

УДК 629.123; 629.5.065.2  
DOI: 10.37890/jwt.vi79.475

## **Способ определения положения центра тяжести крупногабаритного груза для безопасной перегрузки на судне**

**Е.В. Никитин<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0002-1980-5285*

**С.А. Симененко<sup>2</sup>**

*ORCID: 0009-0006-7615-5094*

<sup>1</sup>*Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова, 299028 Севастополь, Россия*

<sup>2</sup>*Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, Россия*

**Аннотация.** На основе анализа уравнений равновесия двухзвенной системы подвешивания крупногабаритного груза предложены два способа определения положения центра тяжести этого груза. Суть способов заключается в двукратном подвешивании этой системы и измерении углов ее отклонения в подвешенном положении равновесия. При этом разница в углах отклонения системы между подвешиваниями обеспечивается либо путем изменения высоты первичного подвеса (длины первичных строп), либо путем изменения отношения масс траверсы и груза. Проведен сравнительный анализ точности и практической реализуемости обоих способов, при этом, показано, что при осуществлении грузовых операций в порту или на судне, практически реализуемым и более точным является способ, в котором разница углов отклонения системы между подвешиваниями осуществляется путем изменения длины первичных строп (высоты первичного подвеса).

В работе подчеркивается, что важным условием для обеспечения устойчивости системы при подвешивании и предотвращения опрокидывания груза является то, что первичные стропы (соединяющие крюк и траверсу), должны быть такой длины, чтобы груз виртуально мог быть вписан внутрь пирамиды (пирамиды безопасности), образованной траверсой и этими стропами. Показано также, что длина вторичных строп (соединяющих траверсу и груз) не имеет значения, однако они должны быть равной длины и параллельны друг другу, что обеспечит их вертикальное положение после подвешивания системы. Чем тяжелее траверса (в сравнении с весом подвешиваемого груза) – тем выше пирамида безопасности, а значит и более устойчивой становится система подвешивания груза в целом. С другой стороны, чем длиннее первичные стропы (выше пирамида безопасности), тем меньше углы отклонения траверсы (и системы с целым) от исходного положения перед подвешиванием. Для демонстрации возможностей предлагаемого нового способа определения положения ЦТ груза приведен численный пример его реализации.

**Ключевые слова:** крупногабаритный груз, центр тяжести, двукратное подвешивание, устойчивость системы подвешивания, пирамида безопасности, углы отклонения траверсы или погрузочной платформы.

## **A method for determining the position of gravity center of bulky cargo for safe reloading on a ship**

**Yevgeny V. Nikitin<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0002-1980-5285*

**Sofia A. Simenenko<sup>2</sup>**

*ORCID: 0009-0006-7615-5094*

<sup>1</sup>*The Black Sea Naval College named after P. S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation*

**Abstract.** Based on the analysis of the equilibrium equations of a two-link suspension system for bulky cargo, two methods for determining the position of the gravity center of this cargo are proposed. The essence of the methods consists in double suspension of this system and measuring the angles of its deviation in the suspended equilibrium position. In this case, the difference in the angles of deviation of the system between suspensions is provided either by changing the height of the primary suspension (the length of the primary slings), or by changing the ratio of the masses of the traverse and the load. A comparative analysis of the accuracy and practical feasibility of both methods is carried out. It is shown that when carrying out cargo operations in a port or on a ship, a method in which the difference in the angles of deviation of the system between suspensions is carried out by changing the length of the primary slings (the height of the primary suspension) is practically feasible and more accurate.

The work emphasizes that an important condition for ensuring the stability of the system when hanging and preventing overturning of the load is that the primary slings (connecting the hook and the traverse) must be of such length that the suspended load can virtually be inscribed inside the pyramid (safety pyramid) formed by the traverse and these slings. It is also shown that the length of the secondary slings (connecting the traverse and the load) does not matter, but they must be of equal length and parallel to each other, which will ensure their vertical position after hanging the system. The heavier the traverse (in comparison with the weight of the suspended cargo), the higher the safety pyramid, and therefore the more stable the cargo suspension system as a whole becomes. On the other hand, the longer the primary slings (the higher the safety pyramid), the smaller the angles of deviation of the traverse (and the system as a whole) from the initial position when suspended. To demonstrate the possibilities of the proposed new method for determining the position of the cargo center, a numerical example of its implementation is given.

**Keywords:** bulky cargo, center of gravity, double suspension, stability of the suspension system, safety pyramid, angles of deflection of the traverse or loading platform.

### **Введение**

Опыт эксплуатации показывает, что погрузка (выгрузка) крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ), а также их транспортировка с помощью морских судов представляет собой достаточно сложный и опасный процесс, зачастую приводящий к серьезным последствиям. Одной из причин такого положения может быть отсутствие точной информации о положении центра тяжести (ЦТ) загружаемого судно груза. Приблизительная или неточная информация о координатах ЦТ КТГ особенно опасна, если при его погрузке/выгрузке применяется сложная (многозвенная) система подвешивания к гаку подъемного устройства. Примеры такого рода систем представлены на рис. 1-2, а схематично – на рис. 3.

Многозвенные (как правило, двухзвенные) системы подвешивания, в которых груз соединяется с гаком подъемного крана через промежуточные погрузочные элементы (траверсы, балки и т. п.), обладают гораздо меньшей устойчивостью, чем, например, простые, однозвенные, в которых груз с помощью гибких строп непосредственно крепится к грузовому гаку.

Причиной пониженной устойчивости двухзвенных систем является то, что они, с точки зрения классической механики, имеют по меньшей мере две степени свободы и, как следствие, обладают меньшей устойчивостью и большей чувствительностью к малейшим внешним воздействиям. Более того, если ЦТ груза в такой двухзвенной системе размещен достаточно высоко, и при этом, он не находится на одной вертикали с гаком подъемного устройства (точкой подвеса), то такая система после ее подвешивания может существенно деформироваться или полностью потерять устойчивость и опрокинуться.

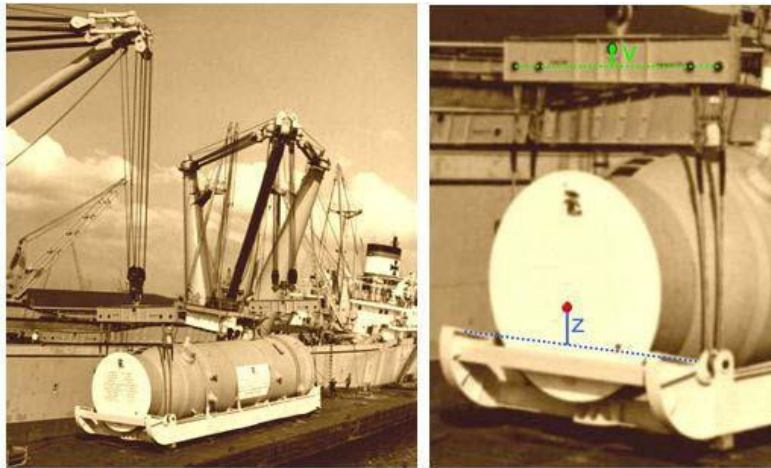


Рис.1. Погрузка судовыми кранами ядерного реактора (взято из [4])

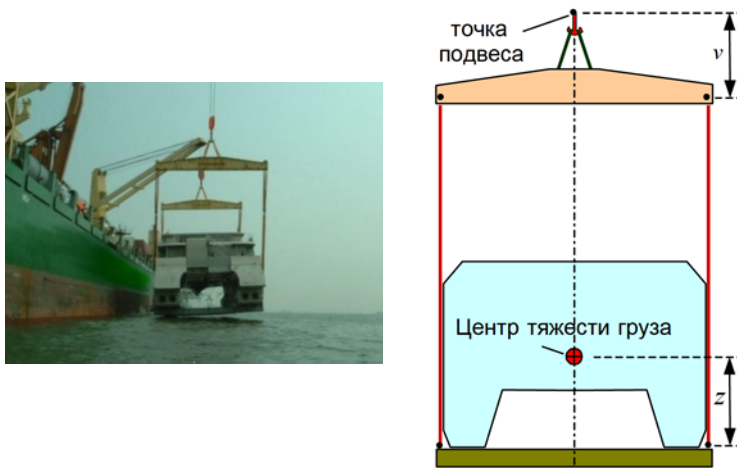


Рис. 2. Погрузка на судно катамарана (двухзвенная система подвешивания груза)

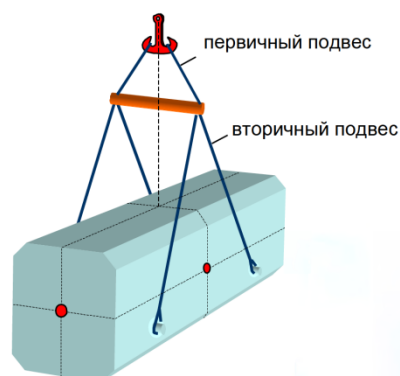


Рис. 3. Типичная двухзвенная система подвешивания груза

Недостоверная (приблизительная) информация о положении ЦТ КТГ не позволяет также с достаточной точностью оценить изменение остойчивости и посадки судна при погрузке (выгрузке), особенно, если такая погрузка осуществляется судовыми кранами. Наконец, неточная оценка координат ЦТ КТГ может приводить к серьезным ошибкам при составлении грузового плана и оценке остойчивости судна на переходе морем. Исходя из вышеизложенного, становится ясным, что корректная и надежная оценка положения ЦТ транспортируемого КТГ является важной задачей.

В настоящее время известны несколько различных способов определения положения центра тяжести КТГ путем их частичного или полного подвешивания с помощью подъемного устройства. Например, в работе [1] предлагается способ, суть которого состоит в том, что объект (груз), чей ЦТ необходимо определить, с помощью траверсы и петли навески присоединяют к подъемному устройству. После присоединения груз подъемным устройством частично приподнимается, так чтобы продолжать опираться одной стороной на то место, где он первоначально находился. В полу-подвешенном состоянии измеряют усилие, действующее на крюк подъемного устройства, а из условия равновесия груза при его одностороннем опирании определяют расстояние от точки подвеса до приблизительного месторасположения ЦТ груза. Затем, перемещают петлю навески траверсы на это расстояние по направлению к месторасположению ЦТ груза и последовательно повторяют этот процесс до тех пор, пока петля навески не окажется на одной вертикали с ЦТ груза. Очевидно, что этот способ достаточно сложен в реализации, так как перед каждым подвешиванием необходимо каким-то образом перемещать объект относительно точки подвеса (крюка грузового устройства). Кроме того, при каждом подвешивании нужно контролировать пространственную ориентацию полу-подвешенного груза, а также измерять силу, действующую на крюк подъемного устройства.

Известен также способ определения положения ЦТ груза, заключающийся в присоединении последнего (с помощью двух групп гибких строп попарно разной длины) через промежуточную прямоугольную траверсу к крюку подъемного устройства, его двукратном поднятии и свободном подвешивании до положения равновесия, а также измерении параметров ориентации груза в подвешенном положении равновесия и последующем вычислении на их основе координат его ЦТ [2]. При этом, разница между первым и вторым подвешиваниями груза состоит в том, что вторичные стропы, которые должны быть обязательно попарно разной длины, меняют местами.

Однако и этот способ достаточно сложен и громоздок, так как, во-первых, при каждом подвешивании необходимо измерять не только угловые отклонения самого груза, но и углы отклонения строп (которые будут разные, так как стропы разной длины). Во-вторых, предлагаемая математическая процедура вычисления координат ЦТ груза также достаточно сложна, требует, при этом, решения системы достаточно большого количества уравнений [2]. Наконец, предлагаемая система подвешивания груза сама по себе может быть неустойчивой, если стропы будут крепиться в нижней части груза, а точнее, ниже его ЦТ, положение которое на момент измерения (подвешивания) неизвестно.

И первый, и второй вышеописанные способы обладают еще одним существенным недостатком: они вряд ли могут быть реализованы в условиях порта, перед погрузкой на судно, так как требуют довольно сложного оборудования и измерительных приборов. Кроме того, сама процедура подвешивания и измерения занимает достаточно продолжительное время.

Исходя из вышеизложенного, целью данного исследования является разработка такого подхода (способа), при котором упрощается процедура измерения и расчета положения центра тяжести (ЦТ) груза при его подвешивания, а также гарантируется устойчивость самой системы подвешивания груза в процессе измерения.

### Методы

Для реализации поставленной цели могут быть использованы наработки, связанные с анализом и оценкой устойчивости так называемых *двухзвенных систем подвешивания груза*, выполненные в [3-7]. В этих работах показано, что при подъеме (подвешивании) груза с помощью двухзвенной системы последняя будет деформироваться (изменять свою первоначальную конфигурацию) если ЦТ груза изначально не находится на одной вертикали с точкой подвеса (крюком подъемного устройства). Более того, в работах [5-7] проанализировано, при каких условиях такая двухзвенная система подвешивания будет устойчивой, а также получены аналитические соотношения, связывающие координаты ЦТ груза (относительно точки подвеса) с углами отклонения элементов системы подвешивания. Таким образом, для достижения нашей цели, положение ЦТ груза может быть вычислено путем решения обратной задачи, а именно: путем подвешивания двухзвенной системы с грузом и, в случае ее деформации (отклонения) – измерения углов отклонения ее элементов и последующим вычислением координат ЦТ груза.

Рассмотрим более подробно предлагаемый подход. На рис. 4 представлена типичная двухзвенная система, достаточно часто применяемая при погрузке (выгрузке) груза (как правило, крупногабаритного) на судно. Ее первое звено (первичный подвес), включает крюк подъемного устройства 1, гибкие стропы 2 и жесткую прямоугольную траверсу 3. Второе звено (вторичный подвес) включает вторичные гибкие стропы 4, параллельные и равные друг другу, соединенные с погрузочной платформой 6, на которой и закреплен поднимаемый груз 5.

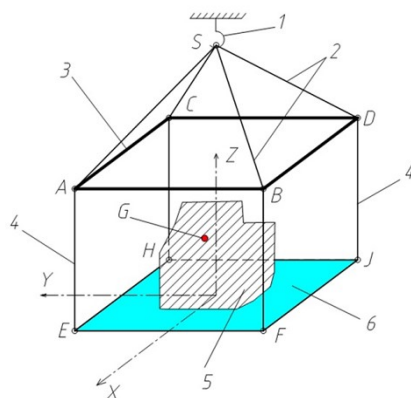


Рис. 4. Типичная двухзвенная система с грузом (до ее свободного подвешивания)

В работах [5-7] показано, что с позиций теоретической механики, такая система имеет две степени свободы, поэтому при ее подвешивании и первичный, и вторичный подвесы могут отклоняться от первоначального положения, в случае, если первоначально (до подвешивания) ЦТ груза 5 был смещен относительно вертикали, проходящей через точку подвеса 1. Более того, было также показано, что при значительном смещении ЦТ груза 5 относительно точки подвеса 1, а также при достаточно его высоком расположении относительно погрузочной платформы 6, система в целом становится неустойчивой, что может привести к ее значительной деформации и опрокидыванию груза. При этом, если свести пространственную систему подвешивания (рис.4) путем ее проецирования на две взаимно перпендикулярные плоскости, то получим две плоские системы подвешивания, представленные на рис. 5. Для таких плоских систем в работах [5-7] исследованы условия их устойчивого равновесия после подвешивания. При этом, было строго доказано, что каждая из таких плоских систем будет устойчивой после подвешивания если ЦТ груза находится внутри соответствующего равнобедренного треугольника

(треугольника безопасности [5-7]), основание которого определяется шириной первичного подвеса (AB, BD – рис.5), а его высота  $z_m$  равна не менее, чем высота первичного подвеса  $h$  – вертикального расстояния от точки подвеса S до траверсы ABCD.

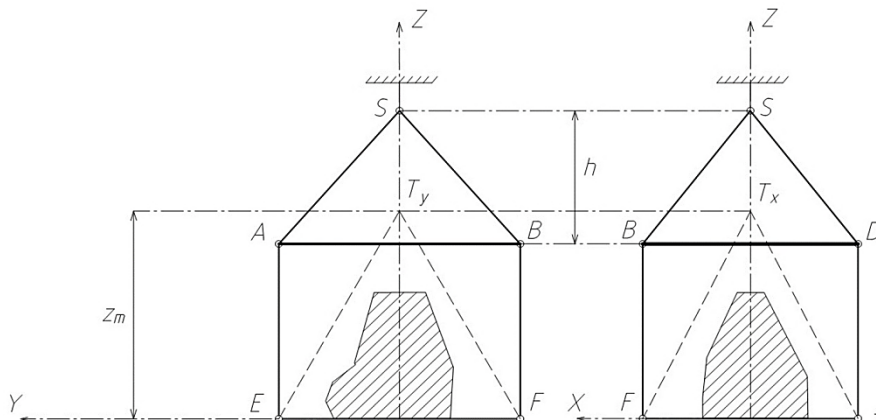


Рис. 5. Взаимно перпендикулярные проекции исходной пространственной системы подвешивания груза с треугольниками безопасности

При этом, высота каждого из треугольников безопасности (EFT<sub>y</sub> (или FJT<sub>x</sub> – рис. 5) будет тем больше, чем тяжелее масса траверсы ABCD. Как показано в [5-7]), на может вычислена по формуле:

$$z_m = h \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) \quad (1)$$

где  $h$  – высота первичного подвеса, вычисляемая по формуле:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{4l^2 - a^2 - b^2}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина первичных строп, м;

$a=AB=CD$ ,  $b=BD=AC$  – длины сторон траверсы, м;

$P_c$ ,  $p$  – масса груза и траверсы, кг.

**Замечание 1.** Двухзвенная система подвешивания (рис.4) представляет собой более общий случай, чем система на рис.3. Действительно, при трансформации последней в две плоские системы (путем соответствующего проецирования) мы получаем одну систему с параллельными вторичными стропами и траверсой, длина которой соответствует длине фактической траверсе, а также вторую плоскую двухзвенную систему с разведенными вторичными стропами (и нулевой длиной основания первичного подвеса).

**Замечание 2.** Очевидно, что в большинстве случаев ЦТ груза (даже если не известно его точное местоположение) расположен внутри внешней (наружной) поверхности этого груза. Следовательно, логично предположить, что для того, чтобы двухзвенная система с грузом была устойчивой после подвешивания необходимо и достаточно, чтобы наружная поверхность этого груза (ее проекции на плоскостях) были вписаны внутрь соответствующих треугольников безопасности EFT<sub>y</sub> и FJT<sub>x</sub> (рис. 5).

Если перейти к анализу и оценке устойчивости пространственной двухзвенной системы подвешивания (см. рис. 4), то с большой долей уверенности можно предположить, что она будет устойчива, если ЦТ груза расположен внутри прямоугольной пирамиды EFNJT (рис.6), образованной путем обратного проецирования треугольников безопасности EFT<sub>y</sub> и FJT<sub>x</sub> (рис.6). Как видно из рисунка, основанием этой пирамиды (пирамиды безопасности) является

прямоугольник EFHJ (или ABCD), а высота пирамиды равна высоте соответствующих треугольников безопасности и может быть вычислена по формулам (1), (2).

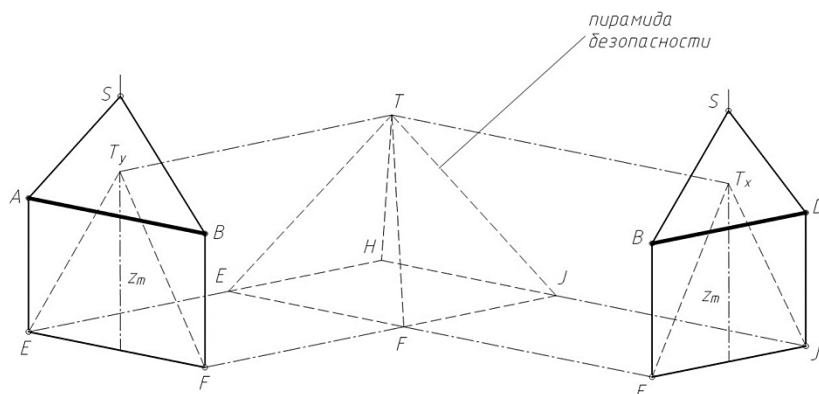


Рис. 6. Пирамида безопасности для исходной пространственной двухзвенной системы подвешивания

Предположим, что координаты ЦТ груза 5, закрепленного на платформе 6, первоначально неизвестны. И наша задача – определить их путем подвешивания системы, представленной на рис. 4. Для определенности, выберем систему координат OXYZ, как показано на рис. 4. Пусть эта система координат жестко привязана к погрузочной платформе 6, при этом, ось OZ направлена вертикально вверх и первоначально (до подвешивания) проходит через точку подвеса S. Оси OX и OY расположим горизонтально и параллельно сторонам траверсы ABCD (погрузочной платформы EFHJ) соответственно (рис.4). Поскольку координаты ЦТ груза принимаются неизвестными, то будем полагать, что ЦТ груза (точка G) смещен относительно точки подвеса S. Кроме того, пусть все три координаты ЦТ не равны нулю и имеют значения x, y, z. Условимся также, что значения всех трех координат таковы, что ЦТ находится внутри вышеназванной пирамиды безопасности EFHJT (рис. 6).

Если такую двухзвенную систему поднять и подвесить в точке S, то, как было показано ранее в [5-7]), элементы системы (первичный подвес, а также погрузочная платформа с грузом) отклонятся от первоначального положения. При этом вторичные стропы (AE, BF, DJ, CH) останутся вертикальными и параллельными друг другу. Последнее означает, что в подвешенном состоянии платформа EFHJ и траверса ABCD, отклонившись, также останутся параллельными друг другу. И самое главное, отклонившись после подвешивания, система займет устойчивое положение равновесия (поскольку ЦТ находится внутри пирамиды безопасности).

В плоскости ZOY траверса и погрузочная платформа с грузом отклонятся на одинаковый угол  $\alpha$ , который можно вычислить по формуле [5-7]:

$$tg \alpha = \frac{y}{h \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - z} . \tag{3}$$

В плоскости ZOX траверса и платформа отклонятся на угол  $\beta$ , который можно вычислить по формуле [5-7]:

$$tg \beta = \frac{x}{h \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - z} . \tag{4}$$

Уравнения (3) и (4) можно рассматривать как систему уравнений с неизвестными переменными x, y, z, которые необходимо найти. Поскольку уравнений – два, а переменных – три, то для нахождения всех координат ЦТ груза одним подвешиванием системы ограничиться нельзя. Необходимо провести, как минимум,

два подвешивания с разными исходными параметрами системы, входящими в уравнения (3) и (4). Таких параметров системы подвешивания в этих уравнениях два: высота первичного подвеса  $h$  и отношение масс траверсы и груза  $\frac{p}{P_c}$ . (Величины углов отклонения  $\alpha$  и  $\beta$  не являются параметрами системы, они должны быть измерены при каждом подвешивании.)

Если после первого подвешивания системы изменить один из ее исходных параметра ( $h$  или  $\frac{p}{P_c}$ ), то при втором подвешивании углы отклонения  $\alpha$  и  $\beta$  будут иными. Это означает, что вместо системы двух уравнений типа (3-4) мы получим систему четырех уравнений с тремя неизвестными. Таким образом, задача определения координат ЦТ груза может быть успешно решена. Рассмотрим, оба возможных варианта (способа) определения координат ЦТ груза путем двукратного подвешивания более подробно.

### Обсуждение

**Первый способ** – изменение высоты первичного подвеса  $h$ . Предположим, что при первом подвешивании (опыте) высота первичного подвеса была равна  $h_1$ . При этом измеренные углы отклонения траверсы (или погрузочной платформы с грузом) –  $\alpha_1, \beta_1$ .

Предположим также, что при втором подвешивании высота первичного подвеса равна  $h_2$ , а измеренные углы отклонения –  $\alpha_2, \beta_2$ . Тогда по результатам двух подвешиваний можно составить следующую систему уравнений:

$$tg \alpha_1 = \frac{y}{h_1 \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - z}, \quad (5)$$

$$tg \beta_1 = \frac{x}{h_1 \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - z}, \quad (6)$$

$$tg \alpha_2 = \frac{y}{h_2 \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - z}, \quad (7)$$

$$tg \beta_2 = \frac{x}{h_2 \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) - z}, \quad (8)$$

Решая совместно уравнения (6-8) можно получить следующие соотношения:

$$z = \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) \left[ \frac{h_2 tg \alpha_2 - h_1 tg \alpha_1}{tg \alpha_2 - tg \alpha_1} \right], \quad (9)$$

$$y = \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) tg \alpha_1 tg \alpha_2 \left[ \frac{h_2 - h_1}{tg \alpha_1 - tg \alpha_2} \right], \quad (10)$$

а решая совместно уравнения (6-8), соответственно получим:

$$z = \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) \left[ \frac{h_2 tg \beta_2 - h_1 tg \beta_1}{tg \beta_2 - tg \beta_1} \right], \quad (11)$$

$$x = \left( \frac{p}{P_c} + 1 \right) tg \beta_1 tg \beta_2 \left[ \frac{h_2 - h_1}{tg \beta_1 - tg \beta_2} \right]. \quad (12)$$

Таким образом, получены расчетные формулы (9-12), позволяющие вычислить все три координаты ЦТ подвешиваемого груза. Более того, вертикальная координата ЦТ груза  $z$  может быть вычислена по любой из формул (9) или (11), которые, по существу, независимы друг от друга. Это предоставляет нам возможности по увеличению точности расчетов путем сравнения результатов, полученных по двум независимым формулам.



**Второй способ** – изменение отношения масс траверсы и груза  $\frac{p}{P_c}$ . Этот способ, по существу, включает два варианта, так как отношение  $\frac{p}{P_c}$  можно изменять либо путем изменения массы траверсы  $p$ , либо массы груза  $P_c$ . (Второй вариант может быть реализован путем установки дополнительного груза массой  $m$  на погрузочную платформу).

Следуя логике первого способа, предположим, что в первом подвешивании (опыте) отношение массы траверсы и груза было равно  $\bar{p}_1 = \left(\frac{p}{P_c}\right)_1$ . При этом измеренные углы отклонения траверсы (или погрузочной платформы с грузом) –  $\alpha_1, \beta_1$ . Во втором подвешивании будем полагать, что отношение масс –  $\bar{p}_2 = \left(\frac{p}{P_c}\right)_2$ , а измеренные углы отклонения –  $\alpha_2, \beta_2$ . Тогда по результатам двух подвешиваний можно составить следующую систему уравнений:

$$tg \alpha_1 = \frac{y}{h(\bar{p}_1 + 1) - z}, \quad (13)$$

$$tg \beta_1 = \frac{x}{h(\bar{p}_1 + 1) - z}, \quad (14)$$

$$tg \alpha_2 = \frac{y}{h(\bar{p}_2 + 1) - z}, \quad (15)$$

$$tg \beta_2 = \frac{x}{h(\bar{p}_2 + 1) - z}, \quad (16)$$

где  $\bar{p}_1 = \left(\frac{p}{P_c}\right)_1, \bar{p}_2 = \left(\frac{p}{P_c}\right)_2$  – отношения масс траверсы и груза при первом и втором подвешиваниях соответственно.

Решая совместно вначале систему (13-15), а затем (14-16), в итоге можно получить следующее:

$$z = h \left[ \frac{(\bar{p}_2 + 1)tg \alpha_2 - (\bar{p}_1 + 1)tg \alpha_1}{tg \alpha_2 - tg \alpha_1} \right], \quad (17)$$

$$y = h \cdot tg \alpha_1 \cdot tg \alpha_2 \left[ \frac{\bar{p}_2 - \bar{p}_1}{tg \alpha_1 - tg \alpha_2} \right], \quad (18)$$

$$z = h \left[ \frac{(\bar{p}_2 + 1)tg \beta_2 - (\bar{p}_1 + 1)tg \beta_1}{tg \beta_2 - tg \beta_1} \right], \quad (19)$$

$$x = h \cdot tg \beta_1 \cdot tg \beta_2 \left[ \frac{\bar{p}_2 - \bar{p}_1}{tg \beta_1 - tg \beta_2} \right], \quad (20)$$

Сравним между собой оба способа по точности определения координат ЦТ груза. Очевидно, что эта точность зависит, в том числе, и от того, насколько большей будет разница между  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  ( $\beta_1$  и  $\beta_2$ ) при изменении высоты первичного подвеса  $h$  (в первом способе) и изменения отношения масс траверсы и груза  $\frac{p}{P_c} = \bar{p}$  (во втором). Иными словами, насколько чувствительна система подвешивания (степень ее наклона) при изменении вышеуказанных параметров ( $h$  и  $\bar{p}$ ).

Оценим эту чувствительность на примере изменения угла  $\alpha$ , для чего проанализируем уравнение (3). Для оценки чувствительности первого способа представим это уравнение в виде:

$$tg \alpha = \frac{y}{h - z} \quad (21)$$

Такой упрощенный вид уравнения (3) следует из того обстоятельства, что при подъеме и погрузке на судно крупногабаритных или тяжеловесных грузов масса траверсы намного меньше массы самого груза ( $p \ll P_c$ ), откуда следует:

$$\left(\frac{p}{P_c} + 1\right) \approx 1 \quad (22)$$

Из уравнения (21) видно, что при фиксированных значениях  $y, z$  (координат ЦТ груза) изменение угла наклона системы  $\alpha$  будет зависеть только от изменения высоты первичного подвеса  $h$ .

Пусть при первом подвешивании эта высота равна  $h_1$ , а угол отклонения –  $\alpha_1$ , а при втором подвешивании –  $h_2$  и  $\alpha_2$  соответственно. Тогда, используя (21), можно получить:

$$\frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1} = \frac{h_1 - z}{h_2 - z} = \frac{1 - \frac{z}{h_1}}{\frac{h_2}{h_1} - \frac{z}{h_1}} \quad (23)$$

Графики изменения величины  $\frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1}$  от отношения  $\frac{h_2}{h_1}$  при разных значениях аппликаты ЦТ груза ( $z$ ), построенные в соответствии с (23), представлены на рис. 7.

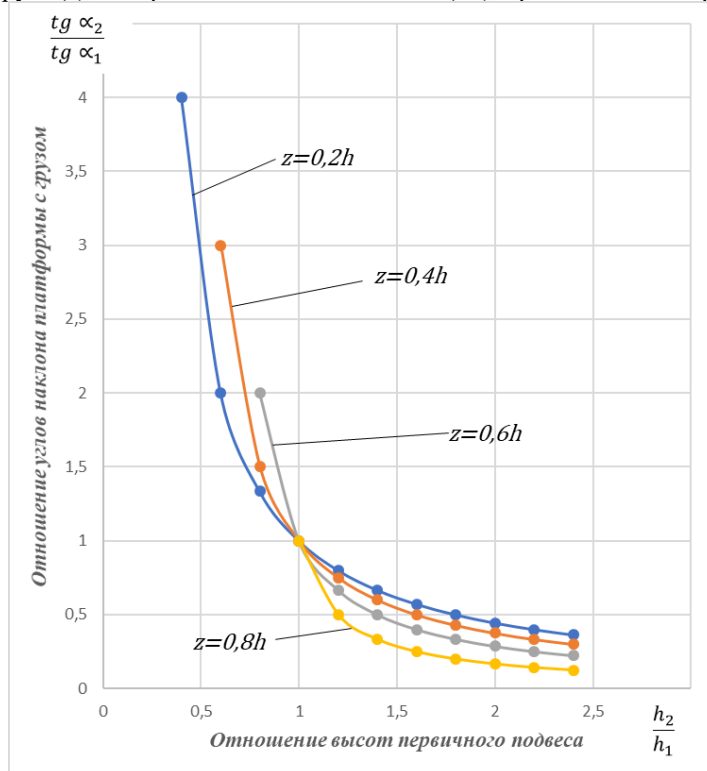


Рис.7. Изменение отношения углов наклона системы  $\left(\frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1}\right)$  от отношения высот первичного подвеса  $\frac{h_2}{h_1}$

Из рис. 7 видно, что увеличение высоты первичного подвеса в 1,5 раза ( $\frac{h_2}{h_1} = 1,5$ ) уменьшает угол отклонения системы во втором подвешивании в 1,4÷4,0 раза ( $\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \approx 0,25 \div 0,75$ ). А ее уменьшение на четверть ( $\frac{h_2}{h_1} \approx 0,75$ ) – увеличивает угол  $\alpha$  в 1,4÷2,0 раза ( $\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \approx 1,4 \div 2,0$ ).

**Замечание 3.** Общеизвестно [8], что при относительно небольших углах ( $\alpha \leq 10^\circ$ ) справедливо приближенное равенство  $tg\alpha \approx \alpha$ , если этот угол измеряется в радианах. При этом ошибка не превышает 1%. При углах  $\alpha \leq 15^\circ$  эта ошибка составляет не более 4%. Поскольку при подвешиваниях углы отклонения нашей системы, как правило, не превышают значений  $15^\circ \div 16^\circ$ , то можно положить, что:

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \approx \frac{tg \alpha_2}{tg \alpha_1}; \quad \frac{\beta_2}{\beta_1} \approx \frac{tg \beta_2}{tg \beta_1}. \quad (24)$$

Для сравнения, если мы хотим добиться вторым подвешиванием уменьшения угла отклонения системы в 2 раза ( $\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \approx 0,5$ ) путем изменения отношения масс траверсы и груза ( $\frac{p}{P_c} = \bar{p}$ ), то следуя логике уравнения (3), необходимо увеличить соотношение ( $\frac{p}{P_c} + 1$ ) в два раза, то есть должно быть достигнуто следующее равенство:  $(\bar{p}_2 + 1) = 2$ , откуда следует:

$$\bar{p}_2 = \left(\frac{p}{P_c}\right)_2 = 1. \quad (25)$$

Из последнего уравнения следует, что во втором подвешивании либо масса траверсы должна увеличиться до массы груза, либо масса груза (вместе с погрузочной платформой) должны уменьшиться до массы траверсы. И то, и другое неприемлемо из практических соображений, так как противоречит здравому смыслу.

Этот простой анализ показывает, что определение положения ЦТ груза с помощью двукратного подвешивания вторым способом, а именно путем изменения отношения масс траверсы и груза обладает гораздо более низкой чувствительностью, и соответственно, точностью. Поэтому с практической точки зрения трудно реализуем и, поэтому, неприемлем.

Это же анализ показал, что первый способ определения положения ЦТ груза (путем двукратного подвешивания и изменением высоты первичного подвеса) обладает довольно хорошей чувствительностью и, соответственно, точностью, а также довольно простой реализацией на практике.

**Замечание 4.** Несмотря на то, что высота первичного подвеса определяется как размерами траверсы, так и длиной первичных строп, с практической точки зрения изменять эту высоту проще путем изменения длины строп. (Изменение размеров траверсы повлечет перестройку всей системы подвешивания с грузом, так как необходимо соблюсти при этом условие одинаковости и параллельности вторичных строп.) Поэтому, первый способ определения положение ЦТ по существу является способом, при котором между подвешиваниями (опытами) изменяется длина первичных строп.

В заключение рассмотрим пример реализации первого способа на численном примере. Пусть имеется груз, закрепленный на погрузочной платформе EFHJ (рис. 4). Масса груза вместе с платформой  $P_c=80$ т (80 000кг). Положение ЦТ груза (вместе с платформой EFHJ) неизвестно. Пусть имеется прямоугольная траверса массой  $p=15$ т (15 000кг). Размеры траверсы (между точками крепления) одинаковы с размерами погрузочной платформы и составляют:  $a=AB=ED=8$ м;  $b=AE=BD=4$ м. Имеются в наличии две группы первичных строп длиной  $l_1=7$ м и  $l_2=11$ м, а также вторичных – длиной 12м. Используя двухзвенную систему (рис. 4), необходимо определить координаты ЦТ груза с платформой путем двукратного подвешивания с изменением длины первичных строп и измерения углов отклонения платформы (углов  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ ).

### Решение

Подсоединяем груз на платформе с помощью вторичных строп к траверсе ABCD, а затем к гаку подъемного устройства (крана) с помощью первичных строп длиной  $l_1=7$ м. Будем полагать, что этой длины достаточно, для того чтобы измеряемый груз был полностью вписан в пирамиду первичного подвеса SABCD (рис. 6). В этом случае устойчивость системы в процессе опыта (подвешивания) будет гарантирована. Кроме того, такая длина строп обеспечивает максимальный угол между ними не

менее  $72^0$ , что соответствует требованиям безопасности [8]. (Расчет максимального угла несложно выполнить, зная длину первичных строп и размеры траверсы).

Производят первое подвешивание системы, в результате которого (из-за смещения ЦТ груза относительно точки подвеса) система деформируется, при этом вторичные стропы останутся в вертикальном положении (рис. 8).

В подвешенном положении равновесия системы измеряют (например, с помощью жидкостного уровня с мерными стеклами) угол отклонения стороны погрузочной платформы EF –  $\alpha_1=17,5^0$ , а также угол отклонения стороны платформы FJ от исходного (горизонтального) положения –  $\beta_1=8,9^0$  (рис. 8).

Систему опускают в исходное положение и заменяют первичные стропы на другие, имеющие большую длину  $l_2=11\text{м}$ . После этого систему вновь подвешивают и измеряют углы отклонения погрузочной платформы EFJH:  $\alpha_2=4,6^0$  и  $\beta_2=2,3^0$ .

Для расчета координат ЦТ груза с платформой по формулам (9-12) необходимо вначале рассчитать высоты первичного подвеса  $h_1$  и  $h_2$  по формуле типа (2), а именно:

$$h_1 = \frac{1}{2} \sqrt{4l_1^2 - BD^2 - AB^2} = \frac{1}{2} \sqrt{4 \cdot 7^2 - 4^2 - 8^2} = 5,39\text{м}$$

$$h_2 = \frac{1}{2} \sqrt{4l_2^2 - BD^2 - AB^2} = \frac{1}{2} \sqrt{4 \cdot 11^2 - 4^2 - 8^2} = 10,05\text{м}$$

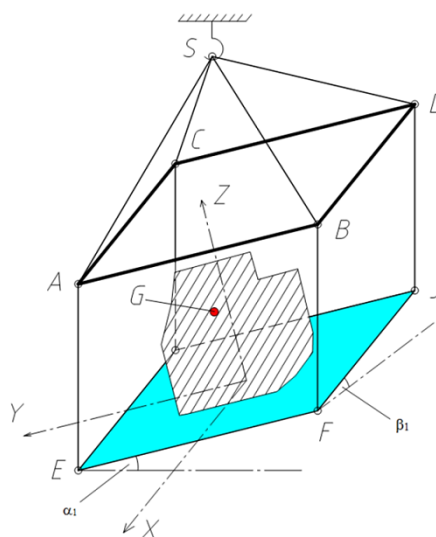


Рис. 8. Система в положении равновесия после первого свободного подвешивания

Далее по формулам (9) и (11) вычисляют координату z:

$$z = \left(\frac{p}{P_c} + 1\right) \left[ \frac{h_2 \text{tg } \alpha_2 - h_1 \text{tg } \alpha_1}{\text{tg } \alpha_2 - \text{tg } \alpha_1} \right] = \left(\frac{15}{80} + 1\right) \left( \frac{10,05 \cdot \text{tg}4,6 - 5,39 \cdot \text{tg}17,5}{0,0805 - 0,3153} \right) = 4,506\text{м}$$

$$z = \left(\frac{p}{P_c} + 1\right) \left[ \frac{h_2 \text{tg } \beta_2 - h_1 \text{tg } \beta_1}{\text{tg } \beta_2 - \text{tg } \beta_1} \right] = \left(\frac{150}{80} + 1\right) \left( \frac{10,05 \text{tg}2,3 - 5,39 \text{tg}8,9}{\text{tg}2,3 - \text{tg}8,9} \right) = 4,493.$$

Полученные два значения z практически равны друг другу, что свидетельствует о качественном проведении обоих опытов (измерений).

1). Теперь по формулам (10) и (12) вычисляются координаты  $y$  и  $x$  соответственно:

$$y = \left(\frac{p}{P_c} + 1\right) \operatorname{tg} \alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_2 \left[ \frac{h_2 - h_1}{\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2} \right] = 1,1875 \cdot 0,3153 \cdot 0,0805 \cdot \left( \frac{10,05 - 5,39}{0,3153 - 0,0805} \right) = 0,0301 \text{ м,}$$

$$x = \left(\frac{p}{P_c} + 1\right) \operatorname{tg} \beta_1 \operatorname{tg} \beta_2 \left[ \frac{h_2 - h_1}{\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta_2} \right] = 1,1875 \cdot 0,1566 \cdot 0,04016 \cdot \left( \frac{10,05 - 5,39}{0,1566 - 0,04016} \right) = 0,299 \text{ м,}$$

Таким образом, в результате подвешивания и расчетов установлено, что высота ЦТ груза с платформой (относительно плоскости ЕFJH) составляет  $z \approx 4,5$  м, при этом его смещение относительно точки подвеса составляет соответственно:  $x=0,299$  м и  $y=0,030$  м.

**Замечание 3.** Если необходимо определить координаты ЦТ только груза (без погрузочной платформы), то это также нетрудно выполнить, если известны массы и груза, и платформы. Так, если в выше рассмотренном примере положить, что масса груза (без платформы) составляет  $P=78$  т, а самой платформы –  $p_b=2$  т, при этом координаты ЦТ последней:  $x_b=y_b=0$ ,  $z_b=0,3$  м, то координаты ЦТ ( $x_r$ ,  $y_r$ ,  $z_r$ ) можно вычислить следующим образом:

$$z_r = \frac{P_c z - p_b z_b}{P_c - p_b} = \frac{80 \cdot 4,5 - 2 \cdot 0,3}{78} = 4,61 \text{ м;}$$

$$x_r = \frac{P_c x - p_b x_b}{P_c - p_b} = \frac{80 \cdot 0,299 - 0}{78} = 0,307 \text{ м;}$$

$$y_r = \frac{P_c y - p_b y_b}{P_c - p_b} = \frac{80 \cdot 0,03 - 0}{78} = 0,031 \text{ м.}$$

В заключение хотелось бы отметить, что предлагаемый нами способ определения положения ЦТ КТГ, несмотря на его простоту и безопасность (в сравнение с прототипами) все же достаточно сложен для повседневного применения в судовых или портовых условиях. Однако, по нашему мнению, в случае крайней необходимости он может быть использован непосредственно перед погрузкой/выгрузкой на судне, так как не требует для своей реализации какого-либо специального оборудования или сложных измерительных приборов. Например, он может быть полезен и применен перед погрузкой на судно с необорудованного причала крупногабаритного (или тяжелого груза) груза, ЦТ которого, по каким-либо причинам не был заранее определен.

### Заключение

На основе результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) На основе уравнений равновесия двухзвенной системы подвешивания предложены два возможных способа определения положения ЦТ груза, суть которых заключается в двукратном подвешивании двухзвенной системы с грузом и измерении углов ее отклонения в подвешенном положении равновесия. При этом разница в углах отклонения системы между подвешиваниями обеспечивается либо путем изменения высоты первичного подвеса (длины первичных строп) – первый способ, либо путем изменения отношения масс траверсы и груза – второй способ. Определение координат ЦТ груза осуществляется с помощью разработанных в статье формул в зависимости от полученных значений углов отклонения системы при двух подвешиваниях, а также высоты первичного подвеса и отношения масс траверсы и груза.

- 2) Проведен сравнительный анализ точности и практической реализуемости обоих способов. При этом, показано, что с практической точки зрения, в том числе при осуществлении грузовых операций в порту или на судне, наиболее подходящим и более точным является первый способ, в котором разница углов отклонения системы в подвешиваниях осуществляется путем изменения длины первичных строп (высоты первичного подвеса).
- 3) Показано, что для обеспечения устойчивости двухзвенной системы подвешивания в процессе измерения координат ЦТ груза, важным условием является то, что первичные стропы (соединяющие крюк и траверсу), должны быть одинаковой длины и таковой, чтобы измеряемый (подвешиваемый) груз виртуально мог быть вписан внутрь пирамиды (*пирамиды безопасности*), образованной траверсой и этими стропами. Длина вторичных строп (соединяющих траверсу и груз) не имеет значения, однако, важно, чтобы они были равной длины и параллельны друг другу.
- 4) Чем тяжелее траверса (в сравнение с массой груза) – тем выше пирамида безопасности, а значит и более устойчивой становится система подвешивания в целом. Характерно также, что длина вторичных строп не влияет на устойчивость двухзвенной системы подвешивания.
- 5) Ввиду избыточности получаемой в результате подвешиваний информации, аппликата ЦТ груза  $z$  может быть вычислена двумя различными способами (по формулам 9 или 11). Это предоставляет дополнительные возможности для повышения точности получаемых результатов. Например, вычисленные разными способами значения  $z$ , можно сравнивать между собой или определять среднее между ними. Если же они окажутся слишком разными, то это может быть свидетельством какой-либо ошибки, требующей анализа и, возможно, дополнительного подвешивания (измерения).

#### Список литературы

1. Умрихин В.И., Черный Н. В. Способ определения центра тяжести груза и устройство для его осуществления. Патент на изобретение: SU1 404 431 A1. Опубликовано: 1988.06.23
2. Блинов И.А. Способ определения положения центра тяжести массивных изделий. Патент на изобретение RU 2 721 158 C1. 2020.05.18.
3. Kaps H. (2009) BBC Guideline. Safe Solutions for Project Cargo Operations. Version 1.0. BBC Chartering & Logistics GmbH&Co. KG—68p. deckofficer.ru/titul/study/item/safe-solutions-for-project-cargo-operations
4. Kaps H. (2013) Stability of Cargo Suspension Arrangements. Transport Information Service (TIS) from the German Insurance Association. [www.tis-gdv.de/tis\\_e/inhalt.html](http://www.tis-gdv.de/tis_e/inhalt.html).
5. Никитин Е.В., Устойчивость двухзвенной системы подвешивания груза с параллельными стропами вторичного подвеса. Вестник одесского национального морского университета. Сборник научных трудов. Вып. 3 (39), 2013, с.156–167.
6. Nikitin Yevgeny V. Static and tip-over stability analysis of two-chain suspension arrangements for large scale cargo operations//WMU Journal of Maritime Affairs. Volume 13, Number 1, April 2014, pp. 101–126. DOI 10.1007/s13437-013-0054-5.
7. Никитин Е.В. Обеспечение остойчивости и безопасности на кораблях и судах при перегрузке крупногабаритных и тяжеловесных грузов: монография. Севастополь: ЧВВМУ имени П.С. Нахимова, 2018.—171с.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Главиздат, 1953.—608с.

9. "Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения". Приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 №1 ФНП в области промышленной безопасности от 26.11.2020 №461. [www/normative.contur.ru](http://www/normative.contur.ru)

#### References

1. Umrikhiin, V. I., Chierny N.V. SU1 404 431 A1. IPS G01M 1/12. Sposob opredelenia tsentra tiazhesti gruza i ustroistvo dlia ego osushestvlenia. Publ. 23 June 1988.
2. Blinov I.A. RU 2 721 158 C1. . IPS G01M 1/12. Sposob opredelenia polozhenia tsentra tiazhesti massivnyh izdelii. Publ. 18 May 2020.
3. Kaps H. (2009) BBC Guideline. Safe Solutions for Project Cargo Operations. Version 1.0. BBC Chartering & Logistics GmbH&Ko. KG—68p. [deckofficer.ru/titul/study/item/safe-solutions-for-project-cargo-operations](http://deckofficer.ru/titul/study/item/safe-solutions-for-project-cargo-operations)
4. Kaps H. (2013) Stability of Cargo Suspension Arrangements. Transport Information Service (TIS) from the German Insurance Association. [www.tis-gdv.de/tis\\_e/inhalt.html](http://www.tis-gdv.de/tis_e/inhalt.html).
5. Nikitin Yevgeny V. Ustoichivost dvuhzvennoy sistemy poveshiivaniia gruza c parallelnumy stropamy vtorichnogo podvesa. Vestnik odesskogo natsionalnogo universiteta. Sbornik nauchnyh trudov. Vol.3 (39), 2013, pp.156-167.
6. Nikitin Yevgeny V. Static and tip-over stability analysis of two-chain suspension arrangements for large scale cargo operations//WMU Journal of Maritime Affairs. Volume 13, Number 1, April 2014, pp. 101–126. DOI 10.1007/s13437-013-0054-5.
7. Nikitin Yevgeny V. Obespechenie ostoychivosti i bezopasnosti nf korabliah I sudah pri peregruzke krupnogabaritnyh I tiazhelovesnyh gruzov. Sevastopol: CHVVMU imeni P.S. Nakhimova, 2018.—171p.
8. Bronshtein, I.N., and K.A. Semendyaev. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsva vtuzov. M.: Glavizdat, 1953.
9. Pravila bezopasnosti opasnyh proizvodstvennykh obektov, na rotoryh ispolzuutsia podemnye sooruzhenia. PRIKAZ ROSTEHNADZORA, 26.11.2020 №1 FNP v oblasti provushltnnoi bezopasnosti, 26.11.2020 №461. [www/normative.contur.ru](http://www/normative.contur.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Никитин Евгений Васильевич**, д.т.н., профессор, профессор кафедры устройства и живучести корабля, Черноморское высшее военно-морское орденов Нахимова и Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова, 299028, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Дыбенко, 1. e-mail: [yvnik76@yandex.ru](mailto:yvnik76@yandex.ru)

**Yevgeny V. Nikitin**, Dr. of Technical Sciences, professor, Professor of the Department of Construction and Survivability of Ship, The Black Sea Naval College named after P.S. Nakhimov, 1 Dybenko Str., Sevastopol, 299028, Russian Federation, e-mail: [yvnik76@yandex.ru](mailto:yvnik76@yandex.ru)

**Симененко София Андреевна**, аспирант кафедры океанотехники и кораблестроения, Севастопольский государственный университет, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33. e-mail: [sasimenenko@mail.sevsu.ru](mailto:sasimenenko@mail.sevsu.ru)

**Sofia A. Simenenko**, Ph.D. student of the Department of Ocean Engineering and Shipbuilding, Sevastopol State University, 33 Universitetskaia str., Sevastopol, 29903, Russian Federation, e-mail: [sasimenenko@mail.sevsu.ru](mailto:sasimenenko@mail.sevsu.ru)

Статья поступила в редакцию 22.02.2024; опубликована онлайн 20.06.2024.  
Received 22.02.2024; published online 20.06.2024.