

УДК 629.12:532

Е.В. Никитин, профессор, д-р техн. наук*Черноморское ВВМУ имени П.С. Нахимова,**ул. Дыбенко, 1А, Севастополь, 299028**E-mail: yvnik76@yandex.ru*

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДВУХЗВЕННЫХ СИСТЕМ ПОДВЕШИВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ГРУЗОВ С ЭЛАСТИЧНЫМИ СТРОПАМИ ВТОРИЧНОГО ПОДВЕСА

Оценена устойчивость двухзвенной системы подвешивания крупногабаритного груза при эластичных (растяжимых) стропах вторичного подвеса. Предложена методика расчета безопасной области расположения центра тяжести груза. Показано, что такая система подвешивания всегда менее устойчива, чем аналогичная система с нерастяжимыми стропами.

Ключевые слова: системы подвешивания груза, эластичные стропы, устойчивость.

Известно, что подъем судовыми кранами крупногабаритных и тяжелых грузов требует иногда сложной (многозвенной) системы их подвешивания. Многозвенные системы подвешивания обладают гораздо меньшей устойчивостью, чем, например, однозвенные, что может приводить к их опрокидыванию со всеми отрицательными последствиями, как для судна, так и для груза. В [1 – 3] подробно рассмотрены вопросы устойчивости двухзвенных систем подвешивания крупногабаритных и тяжелых грузов, которые используются при проведении грузовых операций на судах. При этом разработаны методики определения зон (треугольников безопасности) положения центра тяжести (ЦТ) груза, при котором система подвешивания статически устойчива. Эти методики учитывают особенности геометрии подвешивания, а также массу траверсы и груза. Однако, в работах [1 – 3] предполагалось, что стропы нерастяжимы, что на практике соответствует применению стальных тросов, эластичность которых незначительна.

Целью статьи является развитие методов оценки устойчивости двухзвенных систем подвешивания крупногабаритных и тяжелых грузов, определения размеров безопасной зоны нахождения ЦТ груза (треугольника безопасности) для эластичных строп, которые могут растягиваться под нагрузкой.

Рассмотрим двухзвенную систему подвешивания груза, у которой стропы вторичного подвеса AC, BD первоначально равны и параллельны друг к другу (рисунок 1). Пусть, при этом, стропы эластичны и способны удлиняться на величину δr , пропорционально нагрузке. Следуя подходу, предложенному в [1 – 3], определим размеры допустимой области положения ЦТ груза (треугольника безопасности) для эластичных строп вторичного подвеса.

Для этого поместим ЦТ груза в точку С – крайнюю точку платформы CD, что является предельно возможным положением для ЦТ груза при условии, что система подвешивания останется устойчивой – это обстоятельство подробно обсуждалось в предыдущих статьях [1 – 3] и не требует специальных пояснений.

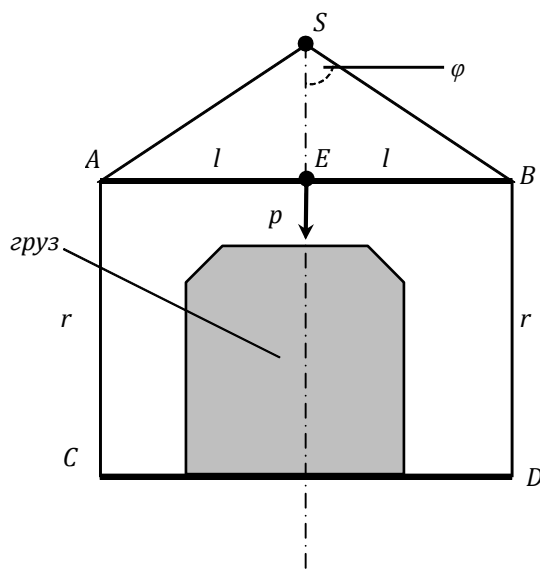


Рисунок 1 – Схема подвешивания груза

В результате система деформируется, но останется в устойчивом равновесии как показано на рисунке 2.

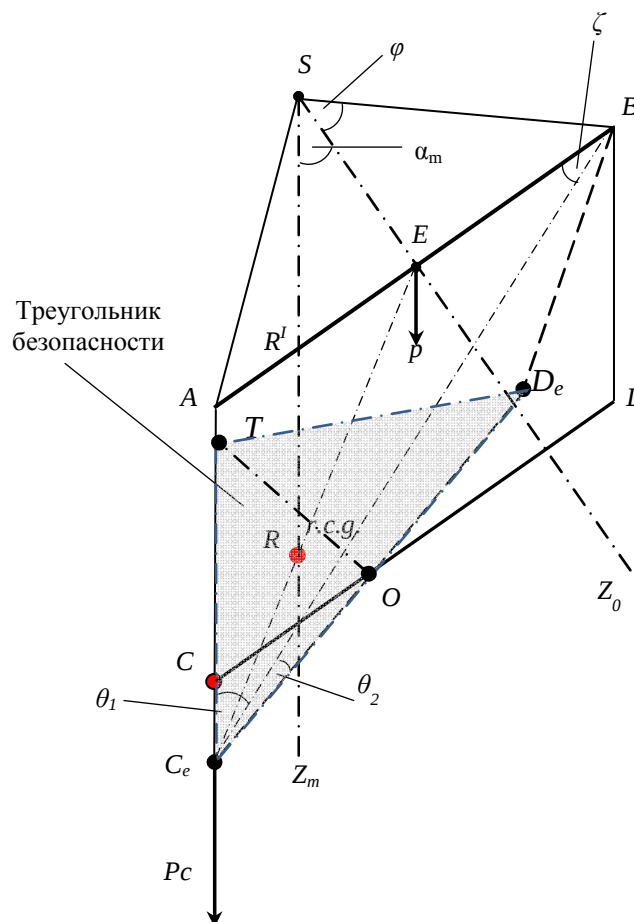


Рисунок 2 – Схема подвешивания с учетом деформаций строп

Первичный подвес (ABS) отклонится на угол α_m , а левая стропа AC, растянувшись на величину δr , превратится в AC_e , оставаясь в вертикальном положении (именно к ней приложена вся нагрузка от груза). Правая стропа BD останется равной исходной длине r . В результате вторичный подвес в положении равновесия превратится в неправильный четырехугольник, стороны которого AC_e и BD не равны друг другу.

Геометрически такая ситуация аналогична системе подвешивания на нерастяжимых стропах [2, 3], а именно случаю, когда нерастяжимые стропа вторичного подвеса не параллельны друг другу ($\gamma \neq 0$). Учитывая вышеизложенное, предельный угол отклонения первичного подвеса α_m определим согласно [3]:

$$\alpha_m = \arctg \left[\frac{tg\varphi}{1 + \frac{p}{P_c}} \right], \quad (1)$$

где φ – угол разведения строп первичного подвеса (см. рисунок 1); p – масса (вес) траверсы AB; P_c – масса (вес) груза.

Затем рассчитаем угол θ при основании *треугольника безопасности* C_eD_eT [1 – 3] как сумму углов θ_1 и θ_2 в треугольниках ABC_e и C_eBD_e (рисунок 2). Если в формуле (47) работы [3] вместо длины стропы $AC=r$ подставить $r+\delta r$, то получим формулу для расчета угла θ_1 и стороны C_eB треугольника ABC_e :

$$\theta_1 = \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_m}{2} + \arctg \left[\frac{2l - (r + \delta r)}{2l + r + \delta r} \ctg \left(\frac{\alpha_m}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right], \quad (2)$$

$$C_eB = \frac{2l \cos \alpha_m}{\sin \theta_1}. \quad (3)$$

Из треугольника C_eBD_e по теореме синусов находим:

$$\theta_2 = 2 \arctg \left(\frac{m_\theta}{F_\theta - r} \right), \quad (4)$$

где F_θ , m_θ – полупериметр и радиус вписанной окружности треугольника C_eBD_e , определяемые по формулам:

$$F_\theta = \frac{1}{2}(C_eB + CD + r), \quad (5)$$

$$m_\theta = \sqrt{\frac{(F_\theta - C_eB)(F_\theta - CD)(F_\theta - r)}{F_\theta}}. \quad (6)$$

Замечание. В формулах (5), (6) вместо C_eD_e стоит CD , так как $C_eD_e = CD$. Таким образом, угол θ в основании *треугольника безопасности* C_eD_eT [1 – 3] может быть найден по формуле:

$$\theta = \theta_1 + \theta_2. \quad (7)$$

Высота треугольника безопасности (рисунок 2) равна:

$$TO = \frac{CD}{2} \times \tg \theta = (l + r \sin \gamma) \times \tg \theta. \quad (8)$$

Пример. Пусть двухзвенная система подвешивания с параллельными стропами вторичного подвеса ($\gamma = 0$) имеет следующие геометрические и физические параметры: $\varphi = 42^\circ$, $AB = 2l = 8$ м, $v = 4,44$ м, $r = 7$ м, $p = 30$ т, $P_c = 160$ т. Здесь все исходные данные соответствуют примеру 1 из работы [3].

Однако, в отличие от приведенного в [3] примера 1, будем полагать, что стропы AC , BD растяжимы; при этом их относительное удлинение при заданной нагрузке $\varepsilon = \frac{\delta r}{r} = 0,025$ [4,5]. При таких условиях если всю нагрузку ($P_c = 160$ т) приложить к одной из строп (например, AC), то она удлинится на величину $\delta r = \varepsilon \times r = 0,025 \times 7 = 0,175$ м. Необходимо определить размеры треугольника безопасности для такой системы подвешивания и сравнить результаты с системой, когда стропы вторичного подвеса нерастяжимы (пример 1 работа [3]).

Решение. По формуле (1) вычислим предельный угол отклонения системы подвешивания при условии, что ЦТ груза помещен в точку C (равновесие показано на рисунке 2):

$$\alpha_m = \arctg \left[\frac{\tg \varphi}{1 + \frac{p}{P_c}} \right] = \arctg \left(\frac{\tg 42}{1 + \frac{30}{160}} \right) = 37,2^\circ.$$

По формулам (2) – (8) вычислим соответствующие углы θ_1 и θ_2 , а также высоту треугольника безопасности TO :

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_m}{2} + \arctg \left[\frac{2l - (r + \delta r)}{2l + r + \delta r} \ctg \left(\frac{\alpha_m}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right] = \\ &= 45 - \frac{37,2}{2} + \arctg \left[\frac{8 - (7 + 7 \times 0,025)}{8 + 7,175} \ctg \left(\frac{37,2}{2} + 45 \right) \right] = 27,95^\circ, \\ C_eB &= \frac{2l \cos \alpha_m}{\sin \theta_1} = \frac{8 \cos 37,2}{\sin 27,95} = 13,60 \text{ м}, \\ F_\theta &= \frac{1}{2}(C_eB + CD + r) = \frac{1}{2}(13,60 + 8 + 7) = 14,3 \text{ м}, \\ m_\theta &= \sqrt{\frac{(F_\theta - C_eB)(F_\theta - CD)(F_\theta - r)}{F_\theta}} = \sqrt{\frac{0,7 \times 6,3 \times 7,3}{14,3}} = 1,50 \text{ м}, \\ \theta_2 &= 2 \arctg \left(\frac{m_\theta}{F_\theta - r} \right) = 2 \arctg \left(\frac{1,5}{7,3} \right) = 23,23^\circ, \end{aligned}$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = 27,95 + 23,23 = 51,18^\circ,$$

$$TO = \frac{CD}{2} \times \tan \theta = (l + r \sin \gamma) \times \tan \theta = 4 \times \tan 51,18 = 4,97 \text{ м}.$$

Сравнение полученных результатов со случаем, когда стропы нерастяжимы показывает, что высота треугольника безопасности, а значит и его площадь уменьшились (в примере 1 работы [3] $TO = 5,273$ м). Это означает, что в случае использования растяжимых строп зона безопасного расположения ЦТ груза уменьшается, то есть устойчивость системы подвешивания снижается.

Заключение

1. Предложена методика расчета зоны безопасного положения центра тяжести крупногабаритного груза (размеров треугольника безопасности) относительно транспортировочной платформы CD для двухзвенной системы подвешивания с параллельными и деформируемыми стропами.

2. Показано, что при прочих равных условиях высота треугольника безопасности будет меньше, если стропы вторичного подвеса будут растяжимы. Двухзвенная система подвешивания с деформируемыми стропами обладает меньшим запасом устойчивости по сравнению с аналогичной системой с нерастяжимыми стропами.

Библиографический список использованной литературы

1. Никитин Е.В. Устойчивость равновесия двухзвенной системы подвешивания габаритного груза / Е.В. Никитин // Сборник научных трудов Академии ВМС им. П.С.Нахимова. — Севастополь, 2013. — Вып. 1 (13). — С. 184–191.
2. Никитин Е.В. Устойчивость сложных систем подвешивания корабельных грузов с непараллельными стропами вторичного подвеса / Е.В. Никитин // Сборник научных трудов Академии ВМС им. П.С.Нахимова. — Севастополь, 2013. — Вып. 4 (16). — С. 161–172.
3. 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.
4. 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
5. Kaps H. Stability of Cargo Suspension Arrangements // Transport Information Service (TIS).www.tis-gdv.de. 2013 — 26 p.

Поступила в редакцию 18.09.2014 г.

Никітін Є.В. Аналіз стійкості двохланкових систем підвішування великогабаритних вантажів з еластичними стропами вторинного підвісу

Проведено аналіз стійкості двохланкової системи підвішування великогабаритного вантажу при еластичних (розтяжних) стропах вторинного підвісу. Запропоновано також методика розрахунку безпечної області розташування центру тяжіння цього вантажу. Показано, що така система підвішування завжди менш стійка, ніж аналогічна система з нерозтяжними стропами.

Ключові слова: системи підвішування вантажу, еластичні стропи, стійкість.

Nikitin Y.V. Stability analysis of two-chain suspension arrangement with elastic secondary sling for large scale cargo operations

Stability analysis of two-chain suspension arrangement with elastic secondary sling for large scale cargo operations has been performed. The analytical approach for determining of the safe position of the centre of gravity of this cargo has been developed. It has also been shown that the stability of such an arrangement is always worse than the analogous arrangement with inelastic (inextensible) slings.

Keywords: suspension arrangement of a cargo, stability, elastic slings.