

УДК 656.614.3.073.003

METHOD OF THE VALUE OF THE VESSEL'S HULL DEFLECTION DETERMINATION

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ИЗГИБА КОРПУСА СУДНА

Milietin O.V., *captain, PhD student***Милетин А.В.**, капитан, аспирант*Odessa National Maritime Academy, Ukraine**Одесская Национальная Морская Академия, Украина*

ABSTRACT

The problem of vessel's mean draught provisional calculation and its practical determination while the vessel is under cargo operation caused by deflection of the vessel's hull is reviewed. The real and practical method of the deflection value is proposed.

Keywords: bending moments, shear forces, hogging, hull deflection value.

Постановка проблемы в общем виде и её связь с важными научными или практическими задачами

Обязательным требованием планирования и проведения грузовых операций является обеспечение мореходных качеств судна как минимум к моменту их окончания. Актуальность вышеуказанного требования значительно повышается с развитием контейнеризации и унификации морских грузоперевозок. С одной стороны, высокая экономическая эффективность эксплуатации судна может быть достигнута только при условии его полной загрузки. С другой стороны, все факторы обеспечивающие мореходность судна и безопасность предстоящего перехода должны быть неукоснительно соблюдены. Дилемма между этими двумя требованиями очень актуальна для современных контейнеровозов. План погрузки контейнеровоза должен быть рассмотрен и одобрен судовой администрацией заранее и как минимум до начала грузовых операций. В конце погрузки все требования остойчивости и прочности судна должны быть в пределах норм установленных классификационным сообществом включая требования о грузовой марке судна. В случае если параметры остойчивости судна не отвечают таким требованиям, во многих случаях возникает необходимость отказа от части груза. Как правило нет возможности отказаться от нескольких контейнеров при окончании погрузки если возникает вероятность того что судно может быть перегружено и грузовая марка будет “утоплена”. Нельзя разрывать коносаментную партию груза. Поэтому это, как правило, приводит к отказу не от нескольких контейнеров, а от значительной партии груза, что ведёт к значительным экономическим убыткам, включая штрафные санкции. Поэтому грузовой план

судна должен быть просчитан с максимальной точностью и все возможные факторы, включая требования о грузовой марке, должны быть учтены заранее.

Как известно современные контейнеровозы испытывают значительные стрессовые нагрузки. Перерезывающие силы и изгибающие моменты могут достигать предельных значений в процессе эксплуатации судна. Ввиду значительной деформации корпуса судна из-за стрессовых нагрузок для получения достоверной информации об осадке необходимо снимать как минимум четыре осадки: носовую, кормовую и две бортовых (значения с обоих бортов). Это часто вызывает значительные затруднения ввиду того что осадка по борту которым судно ошвартовано к причалу часто заслонена береговым кранцем и поэтому невидима, а снятие осадки с морского борта часто вообще не представляется возможным принимая во внимание весьма ограниченное время стоянки судна у причала после окончания погрузки. Поэтому, как правило, капитан и грузовой помощник вынуждены использовать среднее из суммы носовой и кормовой марки, что зачастую приводит к значительным ошибкам. Расчётные и актуальные значения носовых и кормовых осадок, как правило, достаточно редко совпадают. Часть разницы может составлять величина прогиба корпуса, который может быть достаточно значительной, учитывая размеры современных контейнеровозов, а другая часть - это неточность в заявленном весе груза и оценке веса судовых запасов и балласта. Контейнеровозы обычно испытывают деформацию корпуса, вызванную положительным изгибающим моментом, так называемый перегиб или "hogging". В этом случае значения носовых и кормовых осадок больше чем осадки по миделю как минимум на величину прогиба корпуса. Поэтому возможность оценить степень разницы вызванной прогибом корпуса, то есть рассчитать линию прогиба корпуса, вызванную действием изгибающих моментов при окончании погрузки судна, хотя бы в пределах определенной точности имеет большое значение при планировании грузовых операций и повышению эффективности эксплуатации в частности современных контейнеровозов.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешённых ранее частей общей проблемы

В книге [1] рассматриваются общие вопросы планирования и проведения грузовых операций на судах, в книге Снопкова [2] достаточно подробно рассматриваются вопросы составления предварительного и исполнительного грузового плана для контейнеровозов. В работах иностранных авторов рассматриваются расчёт перерезывающих сил и изгибающих моментов вследствие загрузки судна. Но наиболее подробно и основательно, метод расчета линии прогиба корпуса судна изучен в работах академика А. Н. Крылова, посвященных расчёту корпуса судна, рассматриваемому как балка на упругом основании. Вопросам применения математических программ, в частности Mathcad для расчётов нагрузок и линии прогибов балок на упругом основании посвящена книга Е. Г. Макарова [4].

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Целью данной статьи является рассмотрение и предложение разработки методов расчета линии прогиба корпуса судна, вызванных изгибающими моментами возникающими при неравномерном распределении нагрузок на корпус судна и сил поддержания.

Изложение материалов исследования с обоснованием полученных результатов

Корпус водоизмещающего судна является сложной пустотелой балкой подкреплённой в различных направлениях набором, связи которого участвуют в нескольких видах деформаций, которые вызываются как общим изгибом корпуса так и местным изгибом перекрытий, набора, пластин [5]. Внешние нагрузки вызывающие такие деформации принято разделять две части:

- квазистатические (нагрузки на тихой воде);
- переменные нагрузки (волновые).

В данной статье посвященной проблемам расчета линии изгиба корпуса у причала судна мы будем уделять внимание только квазистатическим нагрузкам.

Возникающие внутренние напряжения корпуса судна уравнивают внешние нагрузки. Можно определить сложное напряжённое состояние корпуса как сумму напряжений, вызванных изгибом в вертикальной, горизонтальной плоскостях и кручением. Все эти напряжения возникают в связях корпуса: обшивка днища и бортов, настилы палуб и второго дна, стенки вертикального киля, стрингеров, карлингсов, продольные балки набора и другие непрерывные продольные связи. Ввиду сложности конструкции судна для упрощения расчётов его принято представлять в виде условной балки, называемой эквивалентным брусом к которому применимы все основные законы и методы решения задач сопротивления материалов [3].

Изгиб корпуса судна на тихой воде вызывается неравномерным распределением сил веса и поддержания по длине судна, т.е. в каждом поперечном сечении эти силы имеют разные значения, хотя в целом они уравновешены и их суммарные значения равны между собой. Силы поддержания распределены по плавной кривой форма, которой определяется строевой по шпангоутам для данной посадки судна, силы веса отображаются ступенчатой кривой отвечающей распределению массы корпуса судна, надстроек, механизмов, устройств, запасов и грузов. Разность между силами веса и поддержания в каждом поперечном сечении определяет интенсивность результирующей нагрузки $q(x)$, которая фактически и вызывает изгиб корпуса. Под действием этой нагрузки в корпусе судна возникают перерезывающие силы $N(x)$ и изгибающие моменты $M(x)$, которые сами по себе являются интегральными зависимостями от результирующей нагрузки.

$$N(x) = \int_0^x q(x)dx \quad (1)$$

$$M(x) = \int_0^x \int_0^x q(x)dx \quad (2)$$

Эти два силовых фактора вызывают возникновение в любом поперечном сечении системы нормальных и касательных к этому сечению напряжений.

Действительно при упругой деформации корпуса (например, при перегибе) происходит растяжение верхней палубы и прилегающих к ней конструкций и сжатие в продольном направлении киля и обшивки двойного дна судна. В теории сопротивления материалов доказывается что в любой балке имеется некоторый нейтральный слой, который не испытывает никакого растяжения/сжатия при изгибе балки, а также что этот слой находится в районе оси проходящей через центр тяжести сечения и продольном направлении. Фактически интенсивность нормальных напряжений, вызванных изгибающим моментом увеличивается с удалением от этой оси а их направление меняется на противоположное на разных краях поперечного сечения. Перерезывающие силы вызывают в любом сечении корпуса судна возникновение касательных к этому сечению напряжений, причём их интенсивность достигает максимального значения в районе центральной оси и убывает по мере удаления от неё. Все вышеуказанные внутренние напряжения позволяют корпусу судна (условной балке) действуя как монолитное тело сопротивляться возникающим под действием внешних сил формациям, в частности изгибу. То есть изгиб корпуса, перерезывающие величины, изгибающий момент – связанные между собой величины. При изгибе каждое сечение корпуса судна получает два перемещения: линейное – прогиб (перемещения центра тяжести сечения в направлении приложенной внешней силы) и угловое – угол поворота сечения. Пусть $v=v(x)$ – неизвестная функция, которая описывает положения сечений условной балки в деформированном состоянии. Ось условной балки при этом искривляется по кривой с уравнением $v=v(x)$. В курсе сопротивления материалов[3] доказывается что:

$$EJ_x v'' = M_x; \quad (3)$$

$$v' = \Theta, \quad (4)$$

где v -функция описывающая кривизну балки,

v' и v'' – её соответственно первая и вторая производная,

E - модуль Юнга, постоянная для определённого материала величина, характеризующая способность его сопротивляться воздействию внешних нагрузок. E для стали имеет величину 206 ГПа,

J_x - осевой момент инерции сечения относительно оси x ,

Θ -угол наклона касательной к кривой линии прогиба корпуса выраженный в радианах.

То есть, для получения непосредственного перемещения центра тяжести любого сечения балки, при её изгибе, мы должны дважды проинтегрировать уравнение упругой линии баки. Первое интегрирование даст нам угол поворота сечений балки или угол касательной к линии прогиба балки, выраженный в радианах, а второе интегрирование даст нам само уравнение прогиба:

$$EJ_x \Theta = \int_0^x M_x dx + C, \quad (5)$$

$$EJ_x v = \int_0^x \int_0^x M_x dx dx + Cx + D. \quad (6)$$

Где C и D – произвольные постоянные получающиеся в результате интегрирования. В общем случае они зависят от условий закрепления балки. C – прогиб балки в начале координат, а D – угол поворота сечения в начале координат. Поскольку корпус судна – условная балка, находящаяся на упругом основании, то нет прогиба или поворота сечения в начале координат, т.е. $C=0$ и $D=0$.

То есть, для получения величины прогиба корпуса в миделевом сечении нам необходимо как минимум дважды проинтегрировать значение изгибающего момента по длине судна, либо трижды проинтегрировать значение перерезывающих сил. Величины значений распределения перерезывающих сил и изгибающих моментов по шпангоутам судна рассчитываются грузовой программой и могут быть взяты из неё для каждого случая погрузки. Также можно рассчитать значение этих сил как интегральную сумму распределённой нагрузки. Задача интегрирования достаточно просто решается с помощью такого мощного математического инструмента как “Matlab”, но также можно воспользоваться методом интегральной суммы значений сил и моментов по длине судна (шпангоутам) без использования каких-либо математических программ.

Полученное значение двойной интегральной суммы изгибающего момента для каждого шпангоута необходимо разделить на EJ_x , то есть на произведение модуля Юнга и осевой момент судна относительно продольной оси, и мы получим кривую распределения прогиба корпуса судна вдоль его продольной оси. Поскольку модуль Юнга для стали является постоянной величиной (для материала из которого изготовлен корпус судна – сталь), то трудности возникают с определением J_x . В работе [5] предлагается способ расчёта момента инерции корпуса судна. Но практически предложенный расчёт, в котором учитывается влияние всех продольных связей на изгиб корпуса, является достаточно трудоёмким и, если пытаться выполнить его практически на борту судна, это даёт очень приближённый результат. Точное расчётное значение осевого момента инерции можно рассчитать при проектировании судна в конструкторском бюро. Но, такие данные, как правило, не приводятся в технической документации судна. Кроме того, значение осевого момента инерции изменяется со старением корпуса, коррозией и возникновением дефектов связей корпуса (трещины, остаточные деформации). В этом случае наиболее приемлемым и достаточно точным является расчёт осевого момента инерции из эмпирических наблюдений и снятия носовой, кормовой и бортовых осадок при как минимум нескольких состояниях погрузки и изгиба корпуса судна, и практического определения величины изгиба корпуса в миделевом сечении. Полученные таким образом несколько значений осевого момента инерции необходимо усреднить для использования в дальнейшем расчётах значения величины изгиба корпуса и величины осадки по миделю в зависимости от распределения нагрузки судна и соответственно перерезывающих сил и изгибающих моментов.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

Вышеуказанная методика расчёта величины прогиба корпуса была испытана на современном мега-контейнеровозе третьего поколения вместимостью 8400 тэус и принесла удовлетворительную для практических целей точность. В перспективе предлагается доработка грузовых программ судов методом расчёта осадок судна с учётом фактического изгиба корпуса судна на тихой воде (портовых условиях).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксютин Л.Р. Грузовой план судна/ Л.Р. Аксютин. – М.: Транспорт, 1976-112 с
2. Снопков В. И. Технология перевозки грузов морем/ В. И. Снопков. - С. Петербург: АНО НПО “Мир и семья”, 2001 г.- 560 с.
3. Александров А. В., Сопротивление материалов/ В. Д. Потапов, Б. П. Державин. Под редакцией А.В. Александрова. – М.: Высшая школа, 2003.- 559 с.
4. Макаров Е. Г. Сопротивление материалов на базе Mathcad / Е. Г. Макаров.- СПб.: БХВ- Петербург, 2004.- 512 с.
5. Максимаджи А. И. Капитану о прочности корпуса судна. Справочник / А.И. Максимаджи. –Л.: Судостроение, 1988.-224 с.