

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1197-1208

## STABILITY ANALYSIS OF TWO-CHAIN SUSPENSION ARRANGEMENT WITH ELASTIC SLINGS FOR LARGE-SCALE AND HEAVY LIFT CARGO OPERATIONS

**Y. V. Nikitin**

The Black Sea Naval College named after P. S. Nakhimov,  
Sevastopol, Russian Federation

*The stability analysis of two-chain suspension arrangements for large-scale and heavy-lift cargo operations has been conducted. Today, such suspension systems are broadly used on board ships. The stability analysis carried out on the assumption that such suspension systems can be considered as a mechanical system with ideal holonomic linkages having two degrees of freedom. In addition, the secondary slings of the suspension system are initially parallel to each other, and all slings of the system are elastic ones, that is lengthened under load. It has been shown that such a suspension system is in the stable equilibrium position (despite the possible deflection from the origins and shape change) if the center of gravity of a load suspended is inside or on the borders of a certain area – an isosceles triangle (called as a "safety triangle"). The base of this triangle is the cargo platform (or the segment between two fixing points of the secondary slings), and the height of the "safety triangle" depends on the relationship between masses of the spreader and the load and elongations of the elastic slings as well. If a suspension system is in the critical position of stable equilibrium (that takes place when the center of gravity of the load is located on one of the sides of the "safety triangle"), then the analytical expressions for estimation of the deflection (tilting angle) of the spreader relative to the original (horizontal) position have been developed. For such critical position, the equations allowing to calculate the elongations of all elastic slings, as well as the dimensions (height and length of the base) of the "safety triangle" have been also developed. All equations and formulas developed have been appropriately demonstrated by the numerical example. A comparative stability analysis of two-chain suspension arrangements with elastic and non-elastic slings has been also performed. As a result, it has been shown that, all other things being equal, a suspension arrangement with non-elastic slings is more stable (the height of its "safety triangle" is greater) than a system with elastic slings.*

*Keywords: two-chain suspension arrangement, stability, critical position of equilibrium, "safety triangle", elastic and non-elastic slings.*

**For citation:**

Nikitin, Yevgeny V. "Stability analysis of two-chain suspension arrangement with elastic slings for large-scale and heavy lift cargo operations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1197–1208. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1197-1208.

**УДК 629.123; 629.5.065.2**

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДВУХЗВЕННЫХ СИСТЕМ ПОДВЕШИВАНИЯ С ЭЛАСТИЧНЫМИ СТРОПАМИ ПРИ ПОГРУЗКЕ / ВЫГРУЗКЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ И ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ГРУЗОВ

**Е. В. Никитин**

Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова,  
Севастополь, Российская Федерация

*Проведен анализ статической устойчивости двухзвенных систем подвешивания крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ), которые достаточно широко применяются сегодня на морском транспорте. Анализ устойчивости проведен исходя из предположения о том, что такие системы подвешивания (СП) могут быть рассмотрены как механические системы с идеальными голономными связями, имеющие две степени свободы. При этом вторичные стропы СП первоначально параллельны друг другу, а все стропы системы являются эластичными, т. е. удлиняются под действием нагрузки. Показано, что такая система находится в положении устойчивого равновесия (несмотря на ее возможное отклонение от исходного*

положения и изменение формы), если ЦТ груза расположен внутри или на границах некоторой области — равнобедренного треугольника, названного условно «треугольником безопасности» (ТБ). Показано, что основание ТБ — это платформа вторичного подвеса (отрезок между точками крепления вторичных строп), а высота ТБ зависит от отношения массы траверсы и груза, а также величины удлинения эластичных строп. Для случая предельного положения устойчивого равновесия СП (когда ЦТ груза размещен на одной из боковых сторон «треугольника безопасности») получено аналитическое выражение для оценки угла отклонения траверсы относительно исходного (горизонтального) положения. Для такого предельного случая получены также уравнения, позволяющие рассчитать удлинения всех эластичных строп, а также вычислить размеры (высоту и длину основания) ТБ, т. е. области, внутри которой должен находиться ЦТ груза, чтобы двухзвенная система подвешивания оставалась в положении устойчивого равновесия. Возможности разработанных методов и аналитических выражений демонстрируются с помощью конкретного числового примера. Выполнен также сравнительный анализ устойчивости двухзвенных систем подвешивания с эластичными и неэластичными стропами. Показано, что при прочих равных условиях высота и площадь «треугольника безопасности», а значит, и устойчивость СП выше в случае применения неэластичных строп.

**Ключевые слова:** двухзвенная система подвешивания, устойчивость, предельное положение равновесия, «треугольник безопасности», эластичные стропа.

**Для цитирования:**

Никитин Е. В. Анализ устойчивости двухзвенных систем подвешивания с эластичными стропами при погрузке / выгрузке крупногабаритных и тяжеловесных грузов / Е. В. Никитин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1197–1208. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1197-1208.

**Введение (Introduction)**

Для погрузки / выгрузки на судах крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ) довольно часто применяют комплексные (двухзвенные) системы их подвешивания к подъемному устройству. Пример такой системы подвешивания (СП) приведен на рис. 1. Данные системы при определенных условиях могут быть неустойчивыми и способны опрокинуться после их подвешивания подъемным краном со всеми вытекающими негативными последствиями как для судна, так и для груза.

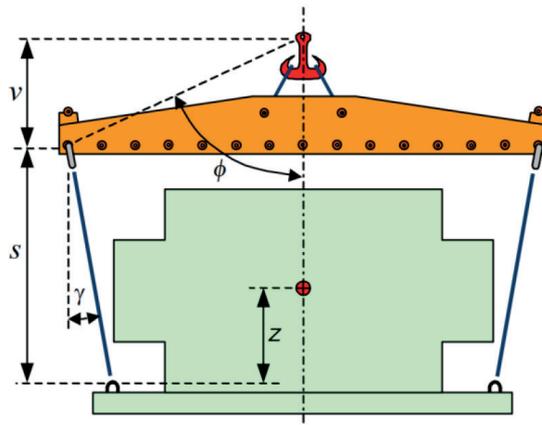


Рис. 1. Пример двухзвенной системы подвешивания крупногабаритного груза

Одна из первых попыток оценить каким-то образом устойчивость двухзвенных систем подвешивания груза была предпринята в работах [1] – [3]. На основе аналогии с начальной устойчивостью судна проф. Г. Капс [1] – [3] предложил методику и расчетные формулы для оценки предельной высоты положения центра тяжести (ЦТ) груза относительно СП (погрузочной платформы CD — рис. 2). Однако эта методика не соответствует классической концепции устойчивости механических систем, поэтому в ряде случаев может давать значительные ошибки, что было продемонстрировано в [4] – [6]. Кроме того, она не позволяет определить всю область допустимых положений ЦТ груза относительно СП так, чтобы последняя сохраняла устойчивое положение

равновесия. Поэтому в работах [6], [7] на основе представления СП с КТГ как механической системы тел с идеальными связями и двумя степенями свободы относительно точки подвеса  $S$ , был выполнен анализ условий для ее устойчивого равновесия. При этом получены аналитические выражения, позволяющие, с одной стороны, рассчитать предельный угол отклонения траверсы  $AB$  от исходного (горизонтального положения), а также определить некую область, размещение ЦТ груза внутри которой позволяет СП оставаться в устойчивом положении равновесия. Эта область, имеющая форму равнобедренного треугольника, была названа «треугольником безопасности» (ТБ). Основание ТБ совпадает с расстоянием между точками крепления вторичных строп к КТГ (точками  $C$  и  $D$ ), а высота зависит от высоты первичного подвеса  $SE$  (см. рис. 2) и отношения масс траверсы  $AB$  ( $p$ ) и поднимаемого (подвешиваемого) груза ( $P_c$ ).

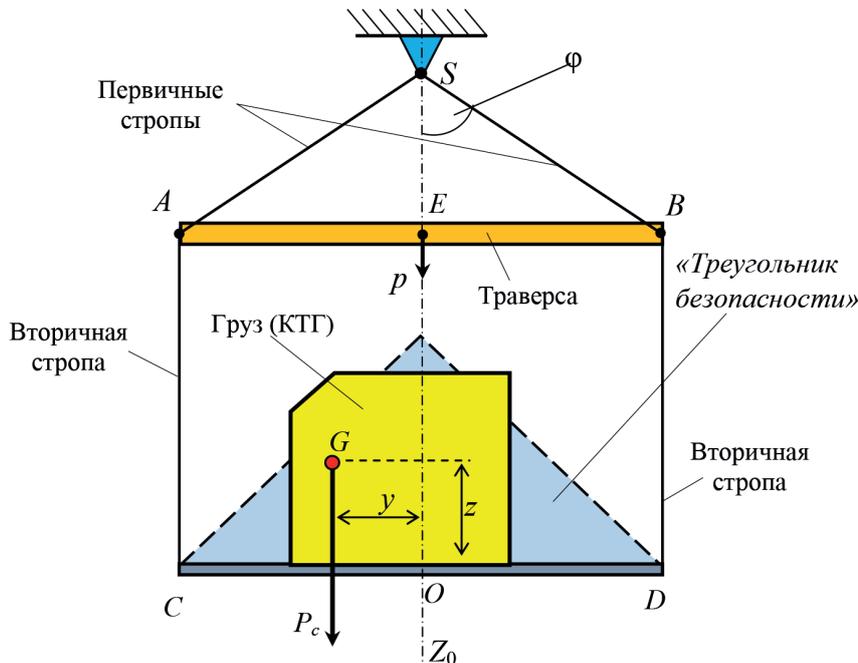


Рис. 2. Система подвешивания КТГ с параллельными вторичными стропами в первоначальном положении (до момента ее подвеса в точке  $S$ )

Известно, что в практике перегрузок КТГ, при составлении планов или временных технологических инструкций перегрузки, поперечное смещение ЦТ груза относительно точки подвеса  $S$  (см. рис. 2) не допускается [8], [9]. Тем не менее, по мнению автора статьи, возможность определения всей допустимой области (ТБ) положения ЦТ груза относительно СП дает ряд преимуществ как составителю плана перегрузки КТГ, так и его исполнителям. Например, это позволяет сравнивать системы подвешивания различной конфигурации по уровню устойчивости, выбирая при этом наилучшую. Кроме того, знание размеров ТБ может позволить разместить ЦТ груза как можно дальше от его границ, особенно по высоте, так как в источниках [4] – [6] показано, что нахождение ЦТ в непосредственной близости от вершины ТБ и даже внутри него является нежелательным, так как сама вершина ТБ является точкой неустойчивости. Наконец, знание размеров ТБ и размещение ЦТ груза как можно дальше от его границ поможет повысить устойчивость СП в целом и, как следствие, позволит избежать негативного воздействия разного рода случайностей (неожиданного порыва ветра, качки судна, раскачивания СП со значительной амплитудой, смещения груза в процессе перегрузки и т. д.).

В работах [10] и [11], на основе данных источников [6] и [7], проанализирована устойчивость СП с параллельными и эластичными стропами вторичного подвеса. Однако случай эластичности (растяжимости) всех строп, включая растяжимость строп  $SA$ ,  $SB$  первичного подвеса не рассматривался.

Исходя из ранее изложенного, целью данной статьи является анализ устойчивости двухзвенных систем подвешивания КТГ со всеми эластичными стропами при условии, что в первоначальном положении вторичные стропа СП параллельны друг другу.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Пусть задана двухзвенная СП, у которой стропа вторичного подвеса  $AC$ ,  $BD$  первоначально (до подвешивания) равны и параллельны друг другу (см. рис. 2). При этом все стропа системы — и первичные, и вторичные — являются растяжимыми (эластичными). В предельном положении равновесия СП, которое наступает при условии, что ЦТ груза находится на краю погрузочной платформы — в точке  $C$  [6], [7], [10], [11], первичный подвес принимает вид неправильного косоугольного треугольника (стропа  $SA_e$  становится длиннее  $SB_e$ ). При этом траверса  $AC$ , из-за неодинакового удлинения строп, займет положение  $A_eC_e$ , отклонившись относительно начального положения (линии горизонта) на угол  $\alpha_m$  (рис. 3).

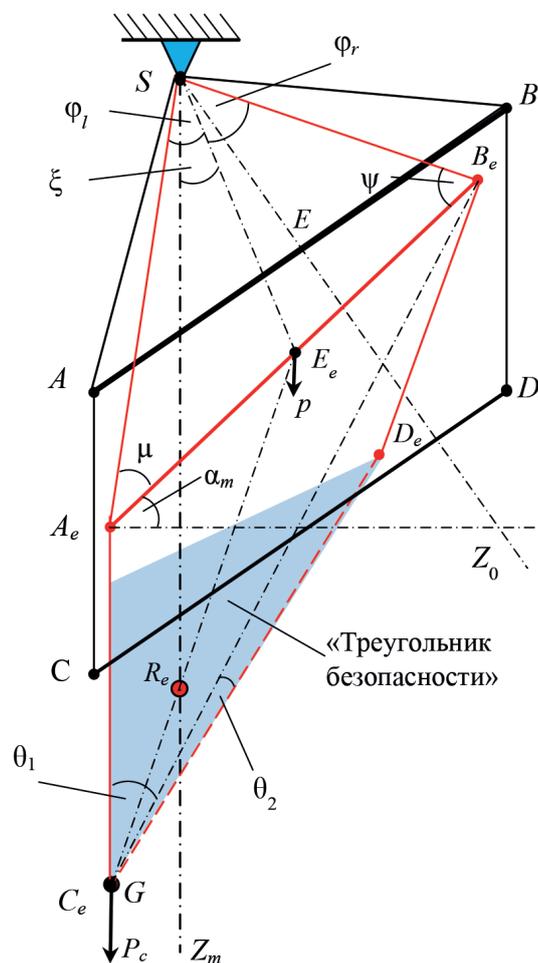


Рис. 3. Предельное положение равновесия СП при нерастяжимых (фигура  $SABCD$ ) и растяжимых ( $SA_eB_eC_eD_e$ ) стропах (ЦТ груза размещен в точке  $C_e$ )

Важно, что угол между вертикалью  $Z_{me}$  и отрезком  $SE_e$  не равен  $\alpha_m$  (как это было в случае нерастяжимых первичных строп [6], [7]). Поэтому он обозначен буквой  $\xi$  (см. рис. 2). Углы между отрезком  $SE_e$  и стропами  $SA_e$  и  $SB_e$  также изменились. Они более не равны друг другу и поэтому обозначены  $\phi_l$  и  $\phi_r$  соответственно. Углы при основании треугольника первичного подвеса  $SA_eB_e$  также более не равны друг другу ( $\mu \neq \psi$ ). Вторичная (левая) стропа  $A_eC_e$  удлинится за счет того, что сила тяжести груза  $P_c$  полностью приложена только к ней. В результате вторичный подвес становится неправильным четырехугольником (см. рис. 3).

При определенных условиях удлинение вторичной стропы  $A_e C_e$  может привести к тому, что платформа  $CD$  и ненагруженная стропы  $BC$  окажутся на одной прямой, превращая, таким образом, вторичный подвес из четырехугольника в треугольник. При этом стропы  $B_e C_e$  также начнет воспринимать часть нагрузки, а значит, и растягиваться. Этот случай равновесия системы в данной статье рассматриваться не будет.

### Результаты (Results)

Для того чтобы определить удлинение нагруженных строп системы подвешивания, необходимо в первую очередь вычислить силы, действующие на них в предельном положении равновесия. Для их вычисления рассмотрим равновесие траверсы  $AB$  ( $A_e B_e$ ) со всеми приложенными к ней силами (рис. 4). Из рисунка видно, что в положении равновесия на траверсу  $AB$  действуют четыре внешние силы:  $P_c$  — сила тяжести груза, расположенного в точке  $C$ ;  $p$  — сила тяжести самой траверсы;  $F_r$  и  $F_l$  — силы натяжения первичных строп, удерживающих траверсу  $AB$ . Для того чтобы траверса  $AB$  находилась в положении равновесия, необходимо и достаточно, чтобы сумма проекций всех сил на каждую из двух координатных осей и сумма их моментов относительно любого центра, лежащего в плоскости действия сил, были равны нулю [5].

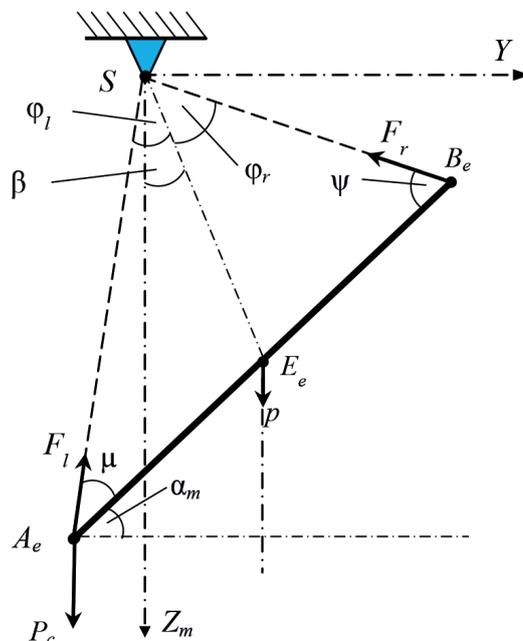


Рис. 4. Траверса  $AB$  в предельном положении равновесия со всеми приложенными внешними силами

Для математической записи этих условий равновесия выберем систему координат  $Z_m S Y$  (см. рис. 4). Тогда сумму проекций всех сил на вертикальную ось  $Z_m S$  можно записать в виде

$$P_c + p - F_l \cos(\varphi_l - \xi) - F_r \cos(\varphi_r + \xi) = 0. \quad (1)$$

Сумма проекций этих же сил на горизонтальную ось  $S Y$  равна

$$F_l \sin(\varphi_l - \beta) - F_r \sin(\varphi_r + \beta) = 0. \quad (2)$$

Вычислим также сумму моментов всех сил относительно центра — точки  $A_e$ , и приравняем ее нулю. Принимая, что  $A_e B_e = 2b$ , м, получим

$$2bF_r \sin \psi - pb \cos \alpha_m = 0. \quad (3)$$

Система уравнений (1) – (3) описывает необходимые и достаточные условия для равновесия траверсы  $AB$  в предельном положении равновесия системы подвешивания в целом.

Из уравнения (3) можно получить

$$F_l = F_r \frac{\sin(\varphi_r + \xi)}{\sin(\varphi_l - \xi)}. \quad (4)$$

Подставив выражение (4) в уравнение (1), получим

$$P_c + p - F_r \frac{\sin(\varphi_r + \xi)}{\sin(\varphi_l - \xi)} \cos(\varphi_l - \xi) - F_r \cos(\varphi_r + \xi) = 0,$$

откуда после преобразований получим

$$P_c + p - F_r \frac{\sin(\varphi_r + \varphi_l)}{\sin(\varphi_l - \xi)} = 0,$$

или

$$F_r = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi_l - \xi)}{\sin(\varphi_r + \varphi_l)}. \quad (5)$$

Подставив уравнение (5) в выражение (4), получим

$$F_l = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi_r + \xi)}{\sin(\varphi_r + \varphi_l)}. \quad (6)$$

Теперь подставим уравнение (6) в (3). В результате можно получить следующее выражение:

$$\cos \alpha_m = \frac{2}{p} (P_c + p) \frac{\sin(\varphi_l - \xi) \sin \psi}{\sin(\varphi_r + \varphi_l)}. \quad (7)$$

Учитывая, что

$$\varphi_l - \xi = \frac{\pi}{2} - \alpha_m - \mu; \quad \varphi_r + \xi = \frac{\pi}{2} + \alpha_m - \psi; \quad \varphi_l + \varphi_r = \pi - \mu - \psi,$$

можно записать:

$$\sin(\varphi_l - \xi) = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_m - \mu\right) = \cos(\alpha_m + \mu); \quad (8)$$

$$\sin(\varphi_r + \varphi_l) = \sin(\pi - \mu - \psi) = \sin(\mu + \psi). \quad (9)$$

Подставив выражения (8) и (9) в уравнение (7), получим

$$\cos \alpha_m = \frac{2}{p} (P_c + p) \frac{\cos(\alpha_m + \mu) \sin \psi}{\sin(\mu + \psi)}. \quad (10)$$

Учитывая, что

$$\cos(\alpha_m + \mu) = \cos \alpha_m \cos \mu - \sin \alpha_m \sin \mu,$$

выражение (10) примет следующий вид:

$$\cos \alpha_m = \frac{2}{p} (P_c + p) \frac{(\cos \alpha_m \cos \mu - \sin \alpha_m \sin \mu) \sin \psi}{\sin(\mu + \psi)}.$$

Разделив обе части последнего уравнения на  $\cos \alpha_m$ , получим

$$1 = \frac{2}{p} (P_c + p) \frac{(\cos \mu - \operatorname{tg} \alpha_m \sin \mu) \sin \psi}{\sin(\mu + \psi)}. \quad (11)$$

Выполнив преобразования выражения (11) с учетом того, что

$$\sin(\mu + \psi) = \sin \mu \cos \psi + \cos \mu \sin \psi,$$

можно окончательно получить следующее выражение:

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \operatorname{ctg} \mu - \frac{P}{2(P_c + p)} (\operatorname{ctg} \psi + \operatorname{ctg} \mu). \quad (12)$$

Уравнения (5), (6) и (12) образуют систему, полностью описывающую предельное положение равновесия траверсы  $AC$  при всех растяжимых стропах. С их помощью можно вычислить как силы, растягивающие первичные стропы, так и предельный угол  $\alpha_m$  отклонения траверсы  $AC$ .

### Обсуждение (Discussion)

Если первичные стропы нерастяжимы, то первичный подвес превращается в равнобедренный треугольник  $SAC$ , в котором:

$$\psi = \mu = \frac{\pi}{2} - \varphi; \quad (13)$$

$$\mu + \psi = \pi - 2\varphi; \quad (14)$$

$$\varphi_r + \varphi_l = 2\varphi; \quad (15)$$

$$\xi = \alpha_m. \quad (16)$$

С учетом выражений (13) – (16), а также уравнения (10) система уравнений (5), (6) и (12) примет вид:

$$F_r = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi - \alpha_m)}{\sin 2\varphi}; \quad (17)$$

$$F_l = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi + \alpha_m)}{\sin 2\varphi}; \quad (18)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\left(1 + \frac{P}{P_c}\right)}. \quad (19)$$

Последнее уравнение (19) полностью идентично представленным ранее в работах [6] – [9], что вполне логично. Однако оно получено на основе иных соображений и совершенно другим способом.

Определив по уравнениям (17) – (19) силы  $F_r, F_l$ , растягивающие первичные стропы, необходимо вычислить их удлинение, для чего можно воспользоваться приемом, изложенным в работах [2], [3], в соответствии с которым удлинение строп можно рассчитать следующим образом:

$$dL = \frac{FL}{D_N}, \quad (20)$$

где  $dL$  — удлинение стропы, м;

$F$  — сила, действующая на стропу, тс;

$L$  — исходная длина стропы (без нагрузки), м;

$D_N$  — константа упругости стропы (*Nominal Spring Constant*), тс.

Константа упругости  $D_N$  может быть определена следующим образом [2], [3]:

$$D_N = \frac{WLL}{\varepsilon}, \quad (21)$$

где  $WLL$  — допустимая рабочая нагрузка стропы (*Weight Load Limit*), тс (допустимая сила растяжения стропы, оцениваемая производителем строп);

$\varepsilon = \frac{dL}{L}$  — относительное удлинение стропы при приложении предельной рабочей нагрузки ( $WLL$ ).

Так, например, для строп из полиэстера, которые сегодня широко применяются,  $\epsilon = 0,023$  (при приложении к ним  $WLL$ ). В этом случае, при условии, если первичные стропы нагружены до предельной рабочей нагрузки ( $WLL$ ), константа упругости

$$D_N = \frac{(P_c + p)}{2\epsilon \cos \varphi} = \frac{(P_c + p)}{0,046 \cos \varphi}. \quad (22)$$

Для вторичных строп, на которые действует только сила  $P_c$ , константу упругости можно определить по аналогичной формуле, заменив угол  $\varphi$  на  $\gamma$ , т. е.

$$D_N = \frac{P_c}{2\epsilon \cos \gamma} = \frac{P_A}{0,046 \cos \gamma}. \quad (23)$$

В результате неодинакового удлинения первичных строп первичный подвес из равнобедренного превращается в косоугольный треугольник  $SA_e B_e$  (см. рис. 2 и 3). Причем все стороны этого треугольника известны или могут быть вычислены. Поэтому, следуя данным работы [12], можно вычислить и углы  $\mu$ ,  $\psi$  этого косоугольного треугольника по следующим формулам:

$$\mu = 2 \arctg \left( \frac{m_\alpha}{F_\alpha - SB_e} \right); \quad (24)$$

$$\psi = 2 \arctg \left( \frac{m_\alpha}{F_\alpha - SA_e} \right), \quad (25)$$

где

$$F_\alpha = \frac{1}{2}(SA_e + SB_e + AB); \quad (26)$$

$$m_\alpha = \sqrt{\frac{(F_\alpha - SA_e)(F_\alpha - SB_e)(F_\alpha - AB)}{F_\alpha}}. \quad (27)$$

Вычислив по формулам (24) – (27) углы  $\mu$ ,  $\psi$ , по формуле (12) можно определить угол  $\alpha_m$  отклонения траверсы  $AB$  в предельном положении равновесия СП. Так как в предельном положении равновесия вторичный подвес будет образовывать четырехугольник, далее из треугольника  $A_e B_e E_e$ , в котором угол при вершине  $B_e$  известен и равен  $\alpha_m + \pi/2$  (см. рис. 2), по теореме косинусов вычислим значение стороны  $B_e C_e$ , а затем по теореме синусов — значение угла  $\theta_1$  [12]:

$$B_e C_e^2 = (2b)^2 + A_e C_e^2 - 2b \cdot A_e C_e \cos \left( \alpha_m + \frac{\pi}{2} \right)$$

или

$$B_e C_e = \sqrt{(2b)^2 + A_e C_e^2 + 2b \cdot A_e C_e \sin \alpha_m}; \quad (28)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{2b}{B_e C_e} \sin \left( \alpha_m + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{2b}{B_e C_e} \cos \alpha_m,$$

или

$$\theta_1 = \arcsin \left( \frac{2b}{B_e C_e} \cos \alpha_m \right). \quad (29)$$

Теперь из треугольника  $C_e B_e D_e$ , в котором известны все его стороны, можно вычислить угол  $\theta_2$  следующим образом [12]:

$$\theta_2 = 2 \arctg \left( \frac{m_\theta}{F_\theta - r} \right), \quad (30)$$

где

$$F_\theta = \frac{1}{2}(B_e C_e + r + CD); \quad (31)$$

$$m_{\theta} = \sqrt{\frac{(F_{\theta} - B_e C_e)(F_{\theta} - r)(F_{\theta} - CD)}{F_{\theta}}} \quad (32)$$

С учетом ранее изложенного, угол  $\theta$  в основании «треугольника безопасности» можно вычислить как сумму

$$\theta = \theta_1 + \theta_2. \quad (33)$$

Пример. Двухзвенная система подвешивания с грузом весом  $P_c = 160$  тс и параллельными стропами вторичного подвеса (см. рис. 3), перед ее подвешиванием судовым краном, имеет следующие характеристики:  $\varphi = 42^\circ$ ;  $AB = 2b = 8$  м;  $a = b \operatorname{ctg} \varphi = 4,44$  м;  $AC = BD = r = 7$  м; масса траверсы  $AB$   $p = 30$  тс. Необходимо вычислить предельный угол отклонения первичного подвеса  $\alpha_m$ , а также размеры «треугольника безопасности» при условии, что все стропы, изготовленные из полиэстера, растяжимы ( $\varepsilon = 0,023$ ). Предполагается также, что стропы подобраны таким образом, чтобы можно было работать при предельной рабочей нагрузке ( $WLL$ ).

*Решение*

1. По формулам (17), (18) вычислим силы, растягивающие первичные стропы:

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\left(1 + \frac{p}{P_c}\right)} = \frac{\operatorname{tg} 42^\circ}{\left(1 + \frac{30}{160}\right)} = \frac{0,9004}{1,1875} = 0,7582;$$

$$\alpha_m = 37,2^\circ;$$

$$F_r = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi - \alpha_m)}{\sin 2\varphi} = 190 \cdot \frac{\sin 4,8^\circ}{\sin 84^\circ} = 190 \cdot \frac{0,08368}{0,9945} = 15,99 \text{ тс};$$

$$F_l = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi + \alpha_m)}{\sin 2\varphi} = 190 \cdot \frac{\sin 79,2^\circ}{\sin 84^\circ} = 190 \cdot \frac{0,9823}{0,9945} = 187,67 \text{ тс}.$$

2. По формуле (22) определим константу растяжения первичных строп:

$$D_N = \frac{(P_c + p)}{0,046 \cos \varphi} = \frac{(160 + 30)}{0,046 \cdot 0,7432} = 5557,6 \text{ тс}.$$

3. По исходным данным вычислим исходную длину первичных строп:

$$SA = SB = \frac{v}{\cos \varphi} = \frac{4,44}{0,7432} = 5,974 \text{ м}.$$

4. По формуле (20) вычислим удлинение левой ( $dL_l$ ) и правой ( $dL_r$ ) первичных строп:

$$dL_l = \frac{F_l \cdot SA}{D_N} = \frac{187,67 \cdot 5,974}{5557,6} = 0,202 \text{ м};$$

$$dL_r = \frac{F_r \cdot SB}{D_N} = \frac{15,99 \cdot 5,974}{5557,6} = 0,017 \text{ м}.$$

5. Рассчитаем длины растянутых первичных строп:

$$SA_e = 5,974 + 0,202 = 6,176 \text{ м};$$

$$SB_e = 5,974 + 0,017 = 5,991 \text{ м}.$$

6. Так как в предельном положении равновесия будет растянута только одна (левая) вторичная стропа ( $F_{ls} = P_c$ ), вычислим ее удлинение:

– по формуле (23) определим константу растяжения вторичной стропы:

$$D_{Ns} = \frac{P_c}{0,046 \cos \gamma} = \frac{160}{0,046} = 3478,3 \text{ тс};$$

– удлинение вторичной стропы будет равно:

$$A_e C_e = AC + \frac{P_c \cdot AC}{D_{NS}} = 7 + \frac{160 \cdot 7}{3478,3} = 7,322 \text{ м.}$$

7. По формулам (24) – (27) вычислим углы  $\mu$ ,  $\psi$  первичного подвеса после удлинения строп из-за эластичности:

$$F_\alpha = \frac{1}{2}(SA_e + SB_e + AB) = \frac{1}{2}(6,176 + 5,991 + 8) = 10,0835 \text{ м;}$$

$$m_\alpha = \sqrt{\frac{(F_\alpha - SA_e)(F_\alpha - SB_e)(F_\alpha - AB)}{F_\alpha}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(10,0835 - 6,176)(10,0835 - 5,991)(10,0835 - 8)}{10,0835}} = 1,8176;$$

$$\mu = 2 \arctg\left(\frac{m_\alpha}{F_\alpha - SB_e}\right) = 2 \arctg\left(\frac{1,8176}{4,0925}\right) = 47,90^\circ;$$

$$\psi = 2 \arctg\left(\frac{m_\alpha}{F_\alpha - SA_e}\right) = 2 \arctg\left(\frac{1,8176}{3,9075}\right) = 49,90^\circ.$$

8. По формуле (12) вычислим угол отклонения траверсы  $AB$  в предельном положении равновесия при растянутых (эластичных) стропях:

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \operatorname{ctg} \mu - \frac{P}{2(P_c + p)} \cdot (\operatorname{ctg} \psi + \operatorname{ctg} \mu) =$$

$$= \operatorname{ctg} 47,90^\circ - \frac{30}{2(160 + 30)} \cdot (\operatorname{ctg} 49,90^\circ + \operatorname{ctg} 47,90^\circ) =$$

$$= 0,9036 - 0,07895(0,8421 + 0,9036) = 0,7632;$$

$$\alpha_m = \arctg 0,9085 = 37,35^\circ.$$

9. По формулам (28) и (29) рассчитаем отрезок  $B_e C_e$  и угол  $\theta_1$ :

$$B_e C_e = \sqrt{(2b)^2 + A_e C_e^2 + 2b \cdot A_e C_e \sin \alpha_m} =$$

$$= \sqrt{8^2 + 7,322^2 + 2 \cdot 8 \cdot 7,322 \sin 37,35^\circ} = 13,74 \text{ м;}$$

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{2b}{B_e C_e} \cos \alpha_m\right) = \arcsin\left(\frac{8}{13,74} \cos 37,35^\circ\right) = 27,57^\circ.$$

10. По формулам (30) – (32) вычислим угол  $\theta_2$ :

$$F_\theta = \frac{1}{2}(B_e C_e + r + CD) = \frac{1}{2}(13,74 + 7 + 8) = 14,37 \text{ м;}$$

$$m_\theta = \sqrt{\frac{(F_\theta - B_e C_e)(F_\theta - r)(F_\theta - CD)}{F_\theta}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(14,37 - 13,74)(14,37 - 7)(14,37 - 8)}{14,37}} = 1,4346;$$

$$\theta_2 = 2 \arctg\left(\frac{m_\theta}{F_\theta - r}\right) = 2 \arctg\left(\frac{1,4346}{7,37}\right) = 22,03^\circ.$$

11. Тогда угол в основании ТБ составит

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = 27,57 + 22,03 = 49,60^\circ.$$

12. Высота ТБ будет равна

$$z_m = \frac{CD}{2} \operatorname{tg} \theta = \frac{8}{2} \operatorname{tg} 49,60^\circ = 4,70 \text{ м.}$$

Из приведенного примера следует, что высота ТБ составляет 4,70 м. Это значение меньше, чем для такой же СП с нерастяжимыми стропами ( $z_m = 5,37$  м [6], [7]). Кроме того, угол отклонения траверсы  $AB$  в предельном положении равновесия системы составляет  $\alpha_m = 37,35^\circ$ , что незначительно больше, чем при нерастяжимых стропах ( $\alpha_m = 37,20^\circ$  [6], [7]).

### Выводы

1. Для двухзвенной системы подвешивания КТГ с эластичными стропами разработаны аналитические выражения для оценки сил, растягивающих эти стропы в предельном положении равновесия СП. Это позволяет как рассчитать величины удлинения всех строп, так и определить значения углов между отдельными элементами системы подвешивания КТГ.

2. Получены также аналитические зависимости, позволяющие рассчитать предельный угол  $\alpha_m$  отклонения траверсы  $AB$ , а также высоту ТБ, в котором должен находиться ЦТ груза, чтобы система (после ее подвешивания), оставалась в устойчивом положении равновесия. Разработанные при этом формулы и выражения согласуются с полученными ранее в работах [6] – [8] в случае применения нерастяжимых строп.

3. Выполнен сравнительный анализ устойчивости двухзвенной системы подвешивания с эластичными и неэластичными стропами. Показано, что при прочих равных условиях высота и площадь ТБ, а значит, и устойчивость больше в случае применения неэластичных строп.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaps H. Stability of Cargo Suspension Arrangements. Transport Information Service (TIS) / H. Kaps. — 2013. — 26 p.
2. Kaps H. Stabilität von Anschlagvorkehrungen / H. Kaps // Schiff & Haffen. — No. 5. — Pp. 56–58.
3. Kaps H. BBC Guideline. Safe Solutions for Project Cargo Operations. Version 1.0 / H. Kaps. — BBC Chartering & Logistics GmbH&Ko, 2009. — 68 p.
4. Leine R. The Historical Development of Classical Stability Concepts: Lagrange, Poisson and Lyapunov Stability / R. Leine // Nonlinear Dynamics. — 2010. — Vol. 59. — Is. 1 – 2. — Pp. 173–182. DOI: 10.1007/s11071-009-9530-z.
5. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. — М.: Высш. шк., 1986. — 416 с.
6. Nikitin Y. V. Static and tip-over stability analysis of two-chain suspension arrangements for large scale cargo operations / Y. V. Nikitin // WMU Journal of Maritime Affairs. — 2014. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 101–126. DOI 10.1007/s13437-013-0054-5.
7. Никитин Е. В. Устойчивость двухзвенной системы подвешивания груза с параллельными стропами вторичного подвеса / Е. В. Никитин // Вестник одесского национального морского университета. — 2013. — № 3(39). — С. 156–167.
8. РД 31.11.21.24-96. Правила безопасности морской перевозки КГТ грузов. — СПб.: ЦНИИМФ, 1996. — 20 с.
9. РД 31.40.22-93. Правила разработки рабочей технологической документации на погрузочно-разгрузочные работы в морских портах Российской Федерации. — М., 1993.
10. Никитин Е. В. Анализ устойчивости двухзвенных систем подвешивания крупногабаритных грузов с эластичными стропами вторичного подвеса / Е. В. Никитин // Вісник СевНТУ. — 2014. — № 153. — С. 84–87.
11. Никитин Е. В. Устойчивость комплексных систем подвешивания с эластичными стропами при погрузке/разгрузке тяжеловесных и крупногабаритных грузов / Е. В. Никитин, Е. В. Гембатый // Совер-

шенствование проектирования и эксплуатации морских судов и сооружений: сб. докл. межвуз. науч.-техн. конф. — Севастополь: СевГУ, 2015. — С. 80–84.

12. *Бронштейн И. Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — М.: Главиздат, 1953. — 608 с.

## REFERENCES

1. Kaps, H. *Stability of Cargo Suspension Arrangements. Transport Information Service (TIS)*. 2013.
2. Kaps, H. “Stabilität von Anschlagvorkehrungen.” *Schiff&Hafen* 5: 56–58.
3. Kaps, H. *BBC Guideline. Safe Solutions for Project Cargo Operations. Version 1.0*. BBC Chartering & Logistics GmbH & Co, 2009.
4. Leine, Remco I. “The historical development of classical stability concepts: Lagrange, Poisson and Lyapunov stability.” *Nonlinear Dynamics* 59.1 (2010): 173–182. DOI: 10.1007/s11071-009-9530-z.
5. Targ, S.M. *Kratkii kurs teoreticheskoi mekhaniki*. M.: Vysshaya shkola, 1986.
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* 13.1 (2014): 101–126. DOI 10.1007/s13437-013-0054-5.
7. Nikitin, E.V. “Ustoichivost’ dvukhzennoi sistemy podveshivaniya gruzha s parallel’nymi stropami vtorichnogo podvesa.” *Vestnik odesskogo natsional’nogo morskogo universiteta* 3(39) (2013): 156–167.
8. Russian Federation. Guidance document RD 31.11.21.24-96. *Pravila bezopasnosti morskoi perevozki KGT gruzov*. SPb.: TsNIIMF, 1996.
9. Russian Federation. Guidance document RD 31.40.22-93. *Pravila razrabotki rabochei tekhnologicheskoi dokumentatsii na pogruzochno-razgruzochnye raboty v morskikh portakh Rossiiskoi Federatsii*. M., 1993.
10. Nikitin, Y.V. “Stability analysis of two-chain suspension arrangement with elastic secondary sling for large scale cargo operations.” *Visnik SevNTU* 153 (2014): 84–87.
11. Nikitin, E.V., and E.V. Gembatyi. “Ustoichivost’ kompleksnykh sistem podveshivaniya s elastichnymi stropami pri pogruzke/razgruzke tyazhelovesnykh i krupnogabaritnykh gruzov.” *Sovershenstvovanie proektirovaniya i ekspluatatsii morskikh sudov i sooruzhenii: Sb. dokladov mezhvuz. nauchno-tekhn. konf.* Sevastopol’: SevGU, 2015: 80–84.
12. Bronshtein, I.N., and K.A. Semendyaev. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov*. M.: Glavizdat, 1953.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Никитин Евгений Васильевич** —  
доктор технических наук, профессор  
Черноморское высшее военно-морское  
училище имени П. С. Нахимова  
299028, Российская Федерация,  
г. Севастополь, ул. Дыбенко, 1  
e-mail: yvnik76@yandex.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Nikitin, Yevgeny V.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
The Black Sea Naval College  
named after P. S. Nakhimov  
1 Dybenko Str., Sevastopol, 1299028,  
Russian Federation  
e-mail: yvnik76@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 27 октября 2017 г.  
Received: October 27, 2017.*