

РАСЧЕТ КООРДИНАТ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ШТАБЕЛЯ ГРУЗА ПРИ ДИФФЕРЕНТЕ МАЛОТОННАЖНОГО СУДНА

В рейсах малотоннажных судов между портами Европы, в бассейне Северного, Норвежского и Балтийского морей часто возникает необходимость одновременной перевозки нескольких видов навалочных грузов. Размещение их в трюме отдельными штабелями зачастую осуществляется с использованием метода «естественной» сепарации. При такой загрузке грузовой помощник капитана считает, что каждая насыпь имеет свою массу и координаты центра тяжести, создает свой момент относительно миделя и т.д.

В статье предложены формулы, которые позволяют грузовому помощнику капитана рассчитать координаты центра тяжести каждого штабеля сместившегося груза в зависимости от линейных размеров трюма, угла естественного откоса груза и начального дифферента судна для дальнейшего их использования в судовой грузовой программе при расчете остойчивости судна.

Таким образом, рассмотрен системный подход к организации грузовых работ помощником капитана на однострунных малотоннажных судах, который позволяет рассчитать все необходимые параметры в зависимости от геометрической формы трюма и физических свойств груза и получить ответ о возможности осуществления такой перевозки.

Ключевые слова: малотоннажное судно, дифферент, расчет координат центра тяжести штабеля груза.



АКТУАЛЬНОСТЬ рассматриваемой темы обуславливается усилением роли эффективного планирования грузовых операций судна, как одного из важнейших элементов судоводительской работы. Рациональная загрузка судна — важная составляющая организации работы флота как с технической, так и с экономической стороны. Она должна быть такой, чтобы исключить возможность потерь провозной способности судна и при этом обеспечить оптимальное использование грузоподъемности и грузоместимости судна. Сейчас, когда мировой флот пополняется малотоннажными «новостроями», судовая администрация должна быть готова к специфике работы при эксплуатации таких транспортных средств.

При перевозке навалочных или насыпных грузов между портами Европы, в бассейне Северного, Норвежского и Балтийского морей малотоннажными судами имеют место случаи, когда в рейсе одновременно грузится несколько видов таких грузов. Грузовому помощнику капитана при составлении грузового плана необходимо определить массу и размеры каждого штабеля в трюме, а также координаты их центров тяжести для дальнейших расчетов остойчивости судна.

Безопасная перевозка навалочных и насыпных грузов была рассмотрена в трудах отечественных и зарубежных исследователей [1], [2]. Математическая модель оптимизации процесса загрузки балкеров и выбора оптимального варианта проведения грузовых операций с целью обеспечения их мореходной безопасности предложена в работе [3]. Расчет высоты штабеля навалочного груза при загрузке судов типа «коастер» и возможное смещение его центра тяжести представлены в публикациях [4], [5]. Метод «естественной» сепарации и диаграмма графического расчета массы навалочных грузов при их перевозке на судах типа «коастер» изложены в статьях [6], [7]. Удифферентовка балкера при транспортировке навалочных грузов рассмотрена в публикации [8]. Математическая модель определения конфигурации поверхности насыпного груза в трюме судна методом Нелдера-Мида изложена в работе [9]. Система автоматизированного контроля грузовых операций крупнотоннажного балкера представлена в статье [10]. Однако по сей день не рассмотрены случаи, когда грузовому помощнику капитана необходимо выполнить расчеты грузового плана и остойчивости малотоннажного судна при наличии дифферента.

Теоретические исследования и натурные наблюдения в реальных рейсах т/х «Wilson Bilbao» позволяют предложить формулы для расчета координат центра тяжести каждого штабеля навалочного или насыпного груза при наличии дифферента судна. Наблюдения в рейсах т/х «Wilson Bilbao» подтвердили, что при посадке судна «на ровный киль» штабели груза, которые погружены в центральную часть трюма, в зависимости от их объема, имеют в сечении по диаметральной плоскости (ДП) форму равнобедренного треугольника (рис. 1, *III*) или равнобедренной трапеции (рис. 1, *II*). Углы у основания штабеля (φ) равны углам естественного откоса данного груза. Сечение по ДП штабелей груза, которые погружены в носовую и кормовую части трюма, могут иметь форму прямоугольного треугольника либо прямоугольной трапеции (рис. 1, *I*, *IV*).

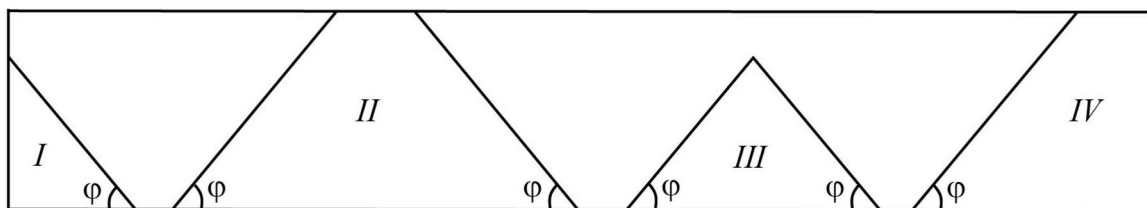


Рис. 1. Расположение штабелей груза, судно «на ровном киле»

Если в процессе погрузки возникает дифферент судна, то углы у основания штабелей груза изменяются на угол дифферента: один увеличивается, другой уменьшается (рис. 2).

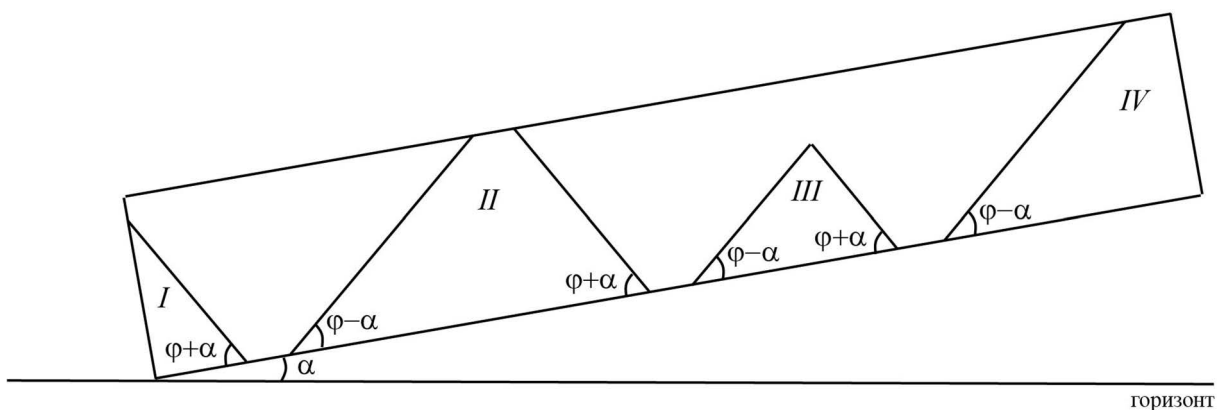


Рис. 2. Расположение штабелей груза, судно имеет дифферент

Для выполнения дальнейших расчетов штабель вида *III* (рис. 2) представим изображением, которое приведено на рис. 3. В этом случае, груз в сечении по ДП имеет форму треугольника *ABD*, высота которого $BM_2 = h$. Тогда:

$$AM_2 = h \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha), M_2D = h \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha), AD = h (\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha));$$

$$S_{ABD} = \frac{1}{2} h^2 (\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)) = \frac{h^2 \sin 2\varphi}{2 \sin(\varphi - \alpha) \sin(\varphi + \alpha)}. \quad (1)$$

Располагая систему координат так, что ее начало находится в вершине *A*, запишем координаты центра тяжести штабеля P_1 :

$$A(0; 0), B(h \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha); h), D(h(\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)); 0),$$

$$P_1 \left(\frac{h(2 \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))}{3}; \frac{h}{3} \right). \quad (2)$$

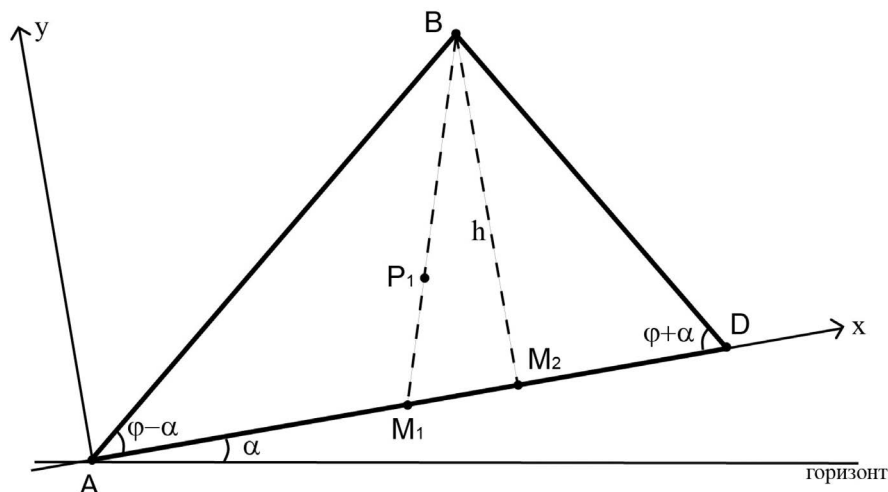


Рис. 3. Штабель навалочного груза в трюме при возникновении дифферента судна

Когда известна масса штабеля навалочного груза m , его насыпная плотность ρ и ширина трюма d , площадь продольного сечения штабеля груза $S = \frac{m}{\rho d}$. Отсюда определяем его высоту

$$h = \sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}} \quad (3)$$

и его основание

$$L = AD = \sqrt{2S(\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))}. \quad (4)$$

Если высота h не превышает высоту трюма H , т. е.

$$\sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}} \leq H, \quad (5)$$

то штабель груза может иметь треугольную форму.

Штабель груза I и IV вида (рис. 2) может быть рассчитан аналогично, но тогда рассматриваются $\triangle BM_2D$ или $\triangle ABM_2$ (рис. 3).

Получим соответственно:
для $\triangle BM_2D$

$$h = \sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}}, \quad (6)$$

$$L = \sqrt{2S \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}, \quad (7)$$

для $\triangle ABM_2$

$$h = \sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}}, \quad (8)$$

$$L = \sqrt{2S \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}. \quad (9)$$

Возможное использование треугольной формы для $\triangle BM_2D$ и $\triangle ABM_2$ соответственно должно отвечать условиям:

$$\sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}} \leq H; \quad \sqrt{\frac{2S}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}} \leq H. \quad (10)$$

Тогда координаты центра масс P_1 штабеля груза в системе координат, начало которой расположено в левой вершине основания, будут определяться:

для $\triangle BM_2D$

$$P_1\left(\frac{h \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}{3}; \frac{h}{3}\right), \quad (11)$$

для $\triangle ABM_2$

$$P_1\left(\frac{2h \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}{3}; \frac{h}{3}\right). \quad (12)$$

Штабель груза, в сечении параллельном ДП, имеет форму трапеции $ABCD$ (рис. 2, II и рис. 4).

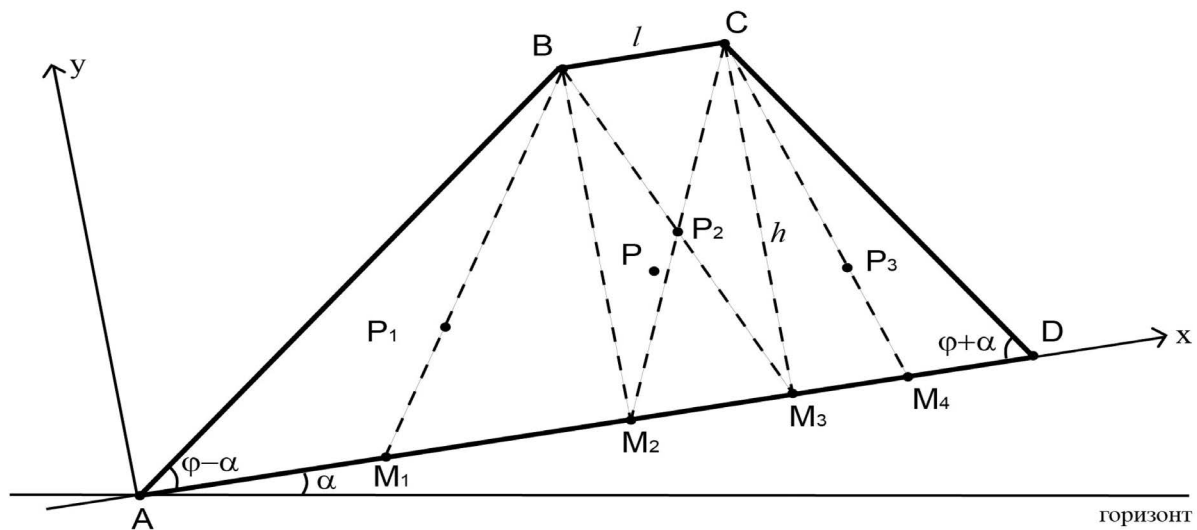


Рис. 4. Штабель навалочного груза в трюме при наличии дифферента судна

Верхнее основание штабеля равно l , высота h , M_2, M_3 — проекции вершин верхнего основания на нижнее, M_1 — середина отрезка AM_2 , M_2 — середина отрезка M_3D , а начало системы координат находится в вершине A , тогда координаты центров тяжести P_1, P_2, P_3 треугольника ABM_2 , прямоугольника M_2BCM_3 , треугольника M_3CD и площади этих фигур могут быть определены формулами:

для первого треугольника

$$A(0;0), \quad M_2(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha); 0), \quad B(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha); H), \\ P_1\left(\frac{2H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}{3}; \frac{H}{3}\right), \quad S_1 = \frac{1}{2} H^2 \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha); \quad (13)$$

для прямоугольника

$$P_2\left(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \frac{l}{2}; \frac{H}{2}\right), \quad S_2 = lH; \quad (14)$$

для второго треугольника

$$M_3(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + l; 0), \quad C(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + l; H), \quad (15)$$

$$D(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha); 0),$$

$$P_3\left(\frac{2(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + l) + (H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))}{3}; \frac{H}{3}\right), \quad (16)$$

$$P_3 \left(\frac{3H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}{3}; \frac{H}{3} \right), \quad S_3 = \frac{1}{2} H^2 \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha). \quad (17)$$

Тогда координаты точки P :

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{x_1 S_1 + x_2 S_2 + x_3 S_3}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{1}{S_{ABCD}} \left[\frac{2H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha)}{3} \cdot \frac{1}{2} H^2 \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \right. \\ &+ \left(H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \frac{l}{2} \right) \cdot lH + \frac{3H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}{3} \cdot \frac{1}{2} H^2 \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha) \Big] = \\ &= \frac{H}{6S_{ABCD}} [2H^2 \operatorname{ctg}^2(\varphi - \alpha) + 6Hl \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l^2 + \\ &+ 3H^2 \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha) + 3lH \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha) + H^2 \operatorname{ctg}^2(\varphi + \alpha)], \end{aligned} \quad (18)$$

$$y_0 = \frac{y_1 S_1 + y_2 S_2 + y_3 S_3}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{H^2}{6S_{ABCD}} [H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)], \quad (19)$$

$$\begin{aligned} P \left(\frac{H}{6S} [2H^2 c_1^2 + 6Hl c_1 + 3l^2 + 3H^2 c_1 c_2 + 3lH c_2 + H^2 c_2^2]; \frac{H^2}{6S_{ABCD}} [H c_1 + 3l + H c_2] \right), \\ c_1 = \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha), \quad c_2 = \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha). \end{aligned} \quad (20)$$

Для расчета штабеля груза вида IV (рис. 2) рассмотрим трапеции $ABCM_3$ или M_2BCD (рис. 4). Аналогично получим координаты центра масс P относительно левой вершины нижнего основания:

для трапеции $ABCM_3$

$$P \left(\frac{H}{6S} [2H^2 \operatorname{ctg}^2(\varphi - \alpha) + 6Hl \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l^2]; \frac{H^2}{6S} [H \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + 3l] \right), \quad (21)$$

для трапеции M_2BCD

$$P \left(\frac{H}{6S} [3l^2 + 3lH \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha) + H^2 \operatorname{ctg}^2(\varphi + \alpha)]; \frac{H^2}{6S} [3l + H \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)] \right). \quad (22)$$

При погрузке могут возникать погрешности распределения штабелей груза, которые вызваны неточностью данных о характеристиках груза, ошибках позиционирования погрузочного устройства и другими причинами. Обозначим: погрешность расположения левого и правого краев основания груза через Δl_l и Δl_r соответственно, погрешности координат центра масс через Δx и Δy , погрешность высоты и ширины основания штабеля груза Δh и ΔL .

Для штабеля треугольной формы ширина основания равна

$$L = \sqrt{2 \frac{m}{\rho d} (\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))}. \quad (23)$$

Для оценки ΔL находим частные производные этого выражения по переменным φ и ρ , в значениях которых возможны наибольшие погрешности:

$$\frac{\partial L}{\partial \rho} = \sqrt{2 \frac{m}{d} (\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))} \cdot \left(-\frac{1}{2\rho\sqrt{\rho}} \right) = \frac{-L}{2\rho};$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \varphi} &= \sqrt{2 \frac{m}{\rho d}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}} \cdot \left(\frac{-1}{\sin^2(\varphi - \alpha)} + \frac{-1}{\sin^2(\varphi + \alpha)} \right) = \\ &= \frac{-2L}{\sin 2\varphi} \cdot \frac{1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi}. \end{aligned} \quad (24)$$

Учитывая, что α обычно не превышает 5° , $0,985 < \cos \alpha < 1$ и при $\varphi < 45^\circ$, $\cos 2\varphi > 0$ имеем:

$$1 - \cos 2\varphi < 1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha < 1 - 0,985 \cos 2\varphi;$$

$$0,985 - \cos 2\varphi < \cos 2\alpha - \cos 2\varphi < 1 - \cos 2\varphi;$$

$$\frac{1 - \cos 2\varphi}{1 - \cos 2\varphi} < \frac{1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi} < \frac{1 - 0,985 \cos 2\varphi}{0,985 - \cos 2\varphi};$$

$$1 < \frac{1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi} < \frac{1 - 0,985 \cos 2\varphi}{0,985 - \cos 2\varphi}.$$

Функция $\frac{1 - 0,985x}{0,985 - x} = 0,985 \frac{1,015 - x}{0,985 - x} = 0,985 \frac{0,985 + 0,03 - x}{0,985 - x} = 0,985 \left(1 + \frac{0,03}{0,985 - x} \right)$ мо-

нотонно возрастает при $x < 0,985$. Рассматривая φ в пределах от 30° до 45° , получим, что $0,5 > \cos 2\varphi > 0$ и

$$1 < \frac{1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi} < \frac{1 - 0,985 \cos 2\varphi}{0,985 - \cos 2\varphi} < 1,046.$$

Следовательно, из (24) получаем:

$$\frac{-2L}{\sin 2\varphi} \cdot 1,046 < \frac{\partial L}{\partial \varphi} < \frac{-2L}{\sin 2\varphi};$$

$$\frac{-2,092L}{\sin 2\varphi} < \frac{\partial L}{\partial \varphi} < \frac{-2L}{\sin 2\varphi}. \quad (25)$$

Далее полагаем, что $\frac{\partial L}{\partial \varphi} \approx \frac{-2L}{\sin 2\varphi}$. Тогда из (25) следует, что ошибка при таком допущении не превысит 5 %.

Представляем приращение функции $L(\varphi, \rho)$ в виде дифференциала

$$\Delta L = \frac{\partial L}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial L}{\partial \rho} \Delta \rho;$$

$$\Delta L = \frac{-2L}{\sin 2\varphi} \cdot \frac{1 - \cos 2\varphi \cos 2\alpha}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi} \Delta \varphi + \frac{-L}{2\rho} \Delta \rho;$$

$$\Delta L \approx \frac{-2L}{\sin 2\varphi} \Delta \varphi + \frac{-L}{2\rho} \Delta \rho. \quad (26)$$

Здесь $\Delta \varphi$, $\Delta \rho$ обозначают погрешности данных по углу естественного откоса и насыпной плотности, соответственно. Первое слагаемое формулы (26) $\varphi = 45^\circ$ дает отрицательную погрешность 3,5 см на каждый метр L и каждый градус $\Delta \varphi$. При меньших значениях φ абсолютная величина этого слагаемого растет. Второе слагаемое дает отрицательную погрешность 0,5 см на каждый метр L и каждый процент относительной погрешности $\frac{\Delta \rho}{\rho}$. Например, при $\Delta \varphi = -2^\circ$, $\rho = 1500$, $\Delta \rho = -100$, $L = 10$ м, получаем

$$\Delta L \approx 3,5 \cdot 2 \cdot 10 + 0,5 \cdot 10 \cdot \frac{100}{1500} \cdot 100 \approx 103 \text{ см}.$$

Таким образом, видно, что погрешность расчета ширины основания штабеля может оказаться довольно значительной и в результате при загрузке произойдет перекрытие штабелей и смешивание разных видов грузов. Чтобы предотвратить это, рекомендуется в процессе загрузки контролировать формы штабеля (его ширину основания и высоту) в момент времени, соответствующий примерно загрузке половины массы штабеля, и в конце загрузки всего штабеля. В это же время уточняется значение дифферента судна. Из формул (1), (2) получаем:

$$h = \sqrt{\frac{2m}{\rho d} \cdot \frac{1}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}}; \quad (27)$$

$$L = \sqrt{2 \frac{m}{\rho d} (\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha))}; \quad (28)$$

$$\frac{L}{h} = \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha) = \frac{2\sin 2\varphi}{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi}. \quad (29)$$

Решив последнее уравнение относительно φ , находим его уточненное значение

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{h}{L \cos^2 \alpha} + \sqrt{\frac{h^2}{L^2 \cos^4 \alpha} + \operatorname{tg}^2 \alpha} \right). \quad (30)$$

Теперь из (27) получим уточненное значение насыпной плотности

$$\rho = \frac{2m}{dh^2} \cdot \frac{1}{\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) + \operatorname{ctg}(\varphi + \alpha)}. \quad (31)$$

Уточненные значения вносятся в программу расчета плана погрузки и, при необходимости, корректируется план выполнения грузовых операций.

Для оценки погрешности уточненного значения φ перепишем (28) в следующем виде:

$$L(\cos 2\alpha - \cos 2\varphi) = 2h \sin 2\varphi. \quad (32)$$

Тогда погрешность определения высоты

$$\frac{\partial \varphi}{\partial h} = \frac{\sin 2\varphi}{L \sin 2\varphi - 2h \cos 2\varphi}. \quad (33)$$

Аналогично, погрешность при определении ширины основания

$$\frac{\partial \varphi}{\partial L} = \frac{\cos 2\alpha - \cos 2\varphi}{4h \cos 2\varphi - 2L \sin 2\varphi}. \quad (34)$$

Отсюда примерная погрешность определения угла естественного откоса (в радианах) таким способом равна

$$\Delta \varphi \approx \frac{\partial \varphi}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial \varphi}{\partial h} \Delta h = \dots = \frac{(\cos 2\alpha - \cos 2\varphi) \Delta L - 2 \sin 2\varphi \Delta h}{4h \cos 2\varphi - 2L \sin 2\varphi}. \quad (35)$$

Здесь ΔL , Δh — ошибки измерений величин L и h . Учитывая (31), полученное выражение можно упростить:

$$\Delta \varphi \approx \frac{2 \frac{h}{L} \sin 2\varphi \Delta L - 2 \sin 2\varphi \Delta h}{4h \cos 2\varphi - 2L \sin 2\varphi} = \frac{\frac{h}{L} \Delta L - \Delta h}{2h \operatorname{ctg} 2\varphi - L}. \quad (36)$$

ΔL и Δh можно рассматривать как приблизительно равномерно распределенные независимые случайные величины, $|\Delta L| \leq 0,5$ м, $|\Delta h| \leq 0,2$ м. Тогда их среднеквадратические ошибки составляют примерно $\sigma_L \approx 0,29$ м и $\sigma_h \approx 0,12$ м, а среднеквадратическая ошибка φ составит

$$\sigma_\varphi \approx \sqrt{\frac{\frac{h^2}{L^2} \sigma_L^2 + \sigma_h^2}{|2h \operatorname{ctg} 2\varphi - L|}}. \quad (37)$$

При $L = 10$ м, $h = 5$ м, например, получим $\sigma_\varphi \approx 0,018 \approx 1^\circ$. Использование усредненных значений для двух измерений позволит уменьшить дисперсию ошибки еще примерно в 1,4 раза. Получение уточненного значения L в конце загрузки даст возможность скорректировать план дальнейшей погрузки малотоннажного судна.

Расчет оптимального расположения штабелей грузов в трюме

На практике, у автора, при выполнении рейсов т/х «Wilson Bilbao» ($DW = 3500$ т, размер грузового трюма $L \times B \times H = 62,4 \times 10 \times 6$ м, $V = 3744$ м³), возникала необходимость загружать судно несколькими видами грузов, для чего использовался метод «естественной» сепарации. Таким же способом часто перевозят грузы одного происхождения, но с разными физическими свойствами или различным гранулометрическим составом. В одном из рейсов (порт погрузки — Eikefet (Норвегия), порт выгрузки — Коеге (Дания)) фрахтователем была поставлена задача загрузить судно щебнем (масса по коносаменту 3450 т, удельный погрузочный объем — $0,6 - 0,8$ м³/т, угол естественного откоса — $32 - 43^\circ$) с обязательным разделением груза на три отдельных штабеля. Груз нельзя было смешивать, а ответственность за качество транспортировки возлагалась на судовую администрацию. Щебень разделялся на три штабеля, которые составляли одну грузовую партию, и имел определённое дробление в каждом штабеле, а размеры частиц составляли 8 – 12 мм, 18 – 25 мм и 30 – 40 мм, что и стало причиной таких требований фрахтователя (рис. 5).



Рис. 5. Загрузка трёх различных штабелей груза щебня методом «естественной» сепарации на т/х «Wilson Bilbao»

Для решения поставленной задачи были использованы приведенные формулы.

В трюме требовалось разместить $n = 3$ видов грузов (обычно $2 \leq n \leq 5$) так, чтобы при погрузке, транспортировке и выгрузке эти грузы не смешивались. Масса m_k , насыпная плотность ρ_k , угол естественного откоса ϕ_k для каждой партии груза, а также размеры трюма, угол дифферента α известны. Каждый штабель груза можно было разместить в центральной части трюма и в его крайних частях: носовой или кормовой.

Для каждого из грузов просчитываем форму и габариты штабеля при вариантах размещения (корма, центр, нос). Треугольная форма штабеля возможна при выполнении условий (5), (10) соответственно, а длина нижнего основания L_{kk} , L_{kc} , L_{kn} штабеля груза определяется по формулам (4), (7), (9).

Чтобы задать способ размещения R_j грузов, было принято решение, какой груз будет расположен в кормовой части, а какой — в носовой. Остальной груз будет размещен в центральной части. Таким образом, фактически имеем всего $N = n(n - 1)$ способов размещения грузов в трюме. Например, при $n = 3$, имеем $N = 3 \cdot 2 = 6$ и т. д.

Для каждого из этих способов была определена сумма длин нижних оснований $\sum_{k=1}^N L_k$ штабелей всех грузов. Если для рассматриваемого способа размещения выполняется условие

$$\sum_{k=1}^N L_k < L, \quad (38)$$

то такой способ считаем допустимым. Если есть несколько допустимых способов, то среди них грузовой помощник капитана выбирает оптимальный — такой, при котором сумма $\sum_{k=1}^N L_k$ принимает минимально возможное значение.

Для определения расстояний между основаниями штабелей груза, высоты и верхнего основания каждого штабеля, координат центра тяжести для каждого из штабелей относительно левого края его основания, были использованы формулы (2), (11), (12), (20) или (22) — в зависимости от формы штабеля и места его расположения.

Если условие (38) не выполняется ни для одного из способов, то размещение такого набора грузов в трюме судна невозможно и нужно уменьшить массу одного из предъявляемых к перевозке грузов.

В результате выполненных расчетов были определены все необходимые характеристики каждого штабеля груза щебня, масса носового штабеля составила 1300 т, среднего — 1000 т, кормового — 1150 т. Грузовой план судна на предстоящий рейс приведен на рис. 6.

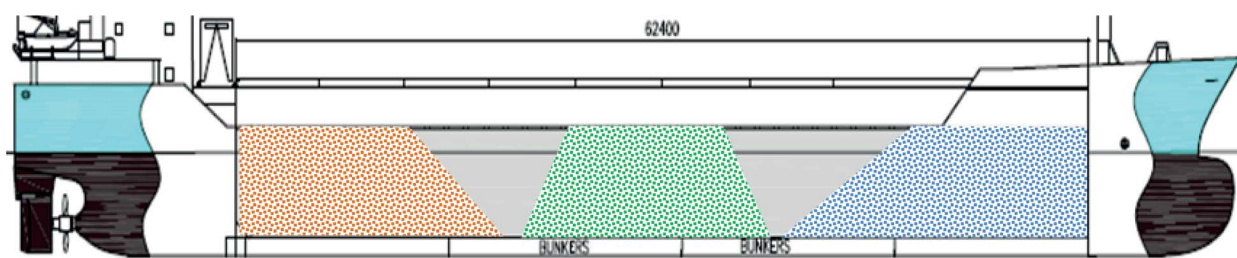


Рис. 6. Грузовой план т/х «Wilson Bilbao» при перевозке щебня с использованием «естественной» сепарации

Выводы

1. Грузовому помощнику капитана при составлении грузового плана малотоннажного судна необходимо учитывать возможное пересыпание навалочного либо насыпного груза в результате возникновения дифферента во время погрузки.

2. Расчетные формулы (1) – (22) учитывают смещение груза при наличии дифферента судна и позволяют определить координаты центра тяжести каждого сместившегося штабеля в зависимости от линейных размеров трюма, угла естественного откоса груза и начального дифферента судна.

3. Поскольку трюм представляет единый модуль, то форма размещения в нём груза не может быть однозначной. Она может меняться по причине различных транспортных характеристик груза, внешних факторов и ограничений, которые возникают из-за условий перевозки или погрузки. Для разных форм размещения штабеля груза следует использовать соответствующие расчёты.

4. Условие (38) позволяет определить суммарную длину штабелей и служит дополнением к судовой грузовой программе, что сокращает затраты времени грузового помощника капитана при выполнении расчетов мореходных качеств судна после его погрузки.

5. Предлагаемые расчетные формулы позволяют облегчить работу экипажа, избежать ошибок при расчетах загрузки, а также могут послужить основой для разработок новых, более совершенных грузовых программ для малотоннажных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барановский М. Е. Безопасность морской перевозки навалочных грузов / М. Е. Барановский. — М.: Транспорт, 1985. — 189 с.
2. Tope I. E. Carriage of Bulk grain without temporary fitting / I. E. Tope // *Naval Architect*. — 1971. — № 3. — 457–471.
- Цымбал Н. Н. Расчет границ множества допустимых стратегий проведения грузовых операций навалочных судов / Н. Н. Цымбал, Ю. Ю. Васюков // *Судовождение*. — 2004. — № 8. — С. 22–31.
4. Хомяков В. Ю. Расчет высоты штабеля навалочного груза при загрузке судов типа «коастер» / В. Ю. Хомяков, В. Д. Савчук // *Материалы науч.-теор. конференции «Судоходство: перевозки, технические средства, безопасность», 19–20 ноября 2013 г.* — Одесса: ОНМА, 2013. — С. 136–139.
5. Хомяков В. Ю. Смещение центра тяжести штабеля навалочного груза при загрузке судов типа «коастер» / В. Ю. Хомяков, В. Д. Савчук // *Материалы VIII Всеукраинской науч.-техн. конференции молодых ученых и студентов «Совершенствование проектирования и эксплуатации морских судов и сооружений», 2–6 декабря 2013 г.* — Севастополь, 2014. — С. 159–164.
6. Хомяков В. Ю. Загрузка судна типа «коастер» навалочным грузом с использованием метода «естественной» сепарации / В. Ю. Хомяков, В. Д. Савчук // *Научный вестник Херсонской государственной морской академии*. — 2014. — № 1 (10). — С. 64–70.
7. Хомяков В. Ю. Диаграмма графического расчета массы навалочных грузов при перевозке с «естественной» сепарацией / В. Ю. Хомяков, В. Д. Савчук // *Материалы шестой Международной науч.-практ. конференции «Современные информационные и инновационные технологии на транспорте» (MINTT — 2014) 27–29 мая 2014 г.* — Херсон: ХГМА, 2014. — С. 147–148.
8. Клименко Е. Н. Удифференровка балкера при перевозке навалочных грузов / Е. Н. Клименко, В. Д. Савчук // *Судовождение*. — 2005. — № 10. — С. 63–66.
9. Клименко Е. Н. Использование метода Нелдера-Мида для определения конфигурации поверхности насыпного груза в трюме судна / Е. Н. Клименко, В. Д. Савчук // *Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова*. — 2014. — № 3 (8). — С. 41–46.
10. Клименко Е. Н. Система автоматизированного контроля грузовых операций балкера / Е. Н. Клименко // *Судовождение*. — 2014. — № 24. — С. 84–91.

THE CALCULATION OF THE COORDINATES OF CENTER OF GRAVITY OF A CARGO STACK AT THE TRIM OF SMALL-DISPLACEMENT VESSEL

At the voyages of small-displacement vessels between the ports of Europe, at the basins of the Northern, the Norwegian and the Baltic Seas, the necessity of the simultaneous carrying of different bulk cargos occurs. Their placement in the hold in separate stacks is carried out with the method of “intrinsic” separation. At such loading the cargo officer considers, that each bulk has its own weight and the coordinates of the center of the gravity, creates its moment in the midship section, etc.

The formulae, enabling the cargo officer to calculate the coordinates of the center of the gravity of each stack of the shifted cargo depending on the linear dimensions of a hold, the angle of repose of a cargo and the initial trim for the further application of them in the loading program at the calculation of the stability of a vessel, are given in the article.

Thus, the system approach to the organization of cargo works by officer in charge was considered on small tonnage single-hold vessels that allows you to calculate all the necessary parameters depending on the geometric shape of the hold and physical properties of the cargo and to get an answer about the feasibility of such transportation.

Keywords: small-displacement vessel, trim, calculation of coordinates of center of gravity of cargo stack.

REFERENCES

1. Baranovskij, M. E. *Bezopasnost morskoy perevozki navalochnyh Грузов*. M.: Transport, 1985.
2. Tope, I. E. “Carriage of Bulk grain without temporary fitting.” *Naval Architect* 3 (1971): 457–471.
3. Cymbal, N. N., and Ju. Ju. Vaskov. “Raschet granic mnozhestva dopustimyh strategij provedenija Грузовыh операций navalochnyh судов.” *Sudovozhdenie* 8 (2004): 22–31.

4. Homjakov, V. Ju., and V. D. Savchuk. "Raschet vysoty shtabelja navalohnogo gruzu pri zagruzke sudov tipa "coaster"." *Materialy nauchno-teoreticheskoy konferencii «Sudohodstvo: perevozki, tehicheskie sredstva, bezopasnost», 19-20.II. 2013.* Odessa: ONMA, 2013: 136–139.
5. Homjakov, V. Ju., and V. D. Savchuk. "Smeshhenie centra tjazhesti shtabelja navalohnogo gruzu pri zagruzke sudov tipa "coaster"." *Materialy VIII Vseukrainskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchenyh i studentov «Sovershenstvovanie proekttirovaniya i jekspluatacii morskikh sudov i sooruzhenij», 2-6.12. 2013.* Sevastopol, 2014: 159–164.
6. Homjakov, V. Ju., and V. D. Savchuk. "Zagruzka sudna tipa "coaster" navalohnym gruzom s ispolzovaniem metoda "estestvennoj" separacii." *Nauchnyj vestnik Hersonskoj gosudarstvennoj morskoy akademii* 1(10) (2014): 64–70.
7. Homjakov, V. Ju., and V. D. Savchuk. "Diagramma graficheskogo rascheta massy navalohnyh gruzov pri perevozke s "estestvennoj" separaciej." *Materialy shestoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye informacionnye i innovacionnye tehnologii na transporte» (MINTT — 2014) 27–29.05. 2014.* Herson: HGMA, 2014: 147–148.
8. Klimenko, E. N., and V. D. Savchuk. "Udifferentsirovka balkera pri perevozke navalohnyh gruzov." *Sudovozhdenie* 10 (2005): 63–66.
9. Klimenko, E. N., and V. D. Savchuk. "The use of Nelder-Mead method for the determination of the configuration of surface and weight of bulk cargo in the hold." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova* 3(8) (2014): 41–46.
10. Klimenko, E. N. "Sistema avtomatizirovannogo kontrolja gruzovyh operacij balkera." *Sudovozhdenie* 24 (2014): 84–91.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савчук Виктор Дмитриевич —
кандидат технических наук, профессор.
Одесская национальная морская академия
info@onma.edu.ua, nich@onma.edu.ua
Хомяков Виталий Юрьевич —
старший помощник капитана
т/х «Wilson Bilbao» MARLOW NAVIGATION LTD.
khomykov_vitaliy@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Savchuk Viktor Dmitrievich —
PhD, professor.
Odessa National Maritime Academy
info@onma.edu.ua, nich@onma.edu.ua
Khomyakov Vitaliy Jur'evich —
Chief officer
m/v «Wilson Bilbao» MARLOW NAVIGATION LTD.
khomykov_vitaliy@mail.ru

Статья поступила в редакцию 04 ноября 2015 г.