
Задача оптимального размещения грузов на борту транспортного грузового корабля

А.С. Погорелов¹, А.Н. Панфилов², Д.А. Андреев¹

¹Донской филиал Центра тренажёростроения, Новочеркасск

²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск

Аннотация: В работе описывается основная задача транспортного грузового корабля, которая заключается в доставке на борт орбитальной станции полезного груза. Приводятся основные ограничения процесса загрузки доставляемых грузов в грузовой отсек корабля, важнейшим из которых является ограничение по центру масс корабля. Отмечается, что в результате разбалансировки корабля после укладки груза необходимо проводить повторную переукладку до тех пор, пока не будет соблюдено ограничение по центру масс. Поэтому вполне закономерно возникает задача априорного определения оптимального варианта расположения грузов, решение которой позволит значительно сократить трудоёмкость и продолжительность процесса подготовки транспортного грузового корабля.

Ключевые слова: транспортный грузовой корабль, грузовой отсек, размещение груза, масса, объём, центр масс, последовательность разгрузки, способ размещения, контейнер, оптимальное размещение.

Транспортный грузовой корабль (ТГК) – это беспилотный космический аппарат, который предназначен для решения следующих задач [1]:

- доставка на орбитальную станцию «сухих» грузов, компонентов топлива, запасов воды и газа;
- выполнение динамических операций в составе станции с использованием двигателей корабля и доставленного топлива;
- эвакуация отходов со станции;
- проведение экспериментов в автономном полёте и в составе станции;
- возвращение научного оборудования в возвращаемой баллистической капсуле.

Основной задачей ТГК является доставка на борт орбитальной станции полезного груза, в состав которого входит оборудование для проведения экспериментов, продукты питания, личные вещи космонавтов и др. Для

размещения на ТК доставляемых грузов и научной аппаратуры предназначен грузовой отсек (ГрО), расположенный в верхней части корабля. Укладка полезного груза в ГрО производится специалистами на Земле, при этом существуют определённые правила, ограничения и технология процесса загрузки.

К основным ограничениям процесса загрузки доставляемых грузов в ГрО относятся:

- 1) Ограничение по массе грузов.
- 2) Ограничение по объёму грузов.
- 3) Ограничение по центру масс корабля.
- 4) Ограничение на последовательность разгрузки корабля на МКС.

Суммарная масса доставляемых на станцию грузов должна быть ограничена значениями, представленными в таблице №1 (для ТК «Прогресс М» и «Прогресс М1»).

Таблица №1

Ограничения по массе доставляемых грузов

Состав доставляемого груза	«Прогресс М»	«Прогресс М1»
«Сухие» грузы в ГрО	до 1800 кг	до 1800 кг
Топливо в системе дозаправки	до 870 кг	до 1740 кг
Топливо из баков комбинированной двигательной установки	до 250 кг	до 250 кг
Вода в баках «Родника»	до 420 кг	—
Газ для обитаемых отсеков	до 50 кг	до 40 кг

Размещение «сухих» грузов на корабле ограничено объёмом ГрО, равным 7 м³. Корпус отсека состоит из трёх основных оболочек:

- нижней полусферы;
- цилиндрической проставки;
- верхней полусферы.

В ТК №411 используется три способа размещения оборудования [2]:

- 1) Болтовой (используется для крепления, как правило, оборудования тяжелее 10 кг.).
- 2) В контейнерах.
- 3) Привязка лентой по месту.

Контейнеры предназначены для размещения в них мелких грузов и расположены в ГрО в соответствии со схемой, изображённой на рис. 1.

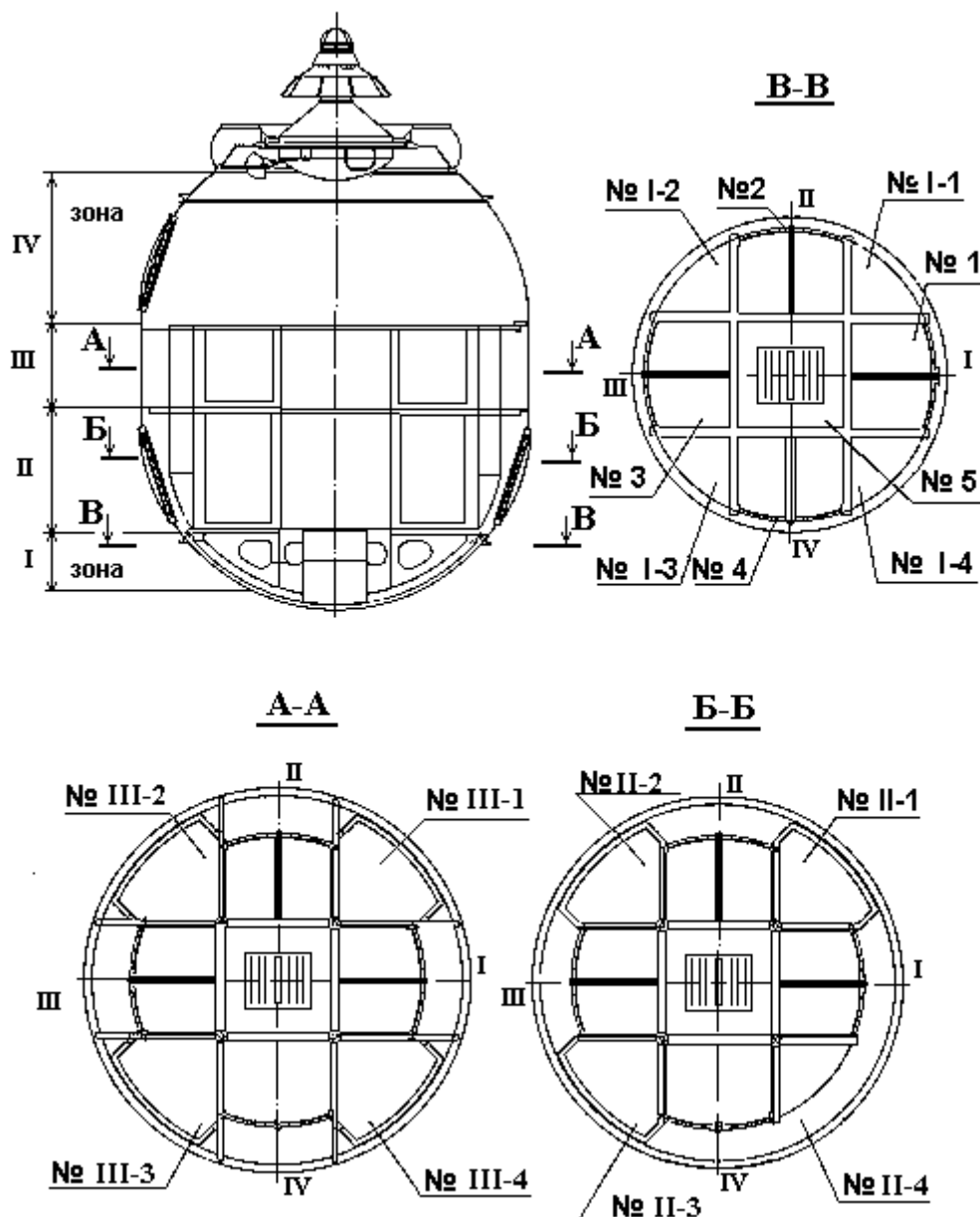


Рис. 1. — Схема размещения контейнеров на ТК №411

Как видно из рис. 1, весь объём ГрО разделён на 4 зоны. В зонах I, II и III располагаются по 4 контейнера.

Мелкие грузы складываются в контейнеры, а крупные — в остальном свободном пространстве ГрО.

Важнейшим ограничением по укладке доставляемых грузов на ТКК является ограничение по центру масс корабля. После загрузки допустимое отклонение центра масс корабля от базовой продольной оси X не должно превышать 20 мм.

В таблице №2 приведены значения положения центра масс по оси X, массовых и инерционных характеристик корабля «Прогресс М» на различных этапах подготовки.

Таблица №2

Массовые и инерционные характеристики корабля «Прогресс М»

Наименование	Корабль при транспортировке с завода	Корабль «сухой»	Корабль заправленный и загруженный
Масса, кг	3730±100	3935±100	7290
Координата $X_{ЦМ}$, м	-2,97±0,05	-2,82±0,05	-3,205
Центральные моменты инерции, кгм ³ :			
– I_{XX}	2350±10%	2510±10%	3370±10%
– I_{YY}	16840±10%	18470±10%	22010±10%
– I_{ZZ}	16860±10%	18280±10%	22090±10%

Ограничение на последовательность разгрузки корабля на МКС подразумевает то, что после стыковки ТКК к МКС в первую очередь выгружаются срочные грузы, запланированные к первоочередной разгрузке. Остальные грузы разгружаются в соответствии с планом работ. Таким образом, срочные грузы должны быть расположены в ГрО так, чтобы их возможно было разгрузить в первую очередь.

После загрузки ГрО корабля производится контрольная балансировка и взвешивание, по результатам которой принимается решение о необходимости повторной укладки грузов. Повторная укладка должна быть проведена, если в результате контрольного взвешивания будет установлено превышение допустимого отклонения центра масс корабля от установленного значения. Таким образом, в процессе подготовки ТК к старту может производиться не одна процедура переукладки грузов, что значительно повышает трудоёмкость и продолжительность процесса подготовки корабля. Поэтому вполне закономерно возникает задача априорного определения оптимального варианта расположения грузов в ГрО. Эта задача, будучи решаемой непосредственно перед началом, а также в процессе процедуры укладки груза в отсек, позволит выдавать специалистам, осуществляющим укладку, рекомендации по оптимальному размещению груза. Окончательное решение по укладке принимается специалистами.

Задача оптимального размещения грузов является актуальной в различных предметных областях и активно обсуждается в научном сообществе. Значительный вклад в фундаментальные исследования данной проблемы внёс Н. Duchhoff, описав достаточно полную комплексную типологию задач раскроя и упаковки [3], а G. Wascher улучшил её [4]. Большой практический интерес представляют исследования таких авторов, как В.В. Псиола [5], А.П. Нырков и С.С. Соколов [6], А.А. Коваленко [7], В.В. Остапенко [8]. Также к исследованиям по данной проблеме можно отнести работы [9, 10].

Основными требованиями к задаче поиска оптимального размещения грузов в ГрО могут являться:

- Соблюдение всех основных ограничений процесса загрузки доставляемых грузов в ГрО;

- Принимаемые допущения к форме и параметрам грузов должны обеспечивать погрешность вычислений, не превышающую допустимые отклонения расчётных значений;
- Поиск оптимального варианта размещения оставшихся грузов в ГрО должен осуществляться на любом этапе процесса укладки, с учётом уже расположенного в отсеке груза.

Решение задачи поиска оптимального расположения груза в ГрО позволит значительно сократить трудоёмкость и продолжительность процесса подготовки ТКК.

Литература

1. Корабль транспортный грузовой для обслуживания орбитальных станций. Основные технические характеристики, конструкция и компоновка, массовая сводка. ОАО РКК “Энергия” им. С.П. Королева, 2004. 49 с.
2. Транспортный корабль грузовой. Разгрузочно-погрузочные работы. ТКК.411. 2011. 62 с.
3. H. Dyckhoff A typology of cutting and packing problems // European Journal of Operational Research. 1990. №44. pp. 145-159.
4. G. Wascher, H. Haußner, H. Schumann An improved typology of cutting and packing problems // European Journal of Operational Research. 2007. №183. pp. 1109-1130.
5. Псиола В.В. Оценки качества работы алгоритма Packer3D // Москва: 2009. С. 1-35.
6. Соколов С. Математическая модель рационального размещения груза в трюмах судна // Журнал университета водных коммуникаций. - №3. С. 89-92.
7. Коваленко А., Панкратов А., Романова Т. Размещение объектов в контейнере параболической формы с круговыми стеллажами с учётом

ограничений поведения // Журнал вычислительной и прикладной математики. 2013. №2. С. 23-32.

8. Остапенко В., Соболенко Л., Прохорович И. Метод обратно-выпуклого программирования и оптимальная упаковка грузов // Системные исследования и информационные технологии. 2004. №2. С. 95-103.

9. Кузнецова А.В., Мохов В.А., Туровская Е.В. Моделирование процесса оптимального размещения товаров на складе самообслуживания на основе эволюционных алгоритмов поиска. // Инженерный вестник Дона, 2014, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2276.

10. Ягудин Р.Р. Оптимизация компоновки трехмерных геометрических объектов на основе графа вектор-функции плотного размещения. // Инженерный вестник Дона, 2012, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/921.

References

1. Korabl' transportnyy gruzovoy dlya obsluzhivaniya orbital'nykh stantsiy. Osnovnye tekhnicheskie kharakteristiki, konstruktsiya i komponovka, massovaya svodka. [Ship transport cargo to service space stations. The main technical characteristics, design, and layout, mass summary]. OAO RKK "Energiya" im. S.P. Koroleva, 2004. 49 p.

2. Transportnyy korabl' gruzovoy. Razgruzochno-pogruzochnye raboty. [Transport ship cargo. Unloading and loading operations]. TGK.411. 2011. 62 p.

3. H. Dyckhoff European Journal of Operational Research. 1990. №44. pp. 145-159.

4. G. Wascher, H. Haußner, H. Schumann European Journal of Operational Research. 2007. №183. pp. 1109-1130.

5. Psiola V.V. Otsenki kachestva raboty algoritma Packer3D Moskva: 2009. pp. 1-35.



6. Sokolov S. Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy. - №3. pp. 89-92.
7. Kovalenko A., Pankratov A., Romanova T. Zhurnal vychislitel'noy i prikladnoy matematiki. 2013. №2. pp. 23-32.
8. Ostapenko V., Sobolenko L., Prokhorovich I. Sistemnye issledovaniya i informatsionnye tekhnologii. 2004. №2. pp. 95-103.
9. Kuznetsova A.V., Mokhov V.A., Turovskaya E.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2276.
10. Yagudin R.R. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/921.