

УДК 628.5.017

В.С. Игнатович, доцент, канд. техн. наук,**А.В. Кузьмина, ст. преп.***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053**E-mail: a.v.rodkina@gmail.com***СУДА КЛАССА КОУСТЕРОВ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

На основе отечественных и зарубежных материалов выполнен анализ одноотрюмных грузовых судов (коустеров). Получены приближенные зависимости характеристик и отношений, предложен аналитический метод проверки общей поперечной прочности корпуса в районе трюма в условиях тихой воды и волнения.

Ключевые слова: коустер, суда смешанного плавания, главные размерения.

Введение

Опыт морской эксплуатации судов смешанного плавания (ССП) выявил их существенные недостатки, связанные с наличием значительных эксплуатационных ограничений: потерю ходового времени в ожидании погодных окон, существенное уменьшение скорости хода на волнении. Выходом из сложившейся ситуации может быть только разработка и постройка отличных от ССП морских сухогрузных судов с более высоким стандартом прочности, более мощными двигателями, более мореходными обводами, меньшим коэффициентом общей полноты и "морскими" соотношениями главных размерений.

Для этого целесообразно рассмотреть класс мало- и средне-тоннажных сухогрузов, представленных в европейском судостроении – так называемых "коустеров" с расчетной длиной не более 85 метров (без спасательных шлюпок). Эти, как правило, одноотрюмные суда, для перевозки разнообразных грузов партиями от 1000 до 4500 тонн между небольшими морскими портами и т.п. Принципиальным отличием работы коустеров от ССП является их интенсивная эксплуатация в прибрежных морских условиях с эпизодическими заходами во внутренние водные бассейны. Коустеры, в отличие от ССП, оптимизированы для работы именно в море. Сопоставление основных элементов и характеристик, а также конструктивных особенностей более 30 коустеров и отечественных ССП дедевейтом 3 – 8 тыс. тонн позволило установить техничный облик перспективного сухогрузного судна рассматриваемого класса. Суда выполняют транспортировку как генеральных, так и наволочных грузов: металл, зерно, уголь, лес, а также контейнеры стандартов TEU, FEU. Род и партионность перевозимого груза обусловили вид коустеров: стальной однопалубный, одноотрюмный, одновинтовой теплоход с бульбовой носовой и транцевой кормовой оконечностями, двойным дном и бортами в районе грузового трюма. В кормовой оконечности находится машинное отделение (МО) и развита высокая надстройка юта (рисунок 1).

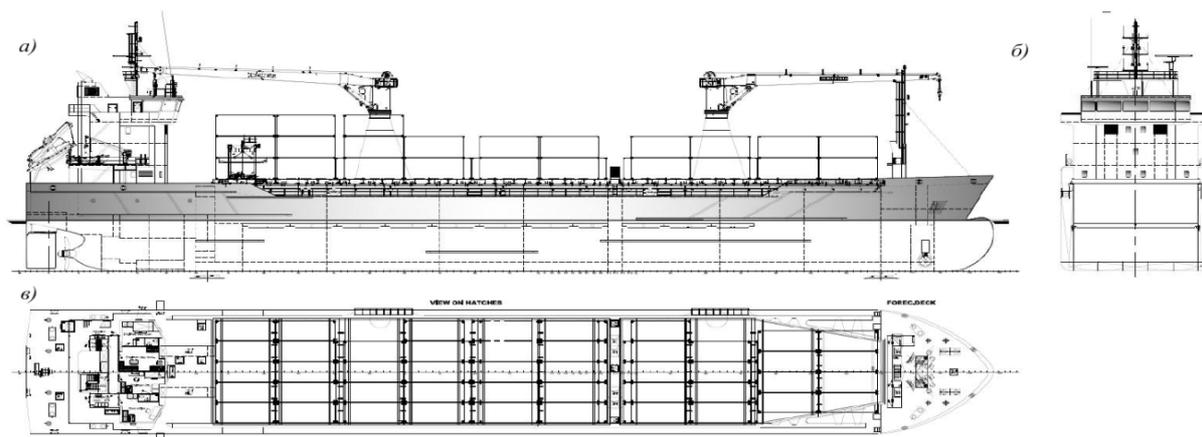


Рисунок 1 – Общий вид коустера

Продольная система набора применяется для двойного дна и двойных бортов, палубы и продольных комингсов грузового люка; МО и оконечности набираются по поперечной системе. Непрерывные продольные комингсы высотой 2100 – 2300 мм устанавливаются в плоскости продольных переборок. В двойных бортах через 3 – 4 поперечные шпации расположены рамные связи – диафрагмы (рисунок 2).

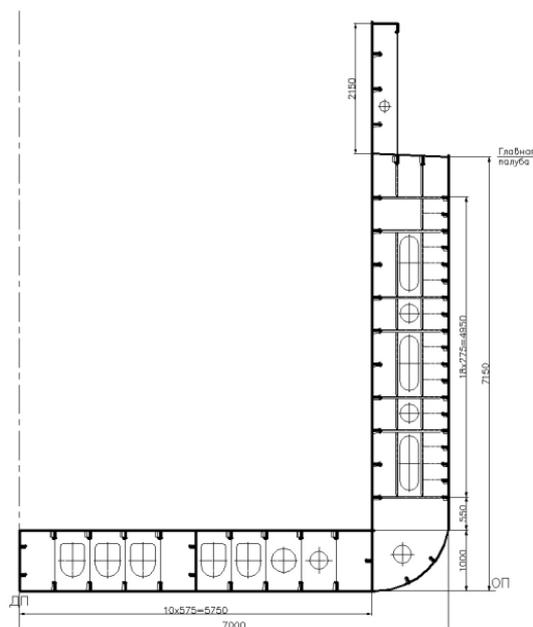


Рисунок 2 – Мидель-шпангоут коустера

Съемные люковые закрытия изготавливаются в понтонном исполнении и обслуживаются козловым краном, смонтированным на судне. Закрытия приспособлены для перевозки на них контейнеров в 2 – 3 яруса. Трюм имеет "ящичную" форму (виде прямоугольного параллелепипеда), а палуба – большую ширину раскрытия около $0,8B$ (B – ширина палубы). Среднее значение мощности ГЭУ для коустеров составляет около 2000 – 2200 кВт, при этом эксплуатационные скорости лежат в диапазоне 11 – 14 узлов. В качестве движительного рулевого комплекса почти во всех случаях используется винт регулируемого шага в сочетании с рулем.

Целью работы является анализ однотрюмных грузовых судов (коустеров), получены приближенные зависимости характеристик и отношений, предложен аналитический метод проверки общей поперечной прочности корпуса в районе трюма в условиях тихой воды и волнения.

Изложение основного материала

При сопоставлении полученных статистических данных установлено, что соотношения главных размерений коустеров по сравнению с ССП более подходят для их интенсивной эксплуатации в море (таблица 1).

Таблица 1 – Соотношения главных размерений коустеров и ССП

| Класс судна | L/B | B/d | D/d | L/D | C_b |
|-------------|-------------|-----------|------------|-----------|-------------|
| Коустер | 5,5 – 6,9 | 2,1 – 2,5 | 1,1 – 1,35 | 11 – 12,7 | 0,79 – 0,88 |
| СПП | 7,11 – 8,47 | 3,4 – 4,4 | 1,3 – 1,54 | 20 – 24,5 | 0,8 – 0,92 |

L, B, D, d – длина, ширина, высота, осадка, C_b – коэффициент общей полноты

Обусловленные более суровыми условиями работы, приведенные соотношения у коустеров меньше, чем у ССП: меньшее отношение L/B благоприятно сказывается на остойчивости и маневренных качествах судна; B/d – обеспечивает снижение сопротивления движению судна, менее резкую качку; L/D – имеет решающее значение для продольной прочности корпуса. При анализе основных элементов как коустеров, так и ССП особое внимание было уделено усредненной категории дедвейтом 3 – 8 тыс. тонн, для которой были разработаны эмпирические зависимости между характеристиками и элементами судна, приведенные в таблице 2, некоторые из которых показаны на рисунках 3 – 6.

При исследовании массива обобщенных данных было выявлено численное преобладание судов максимально возможным для заданной длины дедвейтом 4500т и вместимостью грузового трюма 5600м^3 . Указанная дедвейтная категория в морской эксплуатации вполне может заменить устаревший как технически, так и морально класс таких судов.

Можно выделить следующие преимущества коустеров для морской эксплуатации: подходящие для морской эксплуатации соотношения главных размерений и коэффициента общей полноты; наличие одного длинного трюма (до 60 м) в сочетании с большой шириной раскрытия палубы в высокой степени упрощает грузовые операции: увеличивается их скорость, отпадает необходимость в штивке груза,

Таблиця 2 – Приближенные зависимости основных характеристик и их отношений коустеров

| Характеристика | Эмпирическая формула | Характеристика | Эмпирическая формула |
|------------------------------------|--|--------------------|---|
| Дедвейт $DW(\Delta)$ | $DW(\Delta) = 0,0656 \cdot \Delta + 552, m$ | Отношение $L/B(L)$ | $L/B(L) = 0,05 \cdot L + 1,95$ |
| $DW(L)$ | $DW(L) = 118 \cdot L + 5570, m$ | $L/D(L)$ | $L/D(L) = 0,0096 \cdot L + 10,9$ |
| Водоизмещение $\Delta(L)$ | $\Delta(L) = 254 \cdot L - 15770, m$ | $L/B(\Delta)$ | $L/B(\Delta) = -0,0003 \cdot \Delta + 8,17$ |
| Грузовместимость $W(\Delta)$ | $W(\Delta) = 0,589 \cdot \Delta - 2286, m^3$ | $L/D(\Delta)$ | $L/D(\Delta) = -0,00001 \cdot \Delta + 12,44$ |
| $W(L)$ | $W(L) = 153 \cdot L - 7277, m^3$ | $B/d(L)$ | $B/d(L) = -0,002 \cdot L + 2,5$ |
| Мощность $Ne(\Delta)$ | $Ne(\Delta) = 0,439 \cdot \Delta - 794, кВт$ | $B/d(\Delta)$ | $B/d(\Delta) = 0,0001 \cdot \Delta + 1,85$ |
| Эксплуатационная скорость $V_s(L)$ | $V_s(L) = 0,17 \cdot L - 2,8, уз$ | $D/d(L)$ | $D/d(L) = 0,022 \cdot L + 1,054$ |
| Коэффициент общей полноты $C_b(L)$ | $C_b(L) = -0,008 \cdot L + 1,51$ | $D/d(\Delta)$ | $D/d(\Delta) = -0,00001 \cdot \Delta + 1,34$ |
| Число Фруда $Fr(L)$ | $Fr(L) = 0,0003 \cdot L - 0,18$ | | |

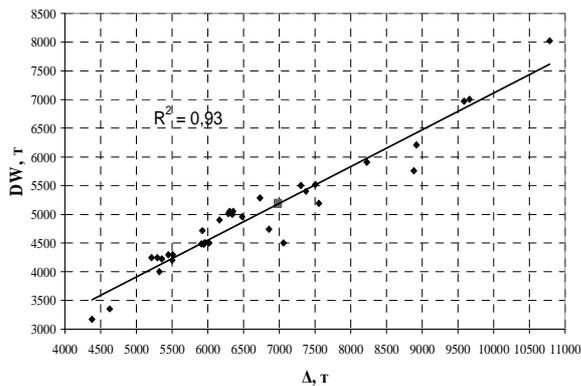


Рисунок 3 – График зависимости $DW(\Delta)$

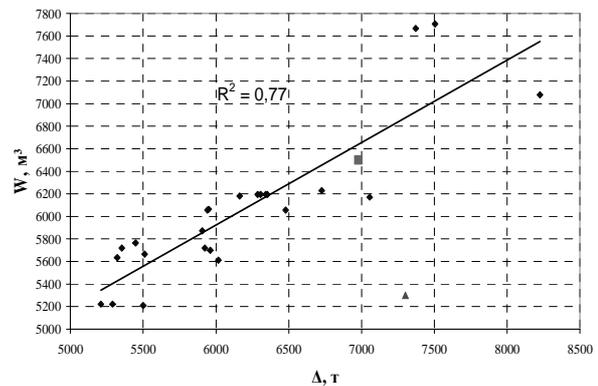


Рисунок 4 – График зависимости $W(\Delta)$

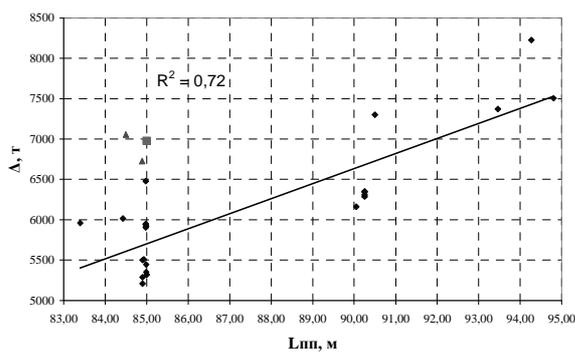


Рисунок 5 – График зависимости $\Delta(L)$

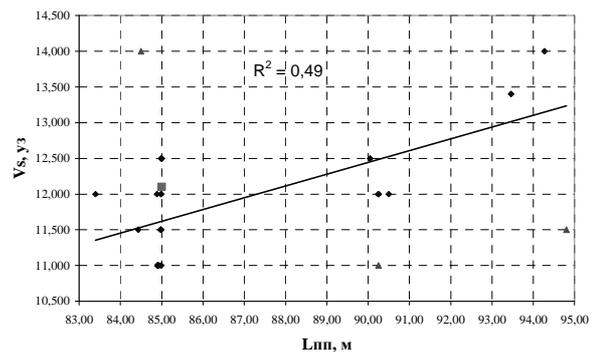


Рисунок 6 – График зависимости $V_s(L)$

позволяет перевозить крупногабаритные грузы; наличие съемных переборок позволяет разделить перевозимые грузы; более высокий ресурс общей продольной прочности за счет применения высоких непрерывных продольных комингсов; для многочисленной группы коустеров, имеющих расчетную длину до 85 метров, благодаря валовой вместимости, не превышающей значение 3000 GT, характерны низкие эксплуатационные расходы.

Однако именно большая длина трюма породила проблему проверки обеспечения общей поперечной прочности. Поскольку в отличие от традиционных сухогрузных судов длинный трюм коустеров прочных поперечных переборок не имеет, то эта проблема решается за счет установки через 3 – 4 шпации в двойных бортах рамных связей – диафрагм. При выборе главных размерений коустеров необходимо учитывать выше приведенные зависимости.

Для судов с числами Fr меньше 0,25 коэффициент общей полноты C_e служит хорошим критерием оценки ходкости судна. У судна с L меньшей или равной 100 м и большим C_e в свежую погоду заданную скорость сохранить сложнее. Поэтому для коуэстеров не рекомендуется выбирать C_e больше 0,8 при любых числах Fr . Однако на практике встречаются коуэстеры с C_e около 0,85.

Отношение L/B влияет главным образом на ходкость судна, его маневренность и остойчивость. Большее значение L/B благоприятно сказывается на скорости судна и его устойчивости на курсе и отрицательно на остойчивости и общей продольной прочности. При проектировании коуэстеров сложились значения $L/B = 5,5 - 6,9$. Бульбообразную форму носовой оконечности целесообразно применять для нижнего диапазона L/B .

Отношение B/d характеризует начальную остойчивость, вместимость и ходкость судна, для коуэстеров это отношение почти в 2 раза меньше, чем для ССП и лежит в диапазоне $B/D = 2,1 - 2,5$, что позволяет снизить волновое сопротивление.

Отношение D/d характеризует запас плавучести судна, влияет на его вместимость, непотопляемость, начальную остойчивость и остойчивость на больших углах крена. Для коуэстеров данное отношение лежит в диапазоне $D/d = 1,1 - 1,35$ и выбранное по приближенным формулам значение должно удовлетворять требованиям минимальной высоты надводного борта и начальной остойчивости.

Наиболее эффективным для транспортировки массовых грузов является судно максимально возможного дедвейта, имеющее оптимальные с точки зрения науки о проектировании главные размерения, осадку, дедвейт, объем грузовых пространств, скорость. Однако, в действительности этому препятствуют различного рода ограничения, в первую очередь – габариты и глубины акваторий портов и судоходных путей в проливах и каналах. В дальнейшем в качестве типового может быть рассмотрено судно-коуэстер со следующими характеристиками $L = 85$ м; $B = 14,5$ м; $D = 7,2$ м; $D_1 = 10,2$ м; $d = 6,4$ м; $L_{mp} = 60$ м; $C_b = 0,843$; $V_s = 12,1$ узл.

При заданных соотношениях главных размерений и коэффициентах теоретического чертежа в ходе проектирования возможны существенные изменения форм обводов корпуса, оказывающие значительное влияние на сопротивление в условиях тихой воды и волнения. Формы обводов в значительной степени предопределяются протяженностью цилиндрической вставки корпуса, а также положением центра величины по длине. Применение цилиндрической вставки позволяет увеличить вместимость транспортного судна. При правильном выборе ее длины и положения она не вызывает неблагоприятного влияния на основное сопротивление и сопротивление формы. Для коуэстеров характерно наличие цилиндрической вставки в районе грузового трюма протяженностью около $0,4L$. В остальном форма корпуса аналогична традиционным морским судам, поэтому может быть построена с помощью САПР TRIBON.

При проектировании морских сухогрузных однотрюмных судов возникла необходимость анализа пространственного напряженно-деформированного состояния корпуса в районе грузового трюма. Правила РМРС [1] устанавливают расчетные нормы общей поперечной прочности лишь для корпусов плавучих доков. На морских судах поперечная прочность обеспечивается за счет поперечных переборок, минимальное количество которых определяется Правилами. Что касается судов с относительно большими длинами трюмов $L_{тр}$, которые в 10 и более раз превосходят ширину бортового участка палубы " b ", то в Правилах даны общие рекомендации о необходимости выполнения дополнительных расчетов прочности трюма как объемного отсека. При проектировании корпусов коуэстеров, для которых характерно отношение $L_{тр}/b = (30 - 60) \gg 10$, данная рекомендация подлежит обязательному выполнению, поскольку их общий поперечный изгиб вызывает большие горизонтальные перемещения комингсов, что в свою очередь ведет к дополнительной напряженности палубных стрингеров, рамных поперечных связей бортов и днищевых перекрытий. Эксплуатация коуэстеров в отличие от ССП характеризуется значительными горизонтальными перемещениями бортов. Учет таких перемещений во время взаимодействия закрытий с корпусом на волнении становится важным как при проектировании люковых закрытий, так и рамных связей корпуса.

Известны два метода расчета грузового трюма коуэстера как объемной конструкции по методу конечных элементов в пластинчатой и стержневой идеализации. Применяемые программы ИСПА МКЭ – 945 позволяют наиболее полно учесть особенности напряженного состояния объемного состояния отсека. Однако их реализация требует хорошего знания МКЭ, трудоемкой подготовки исходных данных при высокой стоимости их приобретения. В связи с этим возникла необходимость в разработке приближенного аналитического метода решения поставленной задачи. В соответствии с этим методом грузовой трюм считается плоским развернутым перекрытием с одной симметричной перекрестной связью – палубным стрингером, жестко зашпандельованным по концам на поперечных переборках, и балками главного направления в виде шпангоутных рам (рисунок 7), опорой для которых служит упругое основание, состоящее из 2-х стрингеров и вертикального кия [2]. Напряженное состояние диафрагмы, образующей шпангоут, рассматривается при загрузке на тихой воде без люковых закрытий, которые при

грузовых операциях отсутствуют, на волнении с установленными люковыми закрытиями, закрепленными с обоих бортов.

При расчете использовались следующие дополнительные исходные данные: плотность воды $\rho = 1,025 \text{ т/м}^3$ и груза $\rho = 0,73 \text{ т/м}^3$, высота укладки груза $h_{укл} = 9 \text{ м}$, отстояние расчетного сечения от ближайшего (кормового) перпендикуляра $x_1 = 26,6 \text{ м}$, рамная шпация $a = 1,2 \text{ м}$, скорость хода $V_s = 12,1 \text{ уз}$. Схема положения нагрузок, действующих на тихой воде, представлена на рисунке 7.

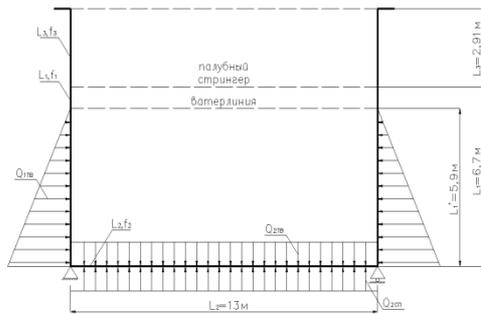


Рисунок 7 – Схема нагрузок, приложенных к корпусу на тихой воде

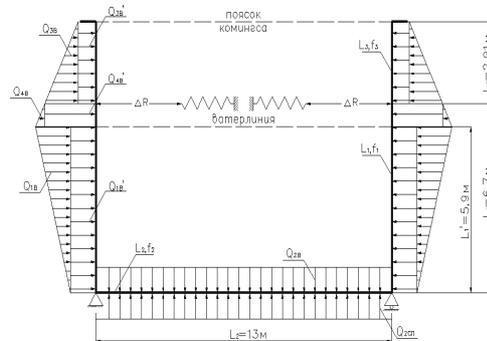


Рисунок 8 – Схема нагрузок, приложенных к корпусу на волнении

Приближенное дифференциальное уравнение прогиба палубного стрингера как балки на сплошном упругом основании имеет следующий вид

$$EI_{nc}^{np} \cdot \frac{d^4 v_{nc}}{dx^2} + k \cdot v_{nc} = q(x),$$

где I_{nc}^{np} – приведенный момент инерции палубного стрингера с учетом сдвиговых деформаций; k – погонный коэффициент жесткости упругого основания на тихой воде, зависящий от жесткости диафрагмы; q – интенсивность нагрузки на палубный стрингер на тихой воде.

В результате с учетом применения расчетных зависимостей для балок на упругом основании [3], получены элементы изгиба палубного стрингера, диафрагмы и флора, находящихся посередине трюма (опорная поперезывающая сила, моменты на опоре и посередине связей, деформации). Приближенный аналитический расчет поперечной прочности корпуса в морских условиях реального волнения при установленных люковых закрытиях учитывает добавочную симметричную волновую нагрузку на борта, соответствующую или движению в разрез волны или основной симметричной части волновой нагрузки при косых курсах. Схема нагрузок приведена на рисунок 8. Волновые расчетные давления на бортовые и днищевые перекрытия определялись по рекомендации Правил [1].

Расчет поперечной прочности на волнении выполнялся для случая двухстороннего закрепления торцов секции люкового закрытия, играющего роль жесткой горизонтальной опоры. Однако следует отметить, что поддерживающая роль люковых закрытий значительно уменьшается ввиду существования меньшей жесткости контрфорсов при их последовательной работе, особенно, когда высота комингса довольно большая ($l > 1 \text{ м}$), что является характерной чертой коустеров [2].

Участие люковых закрытий и контрфорсов в обеспечении жесткости всей конструкции можно учесть приближенно, просуммировав величины, обратные коэффициентам жесткости секций люковых закрытий и контрфорсов при их последовательной работе, приходящихся на шпацию "а". Контрфорс в данном случае выступает в качестве балки, жестко заделанной на диафрагме и свободно опертой на горизонтальном пояске продольного комингса. В результате суммирования этих величин и некоторых преобразований получаем общий коэффициент жесткости

$$\Delta K = K_k / \left(1 + \frac{K_k}{K_l} \right),$$

где K_l, K_k – коэффициенты жесткости контрфорсов и люкового закрытия соответственно.

Можно показать, что $\Delta K_{\max} = K_k$, что и принято в расчете.

В соответствии со схемой, показанной на рисунке 8, за основную неизвестную принимается величина ΔR_{nc} (реакция палубного стрингера), а горизонтальные прогибы рамы на уровне палубного стрингера приравниваются к прогибу упругой опоры.

В результате расчета определены элементы изгиба палубного стрингера, диафрагмы, флора и контрфорса. Полученные приближенные зависимости позволяют выявить роль каждой составляющей нагрузки и характерных параметров шпангаутной рамы. Расчет по предложенной методике обладает простым алгоритмом, что позволяет составить относительно несложную программу в среде MathCAD.

Полученные в контрольных точках перемещения позволили представить деформированную модель средней по длине отсека рамы корпуса коустера (рисунки 9, 10).

Указанная программа позволяет проанализировать зависимость перемещений рассматриваемых конструкций от изменения таких факторов, как длина трюма, шпация рамного набора. Графики изменения перемещений конструкций при изменении длины трюма и шпации приведены на рисунках 11 – 14.

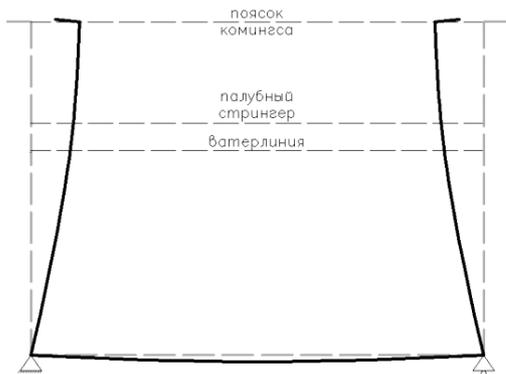


Рисунок 9 – Деформированная модель расчетного сечения корпуса на тихой воде

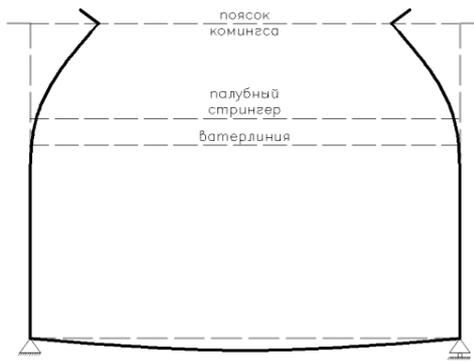


Рисунок 10 – Деформированная расчетного модель сечения корпуса на волнении

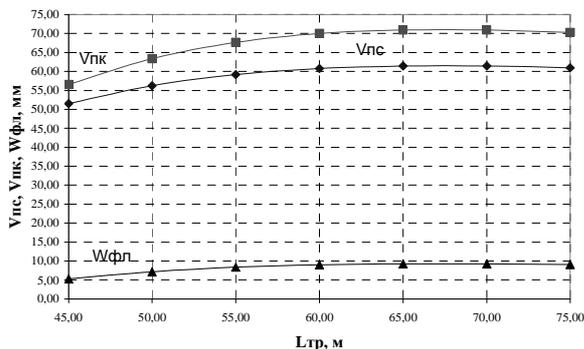


Рисунок 11 – Изменение перемещений рамы при изменении длины трюма коустера на тихой воде

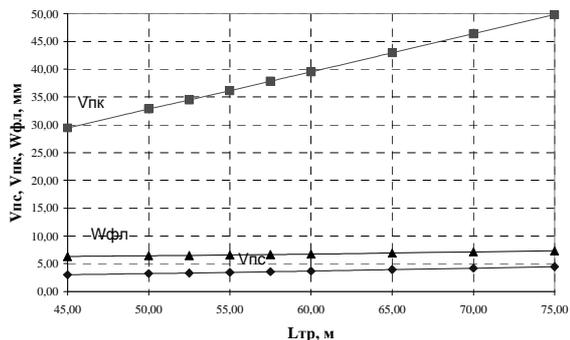


Рисунок 12 – Изменение перемещения рамы при изменении длины трюма коустера на волнении

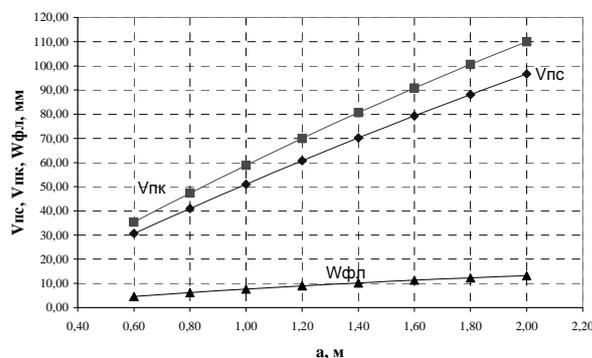


Рисунок 13 – Зависимость перемещений узлов рамы от шпации *a* на тихой воде

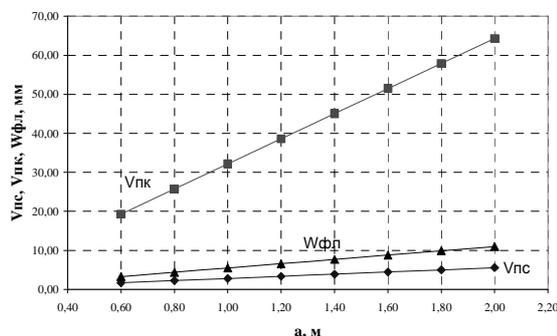


Рисунок 14 – Зависимость перемещений узлов рамы от шпации *a* на волнении

Выводы

При закреплённых с двух бортов люковых закрытиях, наиболее напряженными являются контрфорсы продольных комингсов в средней части, а в случае отсутствия закрытий, наблюдается существенное повышение напряжений во всех контрольных точках и большие перемещения поясков

продольных комингсов внутрь трюма. Учет общего поперечного изгиба коустеров приводит к существенному увеличению напряженности основных контрольных узлов корпуса. При двухстороннем закреплении люковых закрытий существенно уменьшается напряжения в основных рамных связях корпуса, но при этом возникают высокие напряжения в поясах контрфорсов. С ростом высоты комингса эти напряжения увеличиваются, несмотря на некоторое уменьшение нагрузок на часто установленные упоры, закрепляющие крышки. При отсутствии люковых закрытий возникают большие суммарные прогибы продольных комингсов внутрь трюма, что необходимо учитывать при проектировании закреплений и уплотнений секций закрытий как на тихой воде, так и на волнении.

В заключении необходимо отметить, что однотрюмные суда класса коустера могут найти широкое применение в отечественном судостроении вместо СПП при условии обеспечения общей поперечной прочности корпуса в районе трюма, что требует дальнейшей разработки методики расчета прочности корпуса и люковых закрытий при совместной работе.

Библиографический список использованной литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012. — Т. 1. — 502 с.
2. Обоснование приближенного метода расчета общей поперечной прочности корпусов морских однотрюмных сухогрузных судов / Н. Бутенко, И. Давыдов, В. Козляков, А. Соловьев // Проблемы техники. — 2009. — № 3. — С. 32–58.
3. Бойцов Г.В. Справочник по строительной механике корабля. В 3 т. Т. 1 / Г.В. Бойцов. — Л.: Судостроение, 1982. — 376 с.

Поступила в редакцию 19.04.2013 г.

Ігнатович В.С., Кузьміна Г.В. Судна класу коустерів і особливості їх проектування

На основі вітчизняних і зарубіжних матеріалів виконаний аналіз одинтрюмних вантажних суден (коустерів), отримані наближені залежності характеристик і відношень, запропонований аналітичний метод перевірки загальної поперечної міцності корпусу в районі трюму в умовах тихої води і хвилювання.

Ключові слова: коустер, судна змішаного плавання, головні розмірення.

Ignatovich V.S., Kuzmina A.V. Ships of class couster and feature their planning

On the basis of domestic and foreign materials it is analysed odnotryumny cargo vessels (kouster), approximate dependences of characteristics and the relations are received, the analytical method of check of the general cross-section durability of the case around hold in the conditions of still water and excitement is offered.

Keywords: a kouster, vessels of the mixed navigation, dimensions.