

## Расчёт несимметричной тросовой вращающейся космической системы

Научный руководитель – Лебедев Владимир Валентинович

*Екимовская Анна Алексеевна*

*Абитуриент*

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

*E-mail: anu\_ekimovskaya03@mail.ru*

Статья написана в результате непрерывно продолжающейся работы по исследованию тросовых вращающихся космических систем [1,2]. Сначала были изучены симметричные системы [3,4]. Новизна этого этапа работы заключается в решении задачи о силе натяжения трёх тросов в произвольной, обобщённой космической тросовой вращающейся системе с тремя грузами. Треугольник может быть произвольным, ограничений на массы трёх грузов и скорость их вращения не накладывается. Задача решена методами механики и векторной геометрии. Алгоритм решения реализован не только в виде расчётных формул, но и в программе для табличного редактора Microsoft Excel. Выполнены два проектных проверочных расчёта конкретных систем.

На рис.1 показана схема произвольной вращающейся треугольной тросовой системы с обозначениями её характеристик. В результате решения задачи требуется получить три значения сил натяжения трёх соединительных тросов во вращающейся системе.

Исследование содержит в себе несколько частных задач, соответствующих пунктам решения. Исходными данными являются массы и координаты грузов. Последовательно нужно выполнить следующие действия.

1. Определение координат центра масс системы из трёх грузов.
2. Определение радиусов вращения каждого из трёх грузов.
3. Определение центростремительного ускорения каждого из трёх грузов.
4. Определение шести углов, обозначенных на расчётной схеме.
5. Составление системы уравнения движения трёх связанных грузов.
6. Решение системы уравнений удобно выполнить методом Крамера.

Результатом решения системы являются три значения сил натяжения трёх соединительных тросов во вращающейся системе.

Формулы для расчёта сил натяжения соединительных тросов получаются громоздкими. Ручной счёт занимает много времени. Именно поэтому такая задача не предлагается в школе и даже на первом курсе ВУЗа. Однако даже с помощью знаний программы 9-го класса по математике и информатике можно выполнить не только расчёты по формулам, но ещё автоматизировать процесс вычислений. Очень просто применить для вычислений табличный редактор Microsoft Excel [5]. Расчёт сил натяжения тросов выполняется строго по пунктам предыдущего параграфа по разработанной методике. Исходные данные, промежуточные результаты и конечные значения сил натяжения трёх тросов расчётов записываются в отведённые ячейки таблицы.

Для проверки правильности составления программы был проведён отладочный расчёт с известными заранее результатами по уже изученной схеме в виде правильного треугольника. Отладочный расчёт доказал правильность составления алгоритма и программы, потому что результаты совпали с уже известным решением задачи. Например, в симметричной системе силы натяжения всех трёх тросов будут одинаковыми. Так оно и получилось. Таким образом, алгоритм и программа составлены правильно.

Главное назначение разработанной методики и программы заключается в быстром решении задачи о силе натяжения трёх тросов в произвольной треугольной вращающейся системе. Если для ручных расчётов с помощью калькулятора потребуется два-три часа, не менее, то с помощью предлагаемой программы результат получается мгновенно.

Для доказательства практической значимости разработанной методики и программы было выполнено проектирование двух вариантов космических тросовых вращающихся систем.

В качестве исходных данных была принята общая масса космической системы 21 тонна без массы тросов. Такая масса обусловлена возможностями выведения на низкую околоземную орбиту полезной нагрузки 23,1 т с помощью тяжёлой ракеты-носителя «Протон». Если выведенную на орбиту полезную нагрузку распределить по трём одинаковым отсекам, то получатся космические аппараты массой по 7 т, то есть сопоставимые с массой 7,22 т космического корабля «Союз». Если эти три отсека соединить попарно тросами длиной по 1000 м в виде правильного треугольника, то для обеспечения перегрузки 1, то есть для получения центростремительного ускорения, равного земной величине  $9,81 \text{ м/с}^2$ , понадобится закрутить тросовую систему с угловой скоростью 7,47 градуса/с. Период обращения тросовой системы будет равен 48 с. При таких исходных данных силы натяжения каждого из трёх тросов, рассчитанные по предлагаемой программе, будут равны 39647 Н, то есть приблизительно 40000 Н, или, в устаревшей технической системе единиц измерения, 4 тС (тонна-сила). Для справки: такую нагрузку спокойно выдерживает трос диаметром 8 мм из кевлара или обычный стальной трос такого же диаметра.

Другой вариант построения вращающейся тросовой системы предполагает один базовый космический корабль массой 15 т и два одинаковых небольших отсека массой по 3 т, типа спускаемого отсека корабля «Союз» с массой 2,9 т. В такой конфигурации при той же угловой скорости вращения системы центростремительное ускорение в большом отсеке будет равно  $4,2 \text{ м/с}^2$ , а в двух малых отсеках  $13,5 \text{ м/с}^2$ . Усилия в тросах, связывающих малые отсеки с большим немного уменьшатся, станет равным 36411 Н (3,65 тС). Но при этом значительно, приблизительно в 5 раз уменьшится сила натяжения троса, связывающего два малых отсека, став равной 7283 Н (0,73 тС).

На рис.2. схематично показаны эти два варианта тросовых систем.

Следовательно, появились большие возможности для оптимизации вращающейся тросовой космической системы, состоящей даже из трёх отсеков

### Источники и литература

- 1) Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Урлич Ю.М. Глобальные проблемы человечества и космос. – М.: «Изд. МАКД», 2010. – 570 с.
- 2) Осипов В.Г., Шошунов Н.Л. Космические тросовые системы: история и перспективы / Земля и Вселенная. Космонавтика. – Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П.Королёва. - №4, 1998.
- 3) Екимовская Анна. Вращающиеся тросовые космические системы. – Август, 2020. - Электронный ресурс, видеоролик (7:29): [https://youtu.be/DZI0r\\_NWbsk](https://youtu.be/DZI0r_NWbsk)
- 4) Екимовская А.А. 10 класс. Механика космических тросовых вращающихся систем. Секция: Физика. X Международный конкурс научно-исследовательских и творческих работ учащихся. - Москва: Российская академия естествознания (РАЕ), август, 2019 г. - Электронный ресурс: <https://files.school-science.ru/pdf/10/5f3d29c48c57f.pdf>
- 5) Екимовская А.А. 9-й класс, МАОУ "Центр образования №32" города Череповца Вологодской области. Применение табличного редактора Microsoft Excel для решения

задачи о космической тросовой вращающейся системе / Научно-методическое издание: Материалы XXXI конференции "Современные информационные технологии в образовании". Ред. группа: Алексеев М.Ю. и др. - Фонд новых технологий в образовании "БАЙТИК", ИТО-Троицк-Москва, 2-3 июля 2020. - 572 с. - ISBN 978-5-89513-468-9. - С.507-511.- Эл. ресурс: <https://lk-ito.bytic.ru/uploads/files/materials.pdf>

Иллюстрации

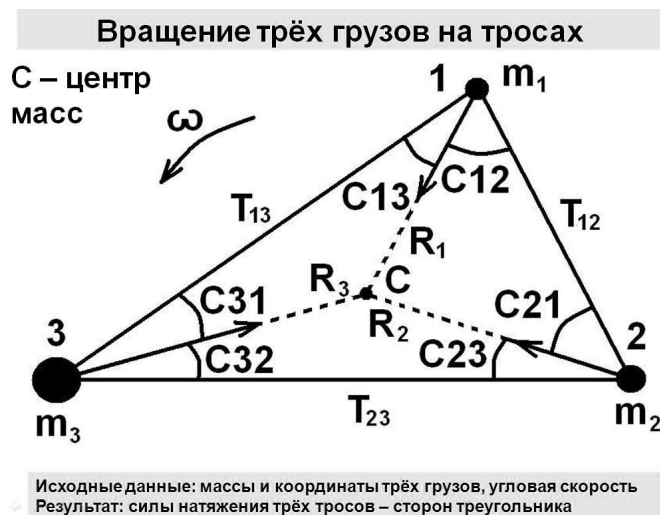


Рис. 1. Расчётная схема для вращающейся несимметричной треугольной тросовой системы

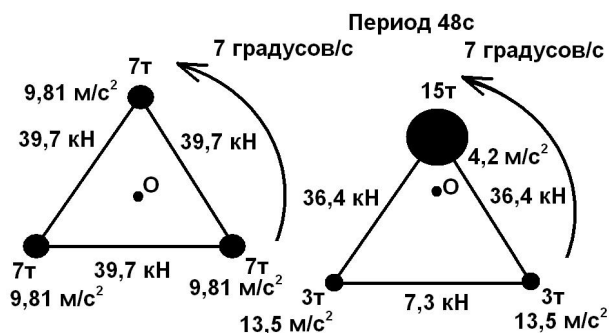


Рис. 2. Два примера расчёта вращающихся тросовых систем