

Физика и материаловедение

УДК 629.7

Беляков Андрей АлексеевичИнститут ракетно-космической техники Самарского университета
г. Самара, Россия*E-mail:* shulepov-al@mail.ru**Belyakov Andrey Alekseevich**Institute of Rocket and Space Technology of Samara University
Samara, Russia*E-mail:* shulepov-al@mail.ru**Шулепов Александр Иванович**Институт ракетно-космической техники Самарского университета
г. Самара, Россия*E-mail:* shulepov-al@mail.ru**Shulepov Alexander Ivanovich**Institute of Rocket and Space Technology of Samara University
Samara, Russia*E-mail:* shulepov-al@mail.ru**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАЗМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ В ОТСЕКАХ
ТРАНСПОРТНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА****DEVELOPMENT OF ALGORITHM OF LOAD DISTRIBUTION IN CARGO MODULES
OF SPACE TRANSPORTATION VEHICLE**

Аннотация. В статье приводится описание решения проблемы поиска плотной компоновки грузов с соблюдением массово-центровочных требований, предъявляемых к отсеку. Предлагается алгоритм, который автоматизирует процесс размещения грузов и позволяет прогнозировать отклонение необходимого положения центра масс.

Abstract. In article the description of close cargo composition with module weight-and-dimensional characteristics search problem solution is given. The algorithm that computerizes load distribution process and provides required cog predicting is offered.

Ключевые слова: размещение грузов, зона размещения, центр масс, оси, координаты расположения, плотность упаковки, условия непересечения, радиус.

Key words: load distribution, cargo space, center of mass, cog, axes, coordinates, density packaging, non-intersecting criterions, radius.

DOI: 10/22250/jasu.4

Введение

Под размещением грузов понимают совокупность геометрических тел (объектов), пространственное положение которых зафиксировано относительно общей системы координат и удовлетворяет заданным требованиям. В настоящей работе определение процесса размещения подразумевает наличие оболочки, внутри которой размещают бортовое оборудование, контейнеры различного

назначения (с продуктами, топливом) и т.д. Данные объекты необходимо разместить внутри грузового отсека с учетом минимальных трудозатрат, связанных с выполнением работы. Решение задачи должно наилучшим образом отвечать функциональному назначению транспортного космического аппарата при погрузке объектов и последующей разгрузке.

В узкой постановке задача размещения грузов в отсеках заключается в размещении заданного набора оборудования, агрегатов, контейнеров внутри заранее выбранной оболочки. При этом функциональное назначение отсека в составе транспортного грузового космического аппарата (ТГКА) определено рядом заранее обусловленных требований. В такой постановке задача легче поддается формализации и для ее решения могут быть использованы методы алгоритмизации и цифрового проектирования.

Следовательно, задача размещения грузов в отсеках грузового космического аппарата заключается в определении координат внутри отсека и порядке размещения грузов, удовлетворяющих заданным требованиям [1].

Основные допущения

Поскольку решением проблемы центровки ТГКА при доставке грузов является поиск оптимального размещения геометрических объектов в отсеке, то сама задача оптимизации сводится к разработке алгоритма погрузки и разгрузки в соответствии с компоновочными, функциональными и монтажными требованиями, предъявляемыми к отсеку и размещаемым в нем грузам. Следовательно, разработка такого алгоритма предполагает создание методики, имеющей ряд адекватных допущений и подчиняющейся совокупности заданных условных нормативов, по которым она реализуется.

Для поиска оптимумов целевых функций размещения уже предложен ряд идей, направленных на решение задач конкретного класса, – например: задач раскроя и упаковки, размещения во множестве однородных или неоднородных контейнеров, размещения в одном контейнере [2]. Для формализации этих идей используются различные алгоритмы, которые решают задачу в трехмерном пространстве или сводят ее на плоскость: генетические, бионические, нейронные, эвристические, топологические, ρ функции Стояна [3-5]. Тем не менее, до сих пор не существует унифицированных алгоритмов, способных покрывать все возможные вариации системы «отсеки+грузы» и адаптироваться под условия конкретной поставленной задачи какого-то класса, определяя релевантный метод поиска.

В данном же случае методика проектирования алгоритма размещения грузов в грузовых отсеках ТГКА допускает следующие гипотезы:

- 1) зоны размещения и грузы описываются поверхностями не выше второго порядка;
- 2) размещенные грузы в отсеке закреплены жестко;
- 3) отсек разделен зонами размещения на несколько уровней;
- 4) максимальная допустимая высота грузов определяется размерами грузового люка и расстоянием между зонами размещения;
- 5) последовательность погрузки по массе может быть любой, удовлетворяющей требованиям массово-компоновочных характеристик грузового отсека;
- 6) порядок загрузки может определяться различными требованиями: массово-компоновочными, геометрическими, экономическими. Как правило, грузы, входящие в категорию «сухой груз», имеют приоритет размещения, который варьирует от 1 (самый важный) до 8 (минимальный). При этом грузы с большим приоритетом могут вытеснять грузы с меньшим приоритетом [6];
- 7) порядок загрузки определяется предварительно;
- 8) последовательность разгрузки идет в порядке, обратном процессу погрузки;
- 9) геометрия грузов учитывается вместе с геометрией крепежа.

Таким образом, задача размещения сводится к двумерному случаю компоновки грузов на плоскости зоны размещения в виде прямоугольника или круга, в то время как сами грузы имеют сфе-

рическую или цилиндрическую форму и обладают круговыми проекциями на данную плоскость. Кроме того, грузы могут иметь форму многогранников – в таком случае, чтобы алгоритм реализовался, их стоит описать цилиндром или сферой, что даст менее точное, но все же пригодное размещение.

Алгоритм размещения грузов

Требования к центру масс конструкции

Положение центра масс отсека определяется заданной степенью статической устойчивости грузовика и зависит от размещения грузов в отсеке следующим образом [1]:

$$Y_{Ц}(U) = \frac{\sum_{i=0}^n m_i U_i}{\sum_{i=0}^n m_i}, \quad (1)$$

где $Y_{Ц}$ – вектор центра масс отсека; i – порядковый номер размещаемого груза; n – общее число таких грузов; U_i – вектор центра масс размещаемого груза; m_i – масса размещаемого i -го груза.

Ограничения на положение центра масс задаются в виде:

$$|F(Y_{Ц} - Y_C)| - \delta_{Ц} \leq 0, \quad (2)$$

где Y_C – вектор потребного положения центра масс отсека; $F(Y_{Ц} - Y_C)$ – функция, определяющая допустимое отклонение центра масс; $\delta_{Ц}$ – величина допустимого отклонения.

Вектор потребного положения центра масс отсека отыскивается по формуле:

$$Y_C(U) = \frac{\sum_{i=0}^s m_i U_i}{\sum_{i=0}^s m_i}, \quad (3)$$

где s – число размещенных грузов в зоне размещения внутри отсека.

После загрузки допустимое отклонение центра масс корабля не должно превышать 20 мм [7].

Разметка зоны размещения

Для реализации алгоритма требуется задание граничного расстояния z между плоскостями размещения и разметка рабочей плоскости размещения xOy местными ортогональными x_0, y_0 и полу-диагональными $D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$ координатными осями (рис. 1), которые вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{x}{2}; \\ y_0 &= \frac{y}{2}; \\ D_{11} &= \sqrt{(-x_0)^2 + (-y_0)^2}; \\ D_{12} &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}; \\ D_{21} &= \sqrt{(-x_0)^2 + (y-y_0)^2}; \\ D_{22} &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (-y_0)^2}; \\ \theta &= \arctg \frac{y}{x}, \end{aligned} \quad (4)$$

где x – поперечный размер плоскости размещения; y – продольный размер плоскости размещения.

Оптимально положением стартового, центрального груза с массой m_0 и радиусом R_0 является середина зоны размещения с координатами $(x_0; y_0)$.

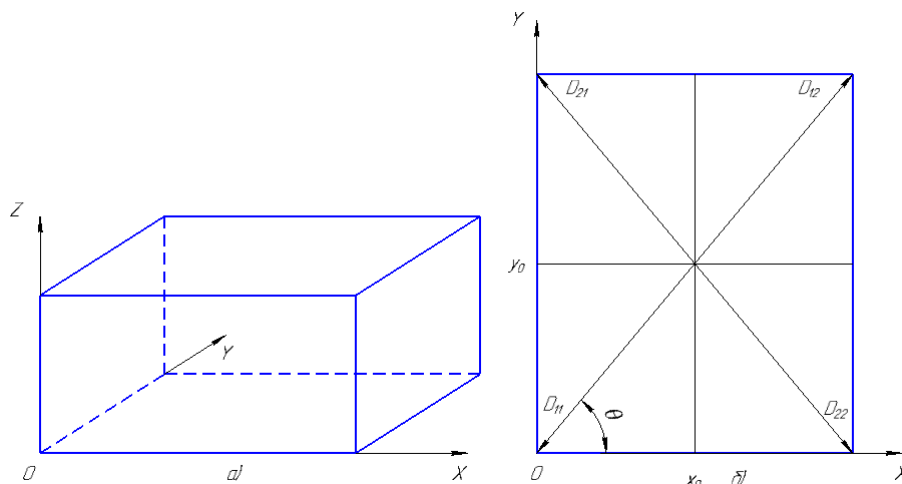


Рис. 1. Расчетная схема: а) зона размещения в отсеке; б) плоскость основания зоны.

Груз с массой m_1 и радиусом R_1 размещается обязательно под центральным грузом. Его координаты:

$$x_1 = x_0; y_1 = y_0 - (R_0 + R_1). \quad (5)$$

По результату такой балансировки центр масс конструкции сместится вдоль местной ортогональной координатной оси y_0 отсека.

Размещение грузов первой очереди

Размещение грузов первой очереди происходит только на местной ортогональной оси y_0 с одной или другой стороны от центра зоны размещения – так, чтобы функция допустимого отклонения центра масс $F(Y_{Ц} - Y_C)$ стремилась к нулю. Данный принцип используется и на последующих этапах размещения.

Цикл работает до тех пор, пока выполняются условия непересечения грузов со стенками отсека:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| y - \left(y_0 + R_0 + 2 \sum_{k=2}^K R_k \right) \right| \geq 2R_i \\ \left| y_0 - \left(R_0 + 2R_1 + 2 \sum_{j=k+1}^J R_j \right) \right| \geq 2R_i \end{array} \right. , \quad (6)$$

где j – грузы на отрезке $[0; y_0]$ партии J ; k – грузы на отрезке $[y_0; y]$ партии K ; R – радиусы грузов.

Принадлежность к партии J или K , а также координаты расположения грузов определяются системой:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_j = x_k = x_0 \\ y_k = y_0 + \left(R_0 + 2 \sum_{k=2}^K R_{k-1} + R_K \right), \text{ если } y_{Ci} \leq y_0 \\ y_j = y_0 - \left(R_0 + 2R_1 + 2 \sum_{j=2}^J R_{j-1} + R_J \right), \text{ если } y_{Ci} > y_0 \end{array} \right. , \quad (7)$$

где y_{Ci} – продольная координата расположения центра масс на местной ортогональной оси y_0 после i -го размещения j -го или k -го груза.

В системе (7) на каждой итерации цикла размещения высчитывается вектор требуемого положения центра масс отсека Y_C , по оценке координат которого определяется выбор партии размеще-

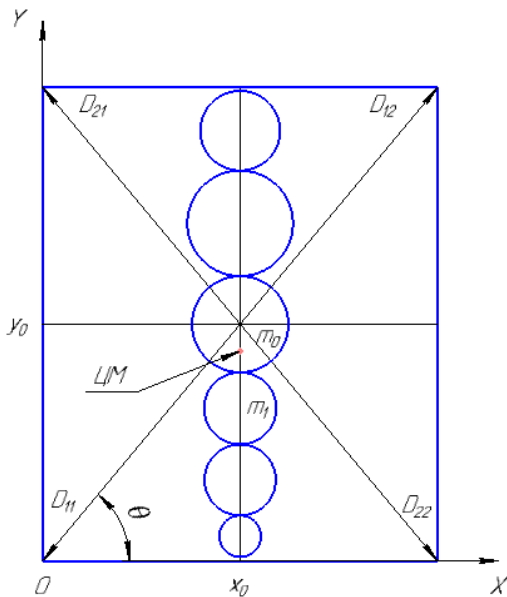


Рис. 2. Компоновка грузов первой очереди размещения.

ния для груза на следующем шаге. Когда условия (6) перестают выполняться, рассчитывается конечный вектор Y_C и цикл размещения грузов первой очереди завершается. Получается компоновка грузов, представленная на рис. 2.

Размещение грузов второй очереди

Грузы второй очереди размещаются на полудиagonalных осях $D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$, причем координаты (x_d, y_d) направляющего груза с массой m_d и радиусом R_d определяются из потребного положения центра масс относительно центра масс отсека при условии непересечения грузов:

$$\sqrt{(x_d - x_i)^2 + (y_d - y_i)^2} > R_d + R_i. \tag{8}$$

Отыскивается направляющая координата:

$$x_d = \begin{cases} D_{11} - (R_0 + R_d), & \text{если } y_{Ci} \geq y_0 \\ D_{11} + (R_0 + R_d), & \text{если } y_{Ci} < y_0 \end{cases} \tag{9}$$

Затем, если условие (8) выполняется, по ней нахо-

дится положение груза:

$$\begin{cases} x_d = \bar{x}_d \cos \theta \\ y_d = \bar{x}_d \sin \theta \end{cases} \tag{10}$$

Если условие (8) не выполняется, тогда:

$$\begin{cases} x_d = \begin{cases} 2\bar{x}_d \cos \theta - \left[x_i + y_i \operatorname{tg} \theta + \sqrt{(x_i + y_i \operatorname{tg} \theta)^2 - (1 + \operatorname{tg}^2 \theta)(x_i^2 + y_i^2 - (R_d + R_i)^2)} \right] \cos^2 \theta \\ \left[x_i + y_i \operatorname{tg} \theta + \sqrt{(x_i + y_i \operatorname{tg} \theta)^2 - (1 + \operatorname{tg}^2 \theta)(x_i^2 + y_i^2 - (R_d + R_i)^2)} \right] \cos^2 \theta \end{cases} \\ y_d = \begin{cases} 2\bar{x}_d \sin \theta - \frac{1}{2} \left[x_i + y_i \operatorname{tg} \theta + \sqrt{(x_i + y_i \operatorname{tg} \theta)^2 - (1 + \operatorname{tg}^2 \theta)(x_i^2 + y_i^2 - (R_d + R_i)^2)} \right] \sin 2\theta \\ \frac{1}{2} \left[x_i + y_i \operatorname{tg} \theta + \sqrt{(x_i + y_i \operatorname{tg} \theta)^2 - (1 + \operatorname{tg}^2 \theta)(x_i^2 + y_i^2 - (R_d + R_i)^2)} \right] \sin 2\theta \end{cases} \end{cases}$$

Первые строчки найденных координат подчиняются условию $y_{Ci} \geq y_0$, а нижние – условию $y_{Ci} < y_0$ в данной системе. Они получаются решением системы нелинейных уравнений относительно x_d, y_d :

$$\begin{cases} y_d = x_d \operatorname{tg} \theta \\ (x_d - x_i)^2 + (y_d - y_i)^2 = (R_d + R_i)^2. \end{cases}$$

Проще всего решение найти, выразив одну переменную через другую.

Графическое пояснение приведено на рис. 3.

Затем происходит оценка непересечения груза с отсеком:

$$U_d^T \geq R_d [E]. \tag{11}$$

Если условия не выполняются, то начинается проверка следующего груза.

После этого пересчитывается вектор потребного положения центра масс отсека Y_C и происходит уравновешивающее размещение грузов последовательно на осях D_{11}, D_{12} и D_{21}, D_{22} , пока выполняется система условий непересечения грузов на полудиagonalных осях со стенками отсека:

$$[D] - (R_0[E] + 2[\Sigma]) \geq 2([R_d] + R_i[E]), \tag{12}$$

где

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} \\ D_{12} \\ D_{21} \\ D_{22} \end{bmatrix}, [\Sigma] = \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^L R_l \\ \sum_{p=1}^P R_p \\ \sum_{m=1}^M R_m \\ \sum_{q=1}^Q R_q \end{bmatrix}, [R_d] = \begin{bmatrix} R_d \\ R_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, [E] - \text{единичная матрица.}$$

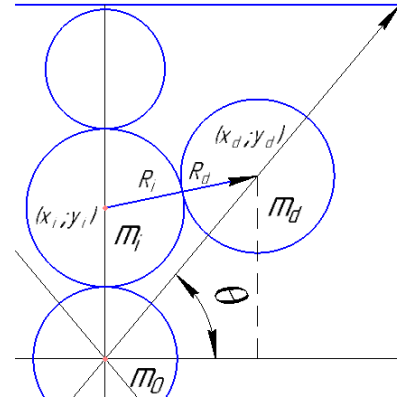


Рис. 3. Пояснение к поиску координат направляющего груза.

Здесь L, M, P, Q – партии грузов с соответствующими радиусами.

В зависимости от положения вектора Y_C направляющая координата \bar{x} будет отличаться:

$$\begin{cases} \bar{x}_l = D_{11} - \left(\sqrt{\left(x_{l-1} - \frac{x}{2}\right)^2 + \left(y_{l-1} - \frac{y}{2}\right)^2} + R_{l-1} + R_l \right), & \text{если } x_{Ci} \geq x_0 \text{ и } y_{Ci} \geq y_0 \\ \bar{x}_m = D_{21} - \left(\sqrt{\left(x_{m-1} - \frac{x}{2}\right)^2 + \left(y_{m-1} - \frac{y}{2}\right)^2} + R_{m-1} + R_m \right), & \text{если } x_{Ci} > x_0 \text{ и } y_{Ci} < y_0 \\ \bar{x}_p = D_{11} + \left(\sqrt{\left(x_{p-1} - \frac{x}{2}\right)^2 + \left(y_{p-1} - \frac{y}{2}\right)^2} + R_{p-1} + R_p \right), & \text{если } x_{Ci} \leq x_0 \text{ и } y_{Ci} \leq y_0 \\ \bar{x}_q = D_{21} + \left(\sqrt{\left(x_{q-1} - \frac{x}{2}\right)^2 + \left(y_{q-1} - \frac{y}{2}\right)^2} + R_{q-1} + R_q \right), & \text{если } x_{Ci} < x_0 \text{ и } y_{Ci} > y_0 \end{cases} \quad (13)$$

Проверяя условие непересечения (8) грузов на каждой полудиагонали, при этом заменив индекс d на соответствующий индекс l, m, p или q , рассчитывают координаты размещаемого груза:

$$\begin{cases} x_l = \bar{x}_l \cos \theta \\ y_l = \bar{x}_l \sin \theta \\ x_m = \bar{x}_m \cos \theta \\ y_m = y - \bar{x}_m \sin \theta \\ x_p = \bar{x}_p \cos \theta \\ y_p = \bar{x}_p \sin \theta \\ x_q = \bar{x}_q \cos \theta \\ y_q = y - \bar{x}_q \sin \theta \end{cases} \quad (14)$$

В противном случае координаты находятся по формулам пересчета (15).

Важно помнить, что после каждого i -го размещения проверяется условие непересечения с отрезком (11) и высчитывается вектор Y_C , по координатам которого выбирается партия для очередного $(i+1)$ -го груза.

$$\begin{cases}
 x_l = \left[x_i + y_i \operatorname{tg} \theta - \sqrt{(R_l + R_i)^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) - x_i^2 \operatorname{tg}^2 \theta - y_i (y_i - 2x_i \operatorname{tg} \theta)} \right] \cos^2 \theta \\
 y_l = \frac{1}{2} \left[x_i + y_i \operatorname{tg} \theta - \sqrt{(R_l + R_i)^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) - x_i^2 \operatorname{tg}^2 \theta - y_i (y_i - 2x_i \operatorname{tg} \theta)} \right] \sin 2\theta \\
 x_m = x - \left[x - x_i + y_i \operatorname{tg} \theta + \sqrt{(R_m + R_i)^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) - (x - x_i)^2 \operatorname{tg}^2 \theta - y_i (y_i - 2(x - x_i) \operatorname{tg} \theta)} \right] \cos^2 \theta \\
 y_m = \frac{1}{2} \left[x - x_i + y_i \operatorname{tg} \theta + \sqrt{(R_m + R_i)^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) - (x - x_i)^2 \operatorname{tg}^2 \theta - y_i (y_i - 2(x - x_i) \operatorname{tg} \theta)} \right] \sin 2\theta \\
 x_p = \left[x_i + y_i \operatorname{tg} \theta + \sqrt{(R_p + R_i)^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) - x_i^2 \operatorname{tg}^2 \theta - y_i (y_i - 2x_i \operatorname{tg} \theta)} \right] \cos^2 \theta \\
 y_p = \frac{1}{2} \left[x_i + y_i \operatorname{tg} \theta + \sqrt{(R_p + R_i)^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) - x_i^2 \operatorname{tg}^2 \theta - y_i (y_i - 2x_i \operatorname{tg} \theta)} \right] \sin 2\theta \\
 x_q = x - \left[x - x_i + y_i \operatorname{tg} \theta - \sqrt{(R_q + R_i)^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) - (x - x_i)^2 \operatorname{tg}^2 \theta - y_i (y_i - 2(x - x_i) \operatorname{tg} \theta)} \right] \cos^2 \theta \\
 y_q = \frac{1}{2} \left[x - x_i + y_i \operatorname{tg} \theta - \sqrt{(R_q + R_i)^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) - (x - x_i)^2 \operatorname{tg}^2 \theta - y_i (y_i - 2(x - x_i) \operatorname{tg} \theta)} \right] \sin 2\theta
 \end{cases} \quad (15)$$

По окончании цикла погрузки определяется новое потребное положение центра масс. Результаты размещения – на рис. 4.

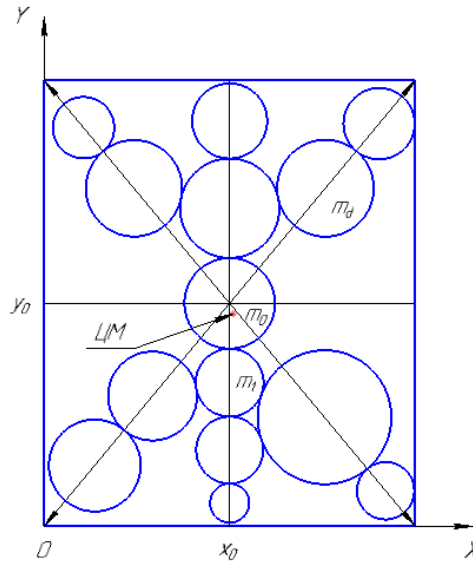


Рис. 4. Компоновка грузов второй очереди размещения.

Размещение грузов третьей очереди

По итогам второго этапа размещения грузов выбирается стартовое положение направляющего груза для третьего этапа размещения относительно местной горизонтальной ортогональной оси x_0 и координат вектора потребного положения центра масс отсека Y_C . Процесс компоновки аналогичен процессу компоновки первого этапа.

По аналогии с первым этапом цикл работает до тех пор, пока выполняется условие непересечения грузов со стенками отсека:

$$\begin{cases}
 \left| x - \left(x_0 + R_0 + 2 \sum_{u=2}^U R_u \right) \right| \geq 2R_i \\
 \left| x_0 - \left(R_0 + 2 \sum_{v=u+1}^V R_v \right) \right| \geq 2R_i
 \end{cases} \quad (16)$$

Тогда координаты грузов можно найти следующим образом:

$$\begin{cases} x_u = x_0 + (R_0 + 2 \sum_{u=2}^U R_{u-1} + R_U), \text{ если } x_{Ci} \leq x_0 \\ x_v = x_0 - (R_0 + 2R_1 + 2 \sum_{v=2}^V R_{v-1} + R_V), \text{ если } x_{Ci} > x_0, \\ y_u = y_v = y_0 \end{cases} \quad (17)$$

где x_{Ci} – поперечная координата расположения центра масс после i -го размещения u -го или v -го груза.

В данном случае требуется проверять условие (8) дважды, поскольку грузы окружены попарно грузами, расположенными на полудиагональных осях. Таким образом, для u -х грузов надо провести калибровку с p -ми и q -ми грузами, а для v -х грузов – с l -ми и m -ми грузами, соответственно заменяя индекс d .

Причем калибровка проводится последовательно с q -ми и p -ми грузами так, что если условие (8) не будет выполняться с первыми, то координаты груза пересчитываются по формулам:

$$\begin{cases} x_u = x_q + \sqrt{(R_u + R_q)^2 - (y_0 - y_q)^2}, \\ y_u = y_0 \end{cases} \quad (18)$$

а если условие (8) не будет выполняться со вторыми, то в координаты груза пересчитываются по формулам:

$$\begin{cases} x_u = x_p + \sqrt{(R_u + R_p)^2 - (y_0 - y_p)^2}, \\ y_u = y_0. \end{cases} \quad (19)$$

Именно в таком порядке – сначала с q -ми, потом с p -ми грузами – проводится калибровка, так как предположительно радиусы q -х грузов меньше, и с приближением к границе отсека в целях более плотного размещения предпочтительнее проверять условие непересечения (8) с грузами большего радиуса.

По тому же принципу ведется поиск координат v -х грузов.

Если условие (8) не выполняется с m -ми грузами, то:

$$\begin{cases} x_v = x_m - \sqrt{(R_v + R_m)^2 - (y_0 - y_m)^2} \\ y_v = y_0 \end{cases} \quad (20)$$

а если с l -ми, то:

$$\begin{cases} x_v = x_l - \sqrt{(R_v + R_l)^2 - (y_0 - y_l)^2} \\ y_v = y_0. \end{cases} \quad (21)$$

Как прежде, после каждого размещения высчитывается вектор Y_C и относительно его координат выбирается партия U или V для следующего груза.

Когда условия (8) перестанут выполняться, цикл завершится и будет вычислено новое положение вектора потребного центра масс отсека Y_C . Компоновка грузов будет иметь вид, представленный на рис. 5.

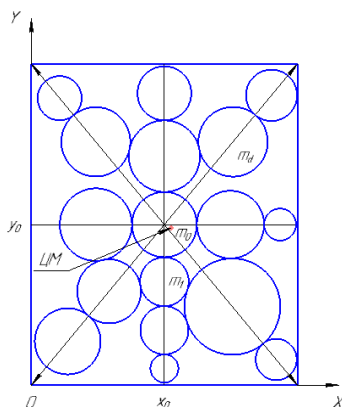


Рис. 5. Компоновка грузов третьей очереди размещения.

Оценка плотности упаковки

Чтобы оценить плотность упаковки грузов, нужно высчитать площади пустот между ними. Для этого плоскость зоны размещения разбивается на 8 равных октантов, площади которых одинаковы и отыскиваются по формуле:

$$A = \frac{1}{2} x_0 y_0. \quad (22)$$

Затем в каждом октанте ищется часть площади, занимаемая грузами:

$$[A] = \frac{1}{8} \pi R_0^2 [E] + \frac{\pi}{2} [\Xi], \quad (23)$$

где

$$[A] = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{bmatrix}, \quad [\Xi] = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^J R_j^2 + \sum_{l=1}^L R_l^2 \\ \sum_{l=1}^L R_l^2 + \sum_{v=1}^V R_v^2 \\ \sum_{v=1}^V R_v^2 + \sum_{m=1}^M R_m^2 \\ \sum_{m=1}^M R_m^2 + \sum_{k=1}^K R_k^2 \\ \sum_{k=1}^K R_k^2 + \sum_{p=1}^P R_p^2 \\ \sum_{p=1}^P R_p^2 + \sum_{u=1}^U R_u^2 \\ \sum_{u=1}^U R_u^2 + \sum_{q=1}^Q R_q^2 \\ \sum_{q=1}^Q R_q^2 + \sum_{j=1}^J R_j^2 \end{bmatrix}, \quad [E] - \text{единичная матрица.}$$

После этого высчитываются площади пустот:

$$[\Delta] = A[E] - [A], \quad (24)$$

где $[\Delta] = [\Delta_1 \ \Delta_2 \ \Delta_3 \ \Delta_4 \ \Delta_5 \ \Delta_6 \ \Delta_7 \ \Delta_8]^T$.

Далее используется фильтр:

$$[\Delta] \geq \min \{ \pi R_w^2 [E] \}, \quad (25)$$

где $w = \overline{(s+1)}, n$ – число оставшихся неразмещенных грузов.

Он позволяет выявить октанты, в которые больше грузов уже не поместится, и исключить их из дальнейших расчетов. Фильтр (24) используется с тем допущением, что внутренние пустоты между жестко состыкованными грузами пренебрежимо малы и концентрация пустот наблюдается только вдоль краев отсека. Это также легко заметить на рис. 5.

Оставшиеся октанты просчитываются последовательно согласно заданной нумерации так, что для каждого w -го груза координаты вычисляются как:

$$\begin{cases} x_A = \frac{|x_f - x_g|}{2} + \min \{ x_f; x_g \} \\ y_A = \frac{|y_f - y_g|}{2} + \min \{ y_f; y_g \} \end{cases}, \quad (26)$$

где f, g – индексы, определяющие пару партий для калибровки в каждом октанте следующим образом:

Индексация парных партий грузов

Октант	f	g	Октант	f	g
1	j	l	5	k	p
2	l	v	6	p	u
3	v	m	7	u	q
4	m	k	8	q	j

Поскольку геометрически оптимальным является поиск координат по формулам (24), то условия непересечения будут определяться оценкой четверки калибрующих векторов, модули которых рассчитываются в каждом октанте по соответствующим партиям грузов:

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{(x_{g-1} - x_A)^2 + (y_{g-1} - y_A)^2} \\ \beta = \sqrt{(x_{f-1} - x_A)^2 + (y_{f-1} - y_A)^2} \\ \delta = \sqrt{(x_g - x_A)^2 + (y_g - y_A)^2} \\ \gamma = \sqrt{(x_f - x_A)^2 + (y_f - y_A)^2} \end{cases} \quad (27)$$

Например, в первом октанте данные векторы расположены, как показано на рис. 6.

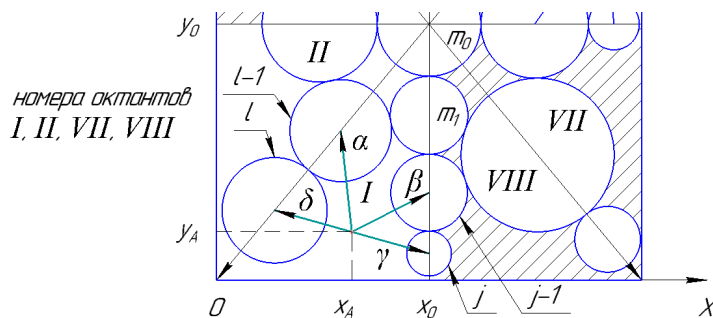


Рис. 6. Положение калибрующих векторов в первом октанте.

Затем проверяются непосредственно сами условия непересечения w -го груза с соседними:

$$\begin{cases} |\alpha - R_{g-1}| \geq R_w \\ |\beta - R_{f-1}| \geq R_w \\ |\delta - R_g| \geq R_w \\ |\gamma - R_f| \geq R_w \end{cases} \quad (28)$$

Перебором всех w -х грузов находится первый удовлетворяющий условиям (26), которому присваиваются координаты $(x_A; y_A)$, и он заполняет собой пустоту. Если таких грузов не нашлось, осуществляется переход к следующему октанту.

Заполнившиеся пустоты вносят свой вклад в смещение центра масс отсека, поэтому необходимо высчитать последнее полученное потребное положение центра масс отсека по формуле (3) и провести генеральную проверку центровки по формулам (1) и (2), как это делалось на предыдущих трех этапах размещения грузов на осях. Конечная компоновка грузов на стеллаже представлена на рис. 7.

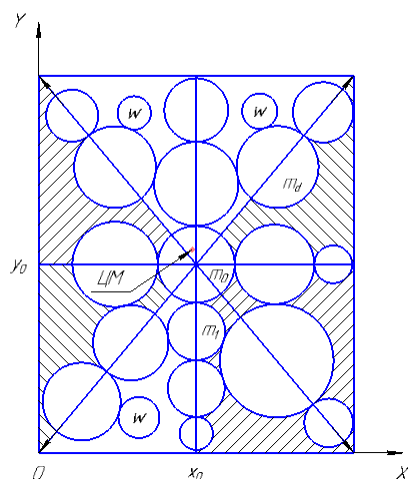


Рис. 7. Общая компоновка грузов в зоне размещения в отсеке ТГКА.

Таким образом, найдено положение центра масс загруженного отсека и максимально возможное вмещаемое при такой укладке по партиям количество грузов из всего сортамента.

Оставшиеся грузы определяются разностью:

$$\tilde{s} = n - s. \quad (29)$$

Их следует разместить в другой зоне, снова воспользовавшись описанным в статье алгоритмом.

Заключение

В статье описан разработанный алгоритм размещения грузов в отсеках транспортного грузового космического аппарата, в рамках которого с помощью фильтров были автоматизированы процессы плотной упаковки и непересечения грузов со стенками отсека и между собой.

Процесс состоит из множества итерационных циклов перебора, благодаря которому реализуется возможность поиска геометрического оптимума плотности компоновки, что эффективнее прямого перебора всех возможных значений вектора требуемого положения центра масс на каждой итерации. В то же время предстоит провести сравнительный анализ описанного в статье метода с имеющимися решениями на производствах, прежде всего в аэрокосмической отрасли. Так можно будет установить его вычислительную мощность, скорость и время выполнения операций, трудоемкость и прочие характеристики.

Не исключено, что возможны краевые случаи, когда алгоритм проявит себя специфическим образом, но это предмет будущих исследований и тестов. Кроме того, основной чертой алгоритма является использование миделевых сечений грузов с любой исходной формой (сфера, многогранник, цилиндр, конус).

На практике установлено, что наилучшую точность алгоритм проявляет для зон размещения круглой или прямоугольной формы и для грузов сферической и цилиндрической формы, так как естественные проекции их оснований представляют собой окружности. При этом грузовой отсек может быть цилиндром или прямоугольным параллелепипедом. В случаях более сложной конструкции отсека требуется предусмотреть дополнительные ограничения для расстояния между зонами размещения, чтобы учесть скосы стенок отсека.

Отдельной группой являются отсеки, в которых стеллажи или какие-либо удерживающие адаптеры не предусмотрены конструкцией по разным технико-экономическим соображениям. В них грузы размещаются по всему объему, ограниченному поверхностью грузового отсека. Такие случаи – отдельный класс задач размещения грузов. Рассмотренный в статье алгоритм для них не подходит.

Программный комплекс, выполняющий данный алгоритм размещения грузов, реализован на языке программирования Pascal. Безусловно, с развитием математической модели и механики разработанного метода код программы также будет дополняться новыми расширениями, которые могут представлять собой профильные модификации, обновления и прочие дополнения. Перенос алгоритма на другие языки программирования возможен и зависит только от потребностей заказчиков.

1. Беляков, А.А., Шулепов, А.И. Об одном способе размещения грузов в отсеках транспортных космических аппаратов при разработке логистики аэрокосмической системы // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («VI Козловские чтения»). – Самара: АО РКЦ «Прогресс», 2019.

2. Погорелов, А.С., Андреев, Д.А., Панфилов, А.Н. Сравнительный анализ и классификация задач по оптимальному расположению грузов в ограниченном пространстве // Программные продукты и системы. – 2015. – № 4 (112).

3. Курейчик, В.В., Заруба, Д.В., Запорожец, Д.Ю. Применение генетического алгоритма решения задачи трехмерной упаковки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7.
4. Ничипорук, А.О. Математический аппарат формирования объединенных грузовых единиц для транспортирования грузов // Вестник АГТУ. Серия «Морская техника и технология». – 2017. – № 2.
5. Илесалиев, Д.И. Рациональное использование грузоподъемности и вместимости крытых вагонов при перевозке тарно-упаковочных грузов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2018. – № 2.
6. Лахин, О.И. Анализ событий адаптивного планирования грузопотока российского сегмента Международной космической станции // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 6 (79).
7. Погорелов, А.С., Панфилов, А.Н., Андреев, Д.А. Задача оптимального размещения грузов на борту транспортного грузового корабля // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3.

УДК 537.226

Контес Никита Сергеевич

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

E-mail: nikitakontes1998@mail.ru

Kontes Nikita Sergeevich

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

E-mail: nikitakontes1998@mail.ru

Стукова Елена Владимировна

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

E-mail: lenast@bk.ru

Stukova Elena Vladimirovna

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

E-mail: lenast@bk.ru

Голубева Ирина Анатольевна

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

E-mail: golubeva0212@mail.ru

Golubeva Irina Anatolyevna

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

E-mail: golubeva0212@mail.ru

Зотова Оксана Васильевна

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

E-mail: ovzotova@mail.ru

Zotova Oksana Vasilievna

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

E-mail: ovzotova@mail.ru