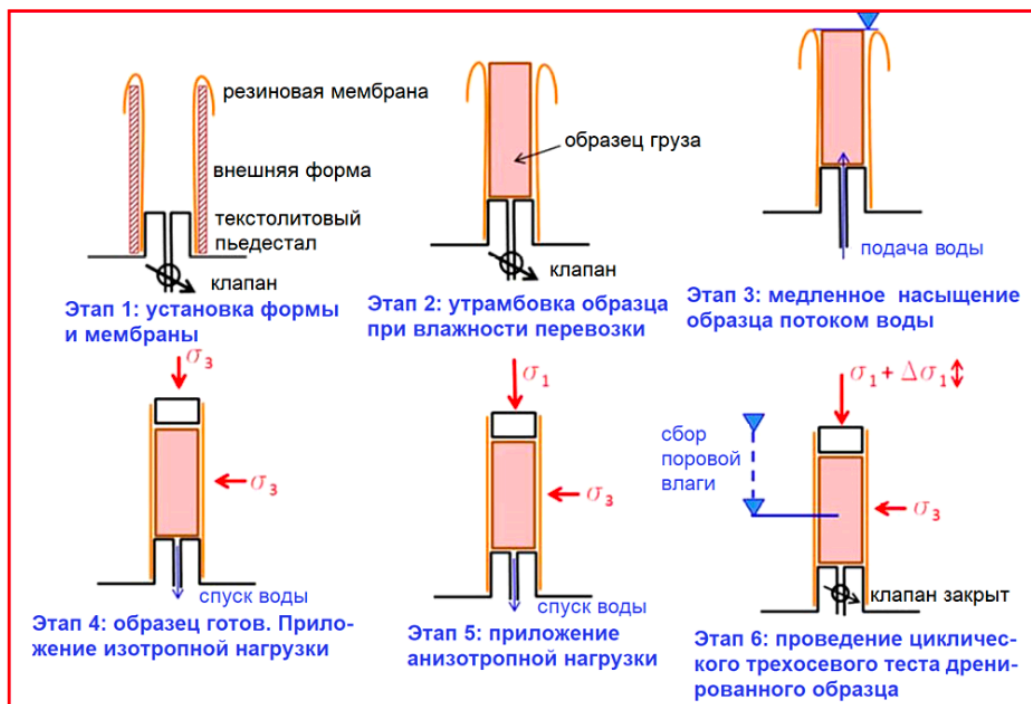


Рисунок 21 – Схема проведения циклического трехосевого теста

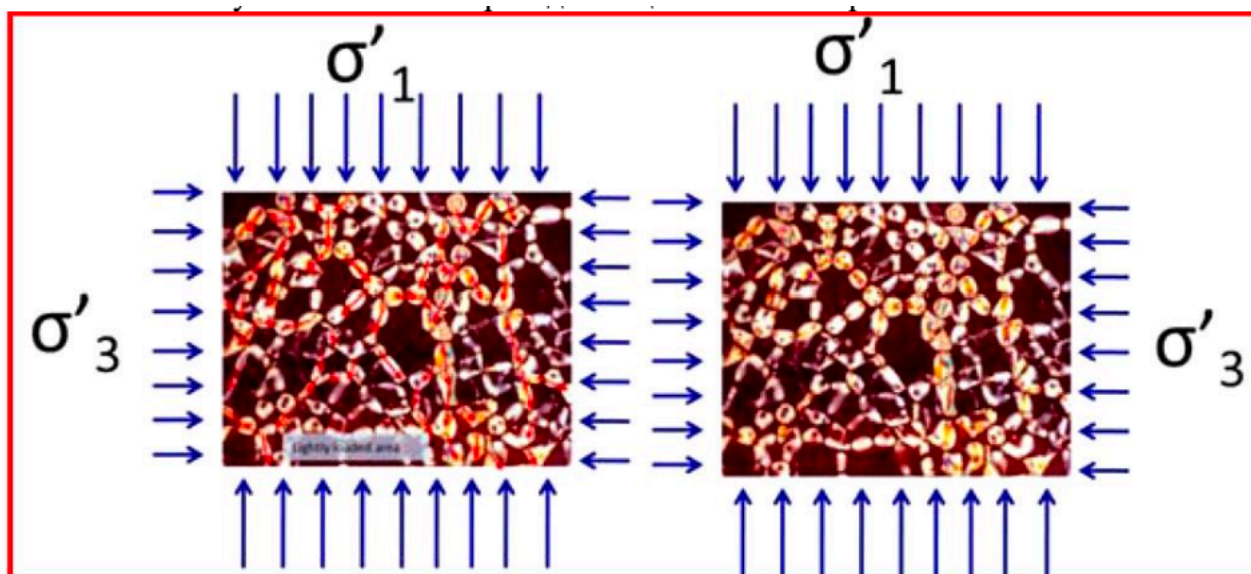


Рисунок 22 – Эпюра напряжений, действующих на частицы груза

Нагрузки, испытываемые грузом, зависят от реакции судна на колебания моря, с которыми оно сталкивается, и должны определяться в течение рейса судна. На эти силы влияют ориентация судна по отношению к волнам, величина волны, размер судна и способность судна избегать тропических штормов. Численное моделирование позволяет оценить напряже-

ние, возникающее в грузе из-за движения судна (индуцированное напряжение). Эти результаты позволяют сравнить их с результатами геотехнических испытаний, поскольку индуцированное напряжение можно сравнить с сопротивлением груза нагрузкам. Наконец, масштабное физическое моделирование позволяет протестировать экстремальные условия, связанные с влажностью груза и движением судна. Эти тесты также позволяют выявить различные виды неустойчивости, а также определить, при каких условиях влажности груза и движения судна они возникают.

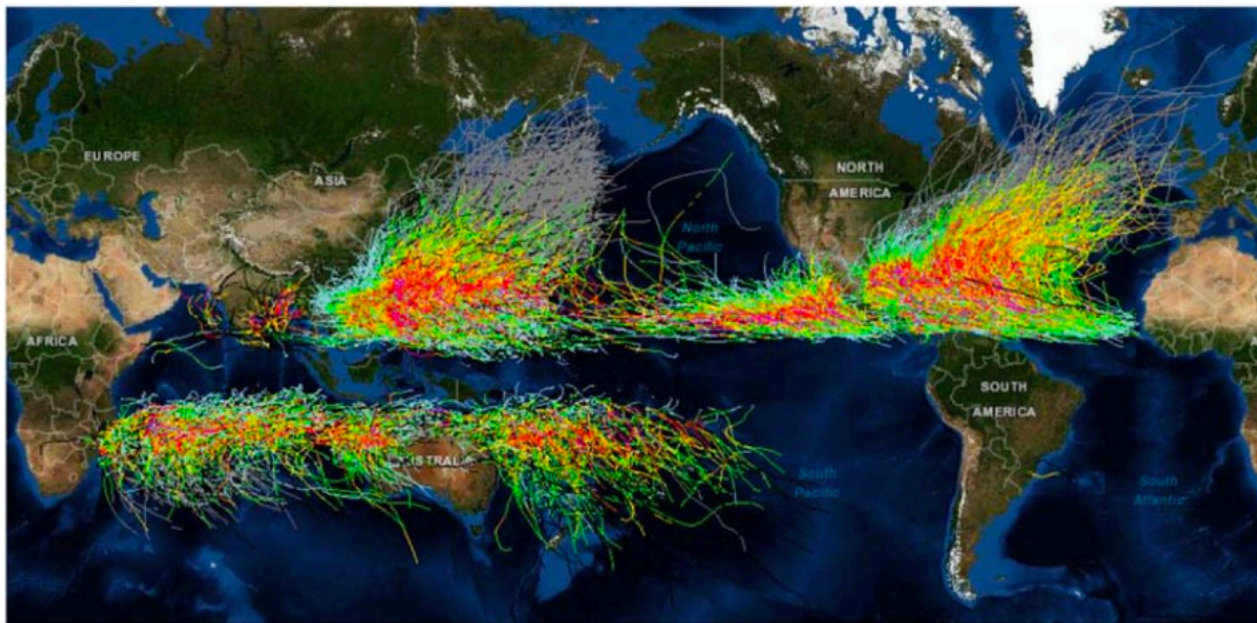


Рисунок 23 – Пути движения тропических циклонов

Глобальная Рабочая группа использовала различные экспериментальные методы, включая циклические трехосевые испытания и физическое моделирование, чтобы исследовать все возможные формы неустойчивости бокситов из-за влажности. Схема проведения испытаний и условий дренажа показана на рис. 21.

Моделирование производилось для судов четырех классов по дедвейту (Handymax, Panamax и Capesize) на разных маршрутах. Результаты показали, что суда Handymax создают наибольшие вынужденные усилия в грузе, поскольку они имеют наибольшие перемещения. Кроме того, на направлении перевозки из Малайзии в Китай имел место высокий риск встречи с тропическими циклонами.

По данным измерений получали коэффициент индуцированного циклического напряжения сдвига возникающего на поверхности груза, который примерно пропорционален тангенсу угла крена при качке.

Процедура проведения циклических трехосевых испытаний заключалась в следующем.

Гомогенизированные образцы укладывали в трехосную форму в 5 слоев при известном содержании влаги до требуемой плотности в сухом состоянии, а затем заливали водой при атмосферных условиях до состояния насыщения. Форму герметизировали и создавали в ней вакуум. Затем проводилось изотропное уплотнение при одинаковом давлении по всему периметру ($\sigma_1 = \sigma_3$), чтобы довести образец до удерживающего давления. После этого к образцу прикладывалось анизотропное вертикальное напряжение, возрастающее со временем ($\sigma_1 > \sigma_3$ или, в данном случае, $\sigma_h > \sigma_v$).

После выдерживания образца до полного осушения и выравнивания давления дренажные клапаны закрывали, и испытания продолжались без осушения (нулевое изменение объема), чтобы смоделировать прикладываемые циклические напряжения. При этом полностью насыщенный образец находился в искусственно недренированном состоянии, что можно считать наихудшим сценарием для подобных материалов.

Разжижение должно было произойти, когда давление поровой воды в образце достигнет 95% от первоначального. При таких условиях избыточное давление поровой воды приводит к снижению сцепления частиц (и, следовательно, прочности на сдвиг) практически до нуля и разжижению. На самом же деле испытания не выявили способности бокситов к разжижению, однако в условиях отсутствия дренажа при самых неблагоприятных движениях судна наблюдалось явление, названное динамической сепарацией, которое заключалось в подъеме жидкого шлама над слоем плотного груза с низким содержанием влаги.



Рисунок 24 – Динамическая сепарация боксита: на фотографии видны две свободные поверхности, каждая из которых занимает разный уровень, а склон водораздела выглядит более сухим и неповрежденным

Для проверки поведения бокситов в экстремальных условиях, а также для выяснения того, существуют ли иные виды неустойчивости, кроме разжижения, было проведено физическое моделирование с использованием установки Нехарод, в которой контейнер приводится в действие с шестью степенями свободы для имитации различных условий состояния моря. Типичные колебания качки были вызваны частотой 0,1 Гц и амплитуде 25°. Давление поровой воды контролировалось с помощью датчиков давления, установленных в основании и в середине штабеля. Испытания также не выявили способности разжижаться, но эффект динамической сепарации подтвердился.

Для того чтобы груз подвергся динамической сепарации, он должен содержать значительное количество мелких частиц, иметь высокое содержание влаги и испытывать значительные нагрузки, обусловленные движением судна. При наличии всех этих факторов груз в

штабеле уплотняется, давление поровой воды растет, но не доходит до уровня разжижения, что приводит к вытеснению влаги на поверхность груза. Этому способствует и капиллярный подъем воды. Содержание влаги в основной массе груза становится ниже, и он становится более плотным. По мере подъема воды на поверхность, штабель груза может оседать и выравниваться. Затем образуется свободная поверхность из шлама над всем слоем груза. Механизм динамической сепарации бокситов показан на рис. 25.

Главную опасность в случае динамической сепарации груза в трюме представляет отрицательное влияние свободной поверхности образующегося шлама на остойчивость судна.

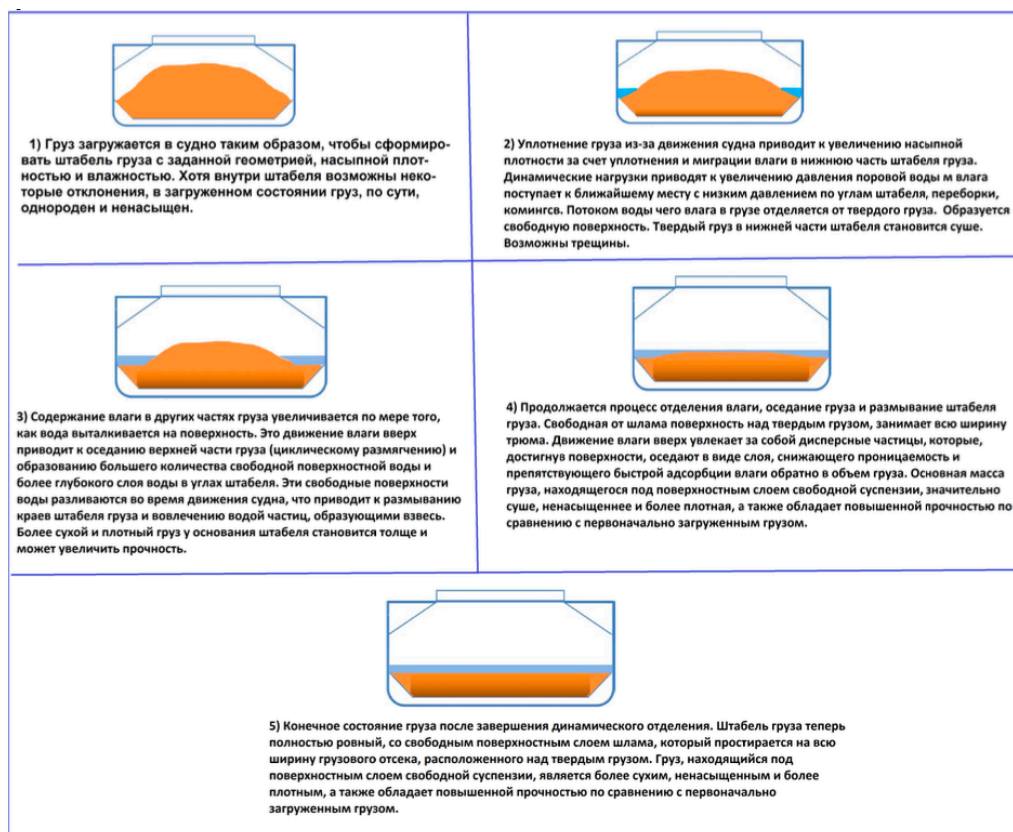


Рисунок 25 - Схема динамического разделения бокситового груза

Принципы статической и динамической остойчивости судна известны давно, а результаты расследования аварий, связанных со смещением и разжижения груза вместе с показаниями свидетелей дают ценные эмпирические данные и позволяют в деталях представить поведение судна в критической ситуации.

Единственный выживший член экипажа “Bulk Jupiter” хорошо запомнил несимметричную качку и резкое нарастание крена на один борт до катастрофического. По свидетельству старшего помощника капитана теплохода “Orchid Island”, принявший груз бокситов после “Bulk Jupiter” жидкая фаза груза образовалась на 5-й день после выхода в море. По его описанию, «поверхность груза стала плоской и перемещалась от борта к борту, напоминая желе. В каждом углу или на поверхности груза также образовались лужицы воды». Это вполне соответствует признакам динамической сепарации.

Имеются факты, свидетельствующие, что динамическая сепарация может происходить и с другими навалочными грузами с повышенной влажностью при движении судна.

Анализ подобных происшествий позволяет выявить их некоторую общность:

1. Умеренный ветер и волнение 4-5 баллов вполне достаточные условия, чтобы вызвать нестабильность груза при достаточно высоком содержании влаги.
2. Первым признаком проблем с грузом является необычная или атипичная качка.
3. После относительно короткого периода умеренной качки появляется небольшой крен в 3-5 градусов (Фаза 1).
4. Начальный небольшой крен постепенно увеличивается до 10-20 градусов и более.
5. Выжившие члены экипажа рассказывают о мгновенном исчезновении аварийного судна в воде. Это есть вторая фаза вызванная подмыванием твердой массы груза и смещением ее на борт.
6. Время от возникновения начального крена составляет от 20 минут до нескольких часов.
7. Во многих случаях у капитана не было возможности предпринять действия для спасения судна и экипажа.
8. Способность раннего распознавания опасности во многих случаях была низкой. Информация об остойчивости судна и компьютерные программы не предоставляют капитану достаточно указаний для быстрой оценки ситуации в подобных случаях.

В судовой документации приводятся поправки к метацентрической высоте или вертикальному статическому моменту относительно основной плоскости на влияние свободных поверхностей для цистерн, в которых располагается водяной балласт, топливо и другие жидкие запасы. Для уменьшения отрицательного влияния переливающихся жидкостей на остойчивость судна такие емкости, как правило, ограничивают в размерах.

В случае же перехода навалочного груза в жидкую фазу, последствия для судна будут гораздо более драматичны. Грузовой отсек не только больше, чем другие емкости для жидких запасов, но и объем и плотность жидкой суспензии в трюме намного больше, а период ее колебаний из-за вязкостных свойств может не совпадать по фазе с периодом качки судна. Уменьшение метацентрической высоты определяется по формуле:

$$-\Delta h, \text{ м} = \frac{N \times L \times B^3 / 12}{\text{Объемное водоизмещение, м}^3} \times \frac{\text{Плотность шлама}}{\text{Плотность морской воды}} \quad (5)$$

где L и B - длина и ширина трюма, м;

N - количество трюмов.

Кодекс остойчивости в неповрежденном состоянии ИМО требует, чтобы каждое судно соответствовало минимальным критериям остойчивости и поддерживало их на протяжении всего рейса, при этом начальная метацентрическая высота должна быть не менее 0,15 метра. Однако метацентрическая высота типичного балкера класса Handymax дедвейтом 50 тыс. тонн с полным грузом бокситов во всех трюмах при выходе из порта погрузки составляет около 6 метров. Такая загрузка обуславливает резкую качку с периодом около 10 с.

В таблице 1 приведены значения общего уменьшения метацентрической высоты для балкера класса Handymax по мере образования свободной поверхности, начиная от трюма № 1 до трюма № 5, из расчета, что слой шлама глубиной 1 м имеет плотность 1,5 т/м³.

Таблица 1: Снижение метацентрической высоты для балкера класса Handymax

Номер трюма со свободной поверхностью	Потеря метацентрической высоты, м	Метацентрическая высота, м	Поведение судна
Нет	0	6,86	стабильное
1	2,08	4,78	стабильное
2	4,16	2,70	стабильное
3	6,23	0,63	Необычные подрагивания и колебания
4	8,31	-1,45	Растет крен
5	10,39	-3,53	Крен прогрессирует

Для лучшего понимания поведения судна, когда груз в трюмах подвергается динамической сепарации, были проведены натурные эксперименты с моделью судна Handymax в масштабе 1:180, которая загружалась фиксированными грузами для воспроизведения осадки и устойчивости, подобной состоянию с полным грузом в трюмах. Для имитации свободного перемещения шлама плотностью 1,5 т/м³ на полках в трюмах, показанных на рис.26 синим цветом, размещались стальные шары.

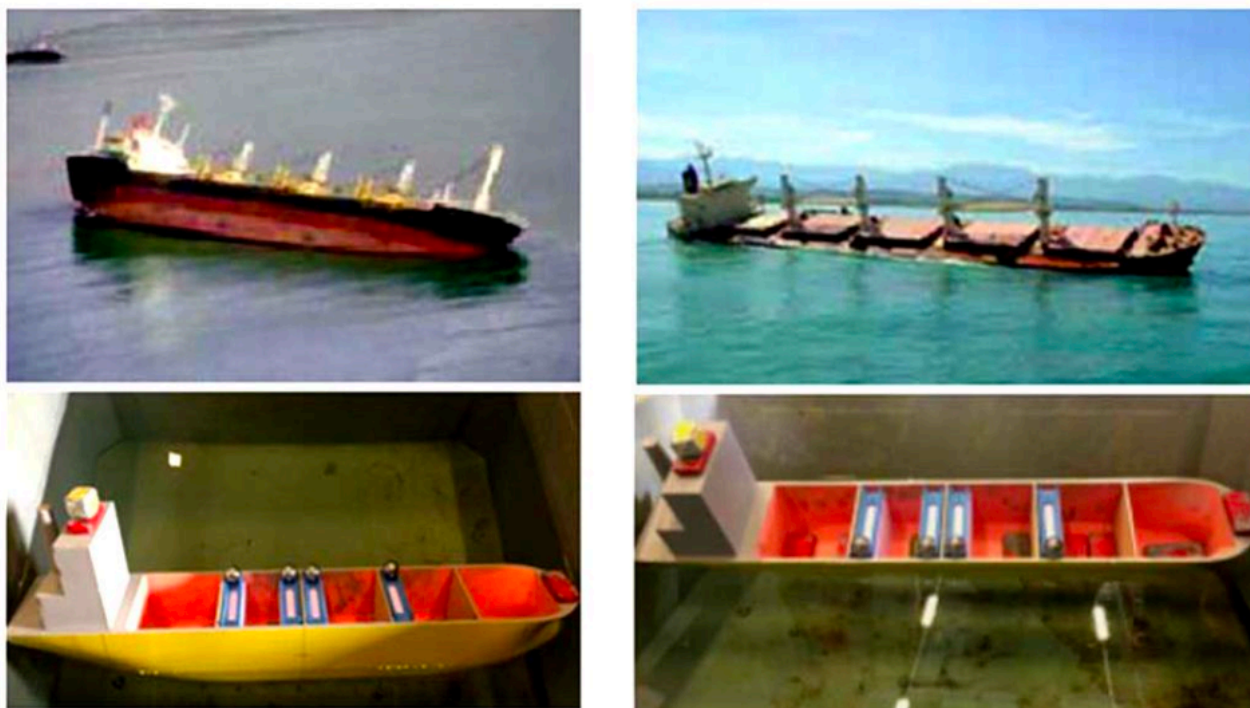


Рисунок 26 - Сравнение поведения реального судна и масштабной модели под влиянием свободной поверхности

При последовательном образовании свободной поверхности в трех трюмах вследствие несовпадения по фазе перемещений шлама судно приобретает небольшой крен. На модели это положение, когда на одной полке шар находится на одном борту, а на двух других – на противоположном. Это, как раз, тот момент, когда экипаж замечает что-то необычное в поведении судна.

Катастрофический крен возникает, когда перемещения шлама сравниваются по фазе.

Отсюда можно сделать вывод, что выживание экипажа в этой ситуации зависит от:

- а) Своевременного распознавания признаков опасности, какими бы неприметными они ни были.
- б) Бдительности и постоянного наблюдения за грузом в трюмах.
- в) Твердого знания критериев устойчивости судна и их обеспечения.
- г) Готовности к оставлению судна, если в этом возникнет необходимость.
- д) Учета ограничений спасательных средств – в первую очередь по спуску спасательных шлюпок при крене.
- е) Своевременного оставления судна до возникновения катастрофического крена опрокидывания судна.

Последствия динамической сепарации груза для безопасности судна и его экипажа представляют для судна те же риски, что и при разжижении груза. Как разжижение груза, процесс динамической сепарации можно предотвратить, обеспечив ограниченное содержание мелких частиц и влаги в боксите, поскольку распределение частиц по размерам и содержание влаги являются основными параметрами, влияющими на возникновение этого явления.

За последнее десятилетие парк балкеров вырос с 10 000 судов в 2013 году до почти 12 200 к январю 2024 года и составляет более 40% мирового тоннажа. Появились десятки новых навалочных грузов, совершенствуется технология перевозки. Поэтому крайне важно, чтобы экипажи были осведомлены о любых опасных свойствах груза. Как живой документ МКМПНГ развивается и пересматривается каждые два года (рис.27).

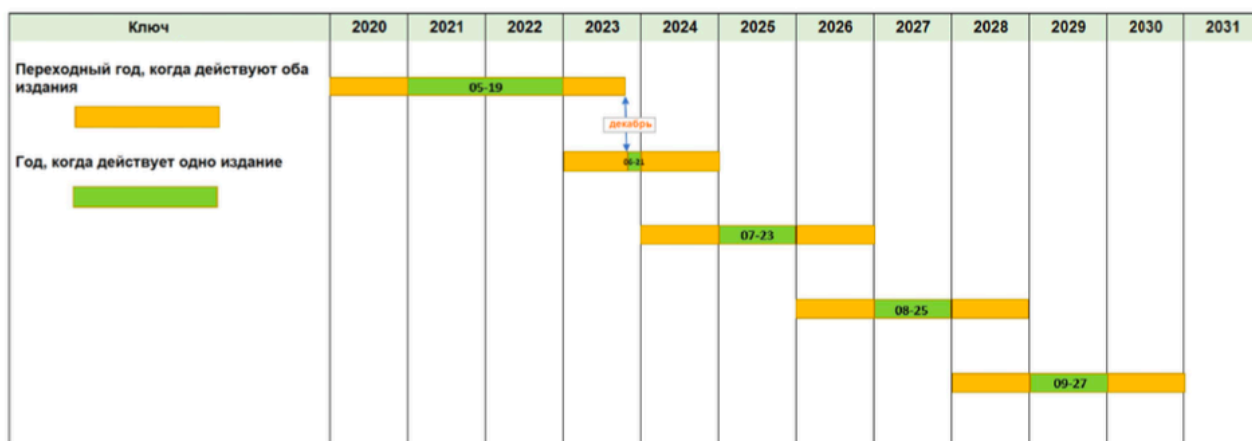


Рисунок 27 – Цикл поправок МКМПНГ

Исходя из результатов испытаний, Глобальной рабочей группой в интересах морской перевозки была предложена классификация бокситов на основе процентного содержания мелкодисперсионных частиц.

Предложение было рассмотрено на 101-й сессии Комитета по безопасности на море ИМО в июне 2019 года. Принятые поправки к МКМПНГ разделили бокситы на две группы:

- **Группа С**, в которую вошли бокситы содержащие:
 - 30% или менее мелких частиц размером менее 1 мм ($D_{30} \geq 1$ мм); или
 - 40% или менее частиц размером менее 2,5 мм ($D_{40} \geq 2,5$ мм); или
 - и то и другое вместе.

Если грузоотправитель предоставит капитану свидетельство о том, что согласно результатам испытаний, одобренных компетентным органом порта погрузки, содержащаяся в грузе

влага свободно стекает из груза, вследствие чего степень насыщения не может достичь 70%, то этот груз также относится к Группе С.

За исключением обеспечения чистоты льяльных колодцев и работоспособности осушительной системы, особых мер предосторожности такой груз не требует.

- **Группа А** – боксит мелкозернистый, содержащий:

- более 30% мелких частиц размером менее 1 мм ($D_{30} < 1$ мм); и
- более 40% частиц размером менее 2,5 мм ($D_{40} < 2,5$ мм).

Такой груз может утратить стабильность, если произойдет динамическая сепарация содержащейся в нем влаги с образованием жидкой взвеси (из воды и мелких твердых частиц) над твердым материалом, в результате чего может возникнуть эффект свободной поверхности, что может существенно повлиять на остойчивость судна. Данный груз не склонен к динамической сепарации при транспортировке с влагосодержанием ниже его транспортабельного предела влажности.

Опасность эффекта динамической сепарации была признана реальной на 105-й сессии КБМ в апреле 2022 года Резолюцией MSC.500(105) заголовок раздела 7 заменен на следующий: «Грузы, склонные к разжижению или подверженные динамической сепарации». Определение «Группа А» заменено следующим текстом: «Группа А включает грузы, характеризующиеся опасностью вследствие присутствия влаги, которая может привести к разжижению или к динамической сепарации, если грузы перевозятся при содержании влаги, превышающем транспортабельный предел влажности».

Эти поправки вступили в силу 1 декабря 2023 года.

Наиболее подходящим тестом для определения транспортабельного предела влажности для всех выявленных механизмов нестабильности, включая разжижение и динамическую сепарацию, признается тест Проктора-Фагерберга, который основан на надежных геотехнических измерениях. Применительно к бокситам этот тест был модифицирован. Пресс-форма большего размера позволила проводить испытания бокситов, содержащих крупные частицы. Молот массой 350 г заменен на 150-граммовый D-образный молоток, обеспечивающий давление трамбовки, которое соответствует фактической насыпной плотности бокситов. В модифицированном тесте Проктора-Фагерберга транспортабельный предел влажности (ТПВ) определяется на уровне 80% от насыщенности, что оставляет запас безопасности 10-15%.

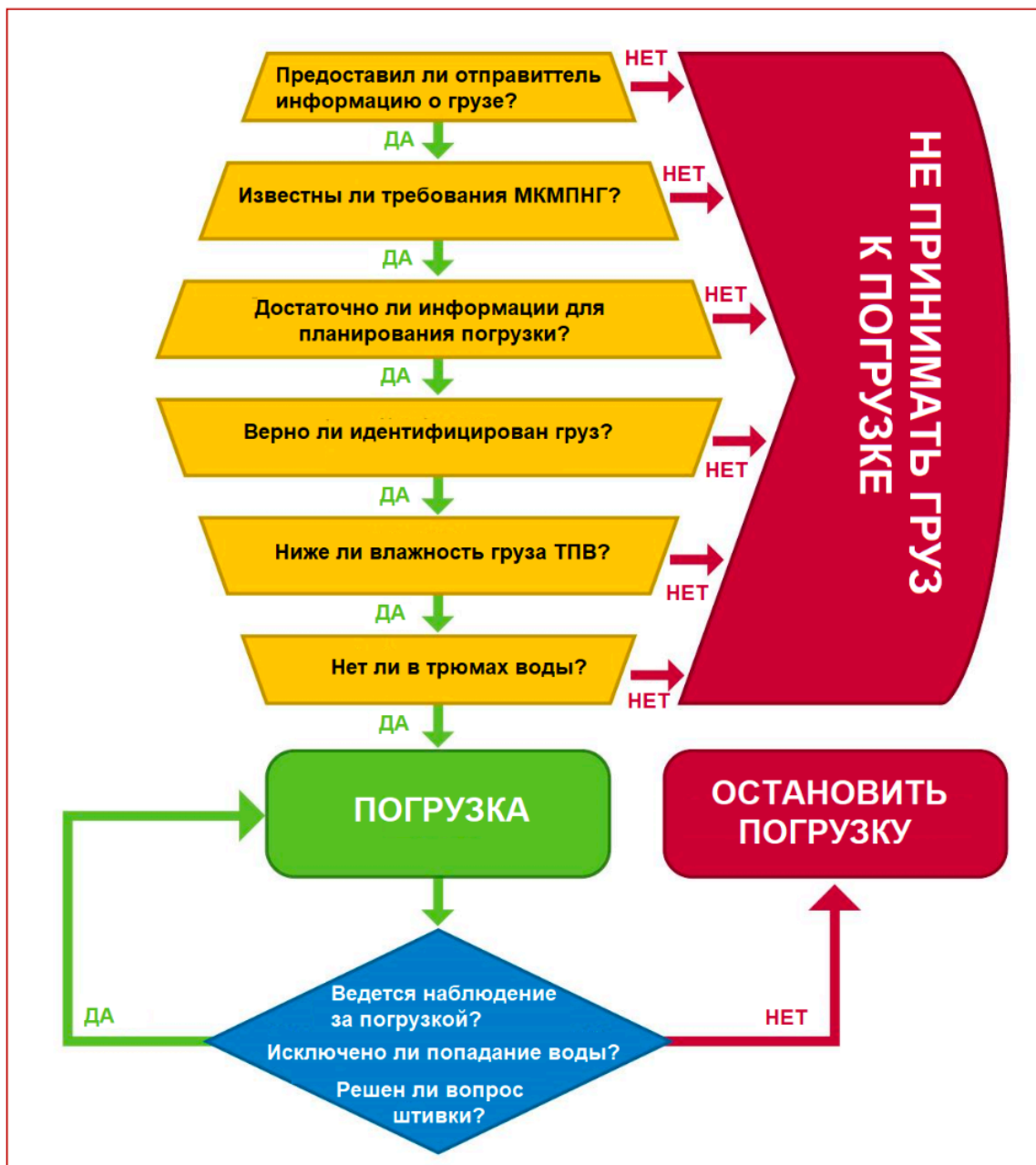


Рисунок 28 – Действия до и во время погрузки

Раздел 7.3.1.1 Кодекса МКМПНГ гласит, что: “Грузы группы А принимаются к погрузке только в том случае, если фактическое содержание влаги в грузе меньше его ТПВ.” Следовательно, капитан судна не должен принимать такой груз к погрузке без предварительного получения соответствующей документации, подтверждающей содержание влаги и ТПВ в грузе. Блок-схема действий до и во время погрузки приведена на рис. 28.

1. Во время погрузочных операций и в рейсе влагосодержание груза должно поддерживаться на уровне ниже ТПВ.

2. Обработка груза не должна производиться во время атмосферных осадков.

3. Во время обработки груза все нерабочие люки грузовых помещений должны быть закрыты.

4. Следует регулярно, как минимум один раз в день в течение рейса, если имеется такая возможность, проводить осмотр поверхности груза. Если во время рейса на поверхности груза наблюдается свободная вода или жидкая взвесь или груз приходит в состояние разжижения, капитан должен предпринять соответствующие действия для предотвращения смещения

груза и опрокидывания судна и рассмотреть возможность аварийного захода в место убежища. Льяла грузовых трюмов должны проверяться через регулярные промежутки времени и по мере необходимости осушаться.

Нештатное поведение судна (подрагивания, рыскание) может также указывать на нестабильность груза, требующую соответствующих мер со стороны капитана.



Рисунок 29 – Баночный тест

К сожалению, имелись случаи, когда отправитель в информации о грузе указывал неверную величину ТПВ. Капитан судна может провести проверочные испытания для приблизительного определения возможности разжижения груза на борту судна или на причале с помощью следующего вспомогательного метода:

Металлическая банка цилиндрической формы или подобная ей емкость (объемом 0,5 – 1 л) наполовину заполняется пробой вещества. Затем эту банку берут в руку и резко ударяют с высоты около 0,2 м о твердую поверхность, такую, как поверхность массивного стола. Эту процедуру повторяют 25 раз с интервалами в одну или две секунды. После этого поверхность вещества проверяют на предмет появления свободной влаги или состояния разжижения. Если обнаружено появление свободной влаги или состояние разжижения, то следует принять меры к проведению дополнительных лабораторных испытаний вещества до того, как оно будет принято к погрузке.

В отчете о расследовании гибели “Bulk Jupiter” приведен весьма показательный эпизод. Руководство компании, обеспокоенное продолжительными ливнями во время стоянки судна в порту, предложило капитану провести баночный тест для определения состояния груза. В ответ капитан спросил: «Что вы подразумеваете под тестом?». Это свидетельствует о том, что те, кому вверяется жизнь людей и судьба судна, не всегда хорошо знают требования нормативных документов.

Минимальные стандарты компетентности судоводителей уровня управления приведены в Таблице А-II/2 Кодекса ПДНВ. Для выполнения своих обязанностей по функции «Обработка и размещение грузов на уровне управления» от кандидата на получение диплома капитана или старшего помощника капитана требуется умение установить процедуры безопасной обработки грузов согласно положениям соответствующих документов, таких как МКМПОГ, МКМПНГ, Приложения III и V к МАРПОЛ 73/78, и т.п. В отношении перевозки навалочных грузов требуется также знание ограничений относительно прочности важнейших конструктивных элементов навалочного судна и умение толковать полученные значения изгибающих моментов и перерезывающих сил вместе с умением объяснить, как избежать вредного влияния, которое оказывают на навалочные суда коррозия, усталость и неправильная обработка груза. В качестве метода демонстрации компетентности может использоваться одобренный опыт работы на судне или одобренная подготовка на тренажере.

Для понимания потенциальных опасностей, связанных с погрузкой, транспортировкой и выгрузкой навалочных грузов, а также приобретения прочных знаний в области безопасности и защиты окружающей среды, оказания помощи в освоении стандартных операций и навыков в использовании МКМПНГ ИМО разработан и одобрен Модельный курс 1.45 «Безопасная обработка и транспортировка навалочных грузов».

Курс предназначен для экипажей морских судов, портовых властей, операторов терминалов, грузоотправителей, сотрудников судоходных компаний, персонала лабораторий, имеющих отношение к перевозке навалочных грузов. Слушатель, успешно окончивший данный курс способен:

- идентифицировать риски, связанные с перевозкой навалочного груза;
- оценивать возможность приема к перевозке партии навалочного груза, в частности груза группы А;
- соблюдать безопасные методы погрузки и практику перевозки навалочных грузов;
- выполнять требования охраны судна и портового средства при погрузке, транспортировке и выгрузке навалочного груза;
- организовать и вести контроль грузовых операций согласно положениям МКМПНГ.

К сожалению, в МГУ им. адмирала Г.И. Невельского, одной из ведущих морских образовательных организаций страны, такой подготовки специалистов нет.

Список литературы

1. Мотрич, В. Н. Балкеры несут потери. // Морской флот. – 2021. - №4 (1556). – С.48-57.
2. Bulk Cargo Liquefaction and Dynamic Separation [Электронный ресурс]// North of England P&I. – Режим доступа: <https://www.nepia.com/publications/bulk-cargo-liquefaction-briefing/> (дата обращения 09.09.2024).
3. Report of the marine safety investigation into the loss of a bulk carrier “Bulk Jupiter” in the South China Sea on January 2nd 2015 [Электронный ресурс]// The Bahamas Marine Authorities. – Режим доступа: <https://www.bahamasmaritime.com/services/investigations/> (дата обращения 09.09.2024).
4. The Global Bauxite Working Group Final Report and Peer Review Letter. SUB-COMMITTEE ON CARRIAGE OF CARGOES AND CONTAINERS 4th session Agenda item 5. CCC 4/INF.10. [Электронный ресурс]// Международная морская организация. – Режим доступа: <https://docs.imo.org/Category.aspx?cid=639&session=4> (дата обращения 09.09.2024).
5. Доклад Комитета Безопасности на море на его 105-й сессии. Дополнение 2. [Электронный ресурс]// Международная морская организация. Депозитарий ресурсов и документов. – Режим доступа: <https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=141781> (дата обращения 10.09.2024).

Поступила в редакцию 2 декабря 2024 г.

Environmental and power impact on the efficiency of heat exchangers

Panasenko A.A.¹, Petrashev S.V.,¹ e-mail: Panasenko2005@yandex.ru

¹ Maritime State University named after Adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok

Thermal efficiency factor is equal to 0,95 - 0,98 (according to different sources) when calculating heat exchangers in the thermal balance equation. However this parameter is given for a nominal mode and standard ambient temperature. The thermal efficiency coefficient also changes with changes in the ambient temperature and nominal mode. The results of the study of the efficiency of heat exchangers under non-nominal operating conditions and non-standard ambient temperatures were obtained.

Key words: Thermal efficiency factor, standard ambient temperature, disposal and using energy.

Nomenclature

Q heat flux [W]

T temperature [K]

w water equivalent [W/K]

k coefficient of heat exchange [$W/(K \cdot m^2)$]

F area of heat exchange [m^2]

S entropy flux [W/K]

Δ differential between value

Low index:

h heater

without symbol heated

d disposal

l losses

in initial

is isolation

0 surrounding condition

High index:

0 zero section of heat exchange area

F end section of heat exchange area

f any section of heat exchange area

Introduction

Any settlement technique can be considered from the point of view of a more or less adequate model of the real system under consideration. A basis of any calculation of heat exchanger is the thermal balance connecting disposal and using energy of heat-carrying agents. For example,

$$Q_{dh} - Q_d = \Delta Q + Q_l \quad (1)$$

Engineers frequently neglect size Q_d in practical calculations in connection with its small value if comparison with Q_{dh} . It is obvious, that ΔQ in the opportunity in the case of ideal isolation of a heat exchanger does not exceed size $Q_{dh}-Q_d$. Losses in this case will be only due to the depreciation (dissipate) of energy from the irreversible process of heat exchange of heating and heated up streams. We shall consider these ideal cases for heat exchangers with counterflow and identical movement of heat-carrying agent.

Results and discussion

Cooling of the heating heat-carrying agent with a counterflow is ideally possible to the reference temperature of the heated up heat-carrying agent. This process corresponds to a heat transfer with values $\kappa F = \infty$, $\Delta S_{in} = 0$ and $\Delta Q = w_h(T_h^0 - T^F)$. At the same time, the thermal balance (1) in section F is carried out, if water equivalents of heating and heated up heat-carrying agents are equal. Real process with $\kappa F \neq \infty$ and $\Delta S_{in} = \min$ will turn out at $\Delta Q = Q_{dh} - Q_d$. This case also is characterized by minimal energy dissipation and its criterion is the constant ratio of temperatures of the heat-carrying agents along the heat exchanger length [1]. Really, if $w_h(T_h^0 - T_h^F) = w_h T_h^0 - w T^F$ or $w(T^0 - T^F) = w_h T_h^0 - w T^F$ the solution to these equations can be only such that

$$\frac{T^F}{T_h^F} = \frac{w_h}{w} \quad (2)$$

Graphic dependences are shown on fig. 1 for counterflow heat exchanger.

Cooling of the heating heat-carrying agent with the same direction of thermal streams is ideally possible to final temperature of the heated up heat-carrying agent. This process corresponds to a

$$\Delta Q = \frac{w_h w (T_h^0 - T^0)}{w_h + w}$$

heat transfer with values $\kappa F = \infty$ and $\Delta S_{in} = 0$. But the thermal balance (1) in section F is carried out, if water equivalents of heating and heated up heat-carrying agents are equal and there is a linear dependence of change in their heat on length of the heat exchanger. Only in this case $\Delta S_{in} = 0$. Real process with $\kappa F \neq \infty$ and $\Delta S_{in} = \min$ will turn out at $\Delta Q = (Q_{dh} - Q_d)/2$. From here follows, that with the same direction of heat-carrying agent half of the possible potential is lost.

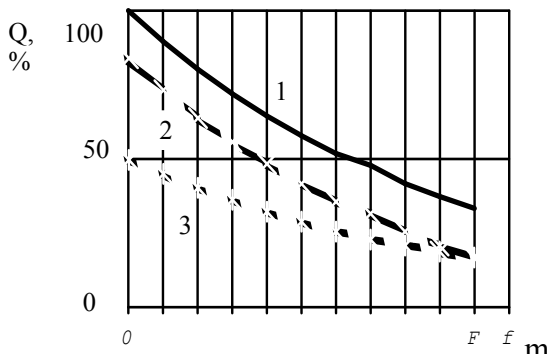


Figure 1: Dependences
1 - heater heat, 2 - heated heat at DS=0, 3 - heated heat at DS=min from heat exchange area

Sometimes it is necessary to take into account influence of an environment (for example, at air conditioning). In some cases temperature of heating or heated up environments depend on an ambient temperature. Then the ambient temperature determines heat exchanger loading.

The above-stated cases take into account only a variant at which heated up and heating heat-carriers are considered only and environment surrounding them is not taken into account. Most often the heating heat-carrier fulfilled in heat exchanger is not used anywhere else (but for large heat exchangers, for example, boilers, recycling of heat is used). Moreover, in some cases the heat-carrier is necessary for cooling (of the exhaust steam before feeding it to the boiler). Therefore it is necessary to take into account the heat losses of the spent heating heat-carrier when its potential is reduced to the potential of the environment. For a counterflow heat exchanger these losses will be

equal $Q_{l0} = w_h (T_h^F - T_0)$. For a case with minimal dissipate energy $Q_{l0} = w(T^F - T_0) = Q_d \left(1 - \frac{T_0}{T^F}\right)$. Apparently from this equation, the minimal heat loss to the environment is proportional to available heat of the heat-carrying agent and it exergy temperature function.

For identical direction of the thermal streams of the heat exchanger heat loss to the environment

will be equal $Q_{l0} = \frac{Q_d}{2} \left(1 - \frac{T_0}{T^F}\right) + \frac{Q_{dh}}{2} \left(1 - \frac{T_0}{T_h^F}\right)$.

To determine the influence of the environment, we shall work out the equation in which the maximum amount of exergy (i.e. high exergetic efficiency of the heat exchanger) is transferred [2]. In result the following ratio for counterflow of heat exchanger will turn out

$$\frac{T^f - T_0}{T_h^f - T_0} = \frac{w_h}{w} \quad (3)$$

In other words, along the entire length of the heat exchanger, the ratio of the temperature difference between the heated up heat-carrier and an environment and the temperature difference between heating heat-carrying agents and an environment is a constant value and equal to the relation of water equivalents of heating and heated up. If the temperatures of the heating and heated up heat-carriers, as well as the water equivalent of the heated up heat-carrier with the increase in temperature of an environment are kept constant, it is necessary to reduce a heating stream so that total losses from irreversibility of the process and dissipation of energy of the heating heat-carrier in surrounding space were minimal.

When using one-line heat-exchanger, to create minimal energy losses, the equality of heating and heated up water equivalents is necessary.

For a conclusion of dependence of losses of energy due to bad isolation, we assume that only heating heat-carrier borders on the isolation of heat exchanger.

The equation (1) for counterflow of heat exchanger

$$Q_{lis} = k_{is} F_{is} (T_h - T_0)$$

$$Q_{lis} = \frac{\Delta Q \cdot k_{is} \cdot F_{is}}{w_h \ln \left(\frac{\frac{\Delta Q}{w_h}}{T_h^0 - T_0 - \frac{\Delta Q}{w_h}} + 1 \right)} \quad (4)$$

Graphic dependences Q_{lis} according equation (4) are shown on fig. 2, 3.

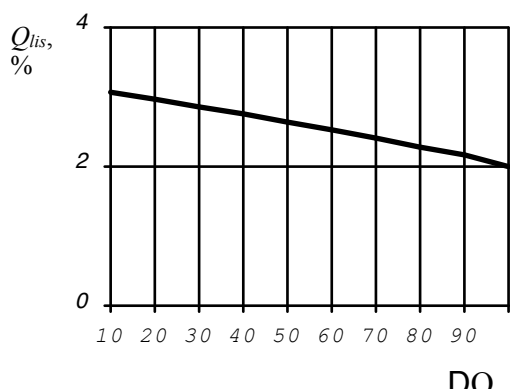


Figure 2: Dependence heat losses through heat exchange isolation from using energy

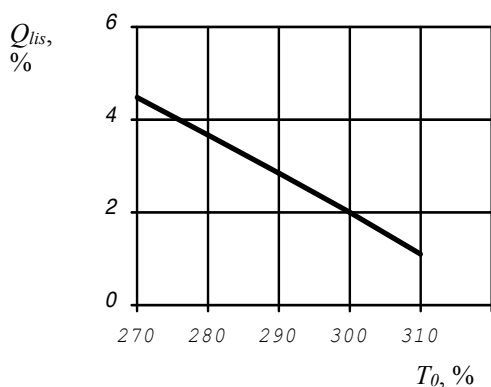


Figure 3: Dependence heat losses through heat exchange isolation from surrounding temperature

Conclusion

Results of this article are as follows:

1. Based on thermal balances the equations for the maximum heat transfer in one-line and counterflow heat exchangers are received.
2. Criteria for transfer of the maximum heat at the given ambient temperature are shown.
3. The dependence of the heat flowing through the isolation counterflow of heat exchanger on the ambient temperature and its thermal load is shown.

References

1. Tsirlin A.M. *Optimal processes in irreversible thermodynamics and microeconomics*, Russia, 2003.
2. Hohshteyn D.P. *Modern methods of the thermodynamic analyses of power installations*, Russia, 1969.

Поступила в редакцию 17 декабря 2024 г.

**ВЕСТНИК
МОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Выпуск 97 / 2024

Дата выхода в свет – 27 декабря 2024 г.

Выходит четыре раза в год.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору
в сфере связи и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-82589 от 30.12.2021.

Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Морской государственный университет
имени адмирала Г.И. Невельского».

Адрес учредителя, издателя и редакции: 690003, Россия, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а.
Электронная почта редакции: vestnik@msun.ru; телефон редакции: +7 (423) 251-76-36.