

УДК 614.84:519.85

Комяк В.М., д-р техн. наук, проф.

Академия гражданской защиты Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ БЫСТРОГО РЕАГИРОВАНИЯ НА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ

Рассмотрено решение задачи рациональной компоновки оборудования специальной техники с учетом многочисленных эргонометрических, эксплуатационных, технологических требований и особенности ее использования в различных чрезвычайных ситуациях

Постановка проблемы. Глобальное развитие цивилизации, кроме положительных черт, породило многочисленные угрозы человечеству, обществу, государству, среди которых можно выделить пожары и взрывы, различные аварии и катастрофы. Объем и сложность работ по безопасному проживанию людей постоянно возрастает. Существенно расширяется круг научных и практических задач, которые возлагаются на пожарно-спасательные подразделения, среди которых можно выделить задачи обоснования тактико-технических требований к аварийно-спасательной технике, которая используется как во время затяжных пожаров, так и при ликвидации разнообразных чрезвычайных ситуаций. К такой технике можно отнести аварийно-спасательные автомобили, отсеки со спасательным оборудованием, устанавливаемые на судах, на пожарных поездах, на различных летательных аппаратах.

При создании аварийно-спасательных автомобилей большое внимание во всем мире уделяется вопросам универсальности, надежности, наличия в комплектации техники комплекса спасательно-технического оборудования для выполнения различных технических работ по ликвидации разнообразных чрезвычайных ситуациях, приборов по контролю состояния среды, защитного снаряжения для спасателей и др. Основной особенностью, которая учитывается при проектировании такой техники является то, что оборудование в отсеках минимальных размеров должно быть размещено таким образом, чтобы время боевого развертывания спасательными подразделениями было минимальным, при этом количество доставляемого спасательно-технического вооружения должно соответствовать полной комплектации оборудования, учитывающей все виды выполняемых работ. Обычно количество перевозимого оборудования составляет 100-200 единиц. Поэтому проанализировать все возможные варианты компоновки с учетом многочисленных технологических, эксплуатационных и эргономе-

трических требований эвристическим подходом, либо с помощью существующих интерактивных пакетов не представляется возможным. Поэтому актуальными являются вопросы разработки методов математического и компьютерного моделирования автоматической компоновки оборудования кузовов специальных аварийно-спасательных автомобилей.

Анализ последних исследований и публикаций. Необходимость усовершенствования спасательных автомобилей с учётом многочисленных эргономических, эксплуатационных и технологических требований показана в [1,2]. Компоновка оборудования, как правило, выполняются вручную или с помощью интерактивных пакетов, обзор подходов изложен в [3-5].

Постановка задачи и ее решение. В рассматриваемой работе ставится задача разработки математического и компьютерного моделирования автоматической компоновки оборудования с учетом многочисленных требований к компоновке.

В качестве *эксплуатационных* требований рассматривается размещение оборудования по отсекам по функциональному признаку. Весь набор оборудования делится по функциональному назначению на группы снаряжения и оборудования для: личного состава спасателей; забора воды из гидрантов или водоисточников (естественных и искусственных водоемов); подачи ствола первой помощи; спасения людей; вскрытия и разборки конструкций; подъема личного состава на высоту; прокладки и обслуживания магистральных рукавных линий. В зависимости от пополнения функций автомобиля данный список может быть продолжен.

К эксплуатационным требованиям относится размещение частоиспользуемого оборудования в легкодоступных местах кузова автомобиля.

Улучшение маневренности автомобиля, и как следствие-уменьшение времени достижения мест с аварийными ситуациями, достигается за счет уменьшения кузова автомобиля при заданной комплектации (количестве) перевозимого оборудования, а также за счет понижения центра масс тяжести заполненного оборудования кузова автомобиля.

Уменьшение кузова автомобиля достигается за счет плотной компоновки оборудования, однако эта компоновка должна быть такой, чтобы все оборудование было легко доставляемо спасателями, т.е. одна деталь не заклинивала другую. С этой целью должны быть выдержаны сквозныерезы между рядами и слоями оборудования .

В качестве *эргонометрических* требований рассматриваются требования, приводящие к более удобным действиям спасателей при боевом развертывании. Это ограничения на размещение оборудования в кузове автомобиля: по высоте; по глубине; с сокращением пространственных пересечений боевого расчета автомобиля и неоправданных перемещений личного состава.

К технологическим требованиям относятся, например, ограничения на размеры отсеков и способы их размещения в кузове автомобиля. Кузов автомобиля может делиться по ширине поровну и по обе стороны кузова располагаться отсеки с разными схемами размещения: равным количеством и равными размерами; равным количеством, но с разными размерами; равным количеством и попарно одинаковыми размерами; разным количеством и разными размерами и др.

Таким образом возникает следующая задача. Необходимо разместить набор спасательно-технического вооружения в кузове минимальных размеров специального автомобиля таким образом, чтобы время боевого развертывания, с использованием этого оборудования, было минимальным, при этом должны выполняться следующие требования:

1) на размещение оборудования по отсекам, формируемым по функциональному признаку, и на условия непересечения оборудования между собой с соблюдением: а) сквозных резцов между рядами оборудования и их слоями; в) ограничений по высоте и глубине размещения наиболее часто используемого оборудования; с) фиксированных мест размещения оборудования, которое выделяется экспертами;

2) на условия непересечения отсеков и условий их размещения в кузове автомобиля

3) на минимальное отклонение центра масс системы оборудования от центра масс базового шасси, не превышающее заданного значения.

Построена математическая модель задачи. В качестве математических моделей кузова автомобиля и оборудования рассмотрены соответ-

ственно геометрические объекты $S_0, S_i (i = 1, \dots, n)$. Объект $S_0 = \bigcup_{I=1}^N S_0^I$ - несвя-

зный, а объекты $S_i (i = 1, \dots, n)$ аппроксимируются невыпуклыми многогранниками, заданными в собственных системах координат, начала которых выбираются в левом, нижнем, ближнем углу их ортогональных оболочек.

Рассматриваемая задача относится к классу задач геометрического проектирования, в частности к классу задач комбинаторной оптимизации на множестве размещений: необходимо разбить параллелепипед с размерами (a, b, c) на два ряда параллелепипедов $S_0^1, \dots, S_0^{N_1}$ с размерами

$(a_I, b/2, c, \sum_{I=1}^{N_1} a_I \leq a)$ и $S_0^{N_1+1}, S_0^{N_1+N_2}, N_1 + N_2 = N$ с размерами

$(a_J, b/2, c, \sum_{J=1}^{N_2} a_J \leq a)$ таким образом, чтобы минимизировать время боевого

развертывания с использованием объектов (оборудования) $S_i^I (i = 1, \dots, n_I)$, которое необходимо разместить по областям $S_0^I (I = 1, \dots, N)$ минимальной

длины с выполнением вышеперечисленных ограничений задачи, при этом

$$\sum_I^N n_I = n.$$

Таким образом, необходимо найти упорядоченную пару $\langle T(U^*), U^* \rangle$,

$$T(U^*) = \min_{U \in W \subset R^{3n+N+1}} T(U); U^* = \arg \min_{U \in W \subset R^{3n+N+1}} T(U) \quad (1)$$

при условии $U = (x_1, y_1, z_1, \dots, x_{n_1}, y_{n_1}, z_{n_1}, \dots, x_{n_N}, y_{n_N}, z_{n_N}, a_1, \dots, a_N) \in E_f(G)$, и дополнительных ограничениях

$$a_I = \min_{W_I \subset W} (x_1, y_1, z_1, \dots, x_{n_I}, y_{n_I}, z_{n_I}), I = 1, \dots, N), \quad (2)$$

$$\sum_{I=1}^{N_1} a_I \leq a, \sum_{J=1}^{N_2} a_J \leq a.$$

Рассмотрим область W_I . Условия выполнения сквозных резов между рядами ($k = 1, 2, \dots$) объектов $S_{1k}^I, \dots, S_{J_k}^I$ имеют вид:

$$x = x_k = \max_i (x_{i_{k-1}}^I + a_{i_{k-1}}^I), i = 1, \dots, J_k^I$$

или

$$\begin{aligned} x - x_k = 0, k = 1, \dots; a_{i_{k-1}}^I = \max\{a_{1_{k-1}}^I, \dots, a_{J_{k-1}}^I\}, \forall k = 1, x_{J_0}^I = a_{J_0}^I = 0 \\ a_i^I = \max_{x_i^I \in S_i^I} x_i^I \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогично записываются условия сквозных резов между рядами объектов ($l=1, 2, \dots; \sum_l \sum_k J^l = n_I$.) $S_{1l}^I, \dots, S_{J_l}^I$:

$$\begin{aligned} z - z_l = 0, l = 1, 2, \dots, z_l = \max(z_{i_{l-1}}^I + c_{i_{l-1}}^I), c_{i_{l-1}}^I = \max\{c_{1_{l-1}}^I, \dots, c_{J_{l-1}}^I\}, \\ \forall l = 1, z_{J_0}^I = c_{J_0}^I = 0, c_i^I = \max_{z_i^I \in S_i^I} z_i^I. \end{aligned} \quad (4)$$

Условия взаимного непересечения объектов каждого k -того слоя S_{ik}, S_{jk} между собой имеют вид:

$$\Phi_{i_k, j_k}(x_{i_k}, y_{i_k}, z_{i_k}, x_{j_k}, y_{j_k}, z_{j_k}) \geq 0, i_k > j_k = 1, 2, \dots, n_I, k = 1, 2, \dots \quad (5)$$

где $\Phi_{i_k, j_k}(\cdot, \cdot)$ - непрерывная функция [6], основной конструктивной особенностью которой является ее неотрицательность при выполнении условий непересечения и размещения в области.

Ограничения размещения по высоте $[c^I_{\min}, c^I_{\max}]$, глубине $[b^I_{\min}, b^I_{\max}]$ для объекта S^I_t соответственно можно записать:

$$\begin{aligned} c^I_{\min} \leq z^I_t \leq c^I_{\max} - c^I_t; c^I_{\min} \leq c^I_{\max} \in [0, \dots, c]; \\ b^I_{\min} \leq y^I_t \leq b^I_{\max} - b^I_t; b^I_{\min} \leq b^I_{\max} \in [0, \dots, b]; t \in 1, \dots, n_I; b^I_t = \max_{y^I_t \in S^I_t} y^I_t. \end{aligned} \quad (6)$$

Условия (3-6) описывают невыпуклую, несвязную, неограниченную область в пространстве R^{3n_I+1} .

Рассмотрим область допустимых решений W .

Представим условия размещения объектов $S^I_i (i = 1, \dots, n_I)$ по областям $S^I_I (I = 1, \dots, N)$ в виде:

$$\begin{cases} \Phi(x^1_i, y^1_i, z^1_i, x^1_0, y^1_0, z^1_0) \geq 0, \\ \dots \dots \dots \\ \Phi(x^N_i, y^N_i, z^N_i, x^N_0, y^N_0, z^N_0) \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Условие допустимого отклонения приведенного центра масс от центра масс специальной техники имеет вид:

$$\left[\left(x_0 - \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot x_{i0}}{\sum_{i=1}^n m_i} \right)^2 + \left(y_0 - \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot y_{i0}}{\sum_{i=1}^n m_i} \right)^2 + \dots \right]$$

$$+ \left[z_0 - \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_{i0}}{\sum_{i=1}^n m_i} \right]^2 \leq \delta^2, \quad (8)$$

где $\delta, (x_0, y_0, z_0), (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}), m_i$ – соответственно допустимый радиус отклонения приведенного центра масс заполненных отсеков от центра масс базового шасси; координаты центра масс базового шасси; координаты центра масс i - того объекта; масса i - того объекта.

Выражения (3)-(8) описывают область W - невыпуклую, несвязную, ограниченную в пространстве R^{3n+N+1} .

E_f - комбинаторное множество, мощность которого, в общем случае, равна $C_N^{N_1} N_1! N_2! \sum_{I=1}^N n_I!$.

Функция цели – время боевого развертывания. Исследованы факторы, влияющие на время боевого развертывания, показано, что рациональная компоновка один из факторов, позволяющих сократить это время. Для получения оценок времени выполнения спасательного развертывания, которое зависит от вариантов компоновок, создан алгоритм, определяющий суммарные задержки согласно сетевой модели [7], которая описывает технологический процесс выполнения всего комплекса работ, для которого разрабатывается автомобиль. В работе [8] проанализированы, классифицированы все виды задержек, вызванные нерациональным размещением оборудования.

Согласно особенностям задачи, разработан метод решения задачи, составляющими которого является перебор точек комбинаторного множества по методу ветвей и границ [9,10] и решение задачи (2)-(6) (построение вариантов плотной упаковки) для каждой из областей $S_0^I (I = 1, \dots, N)$. Для перебора ветвей дерева решений в работе [11] разработаны правила отсеечения, основанные на особенностях рассматриваемой задачи. Поиск вариантов рационального размещения в областях $S_0^I (I = 1, \dots, N)$ с изменяющимися метрическими характеристиками осуществляется по методам минимизации по группам переменных и сужающихся окрестностей [12]. При построении вариантов плотного размещения условия (5),(7) реализуются с помощью аппарата годографа - вектор функции плотного размещения для невыпуклых многогранников, который адаптирован к выполнению условий (3)-(4) [12].

В зависимости от вида технологических ограничений рассмотрено несколько задач [11], вытекающих из общей постановки (1)-(8).

По разработанным методам разработано алгоритмическое и программное обеспечение моделирования компоновок оборудования в отсеках (как постоянных, так и переменных размеров) специальной техники быстрого реагирования. Программное обеспечение создано с помощью языка высокого уровня Object Pascal в среде Delphi версии 7.0 и может быть использовано в среде операционной системы Windows 9x/2000/XP.

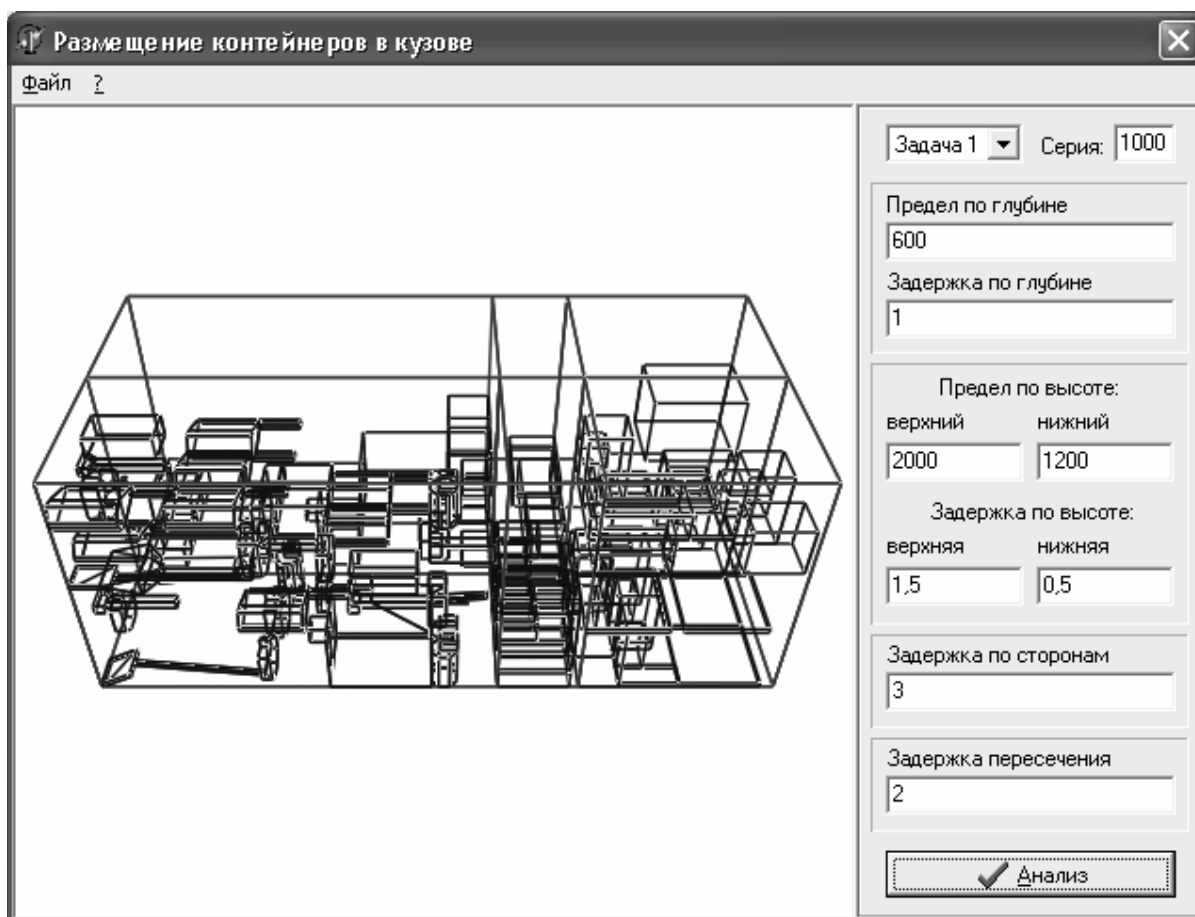


Рис. 1 – Пример размещения оборудования по отсекам кузова автомобиля

В качестве примера работы математического и алгоритмического обеспечения можно привести пример решения задачи (1)-(8) компоновки 150 единиц оборудования по 6-ти отсекам, расположенным с двух сторон автомобиля с попарно одинаковыми длинами. Оборудование аппроксимировано невыпуклыми многогранниками и параллелепипедами. Время получения одного варианта автоматической компоновки с 57 многогранниками и 93 параллелепипедами составляет 0.03 сек. на процессоре Celeron 1200 MHz. Минимальное время задержек вследствие нерационального размещения оборудования составляет 75сек. На рис.1 приведен вариант наи-

лучшей компоновки, полученный на 6712-й перестановке, при переборе 100000 точек комбинаторного множества.

Выводы. Созданное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс получения трудоемких вариантов компоновки с учетом многочисленных технологических, эксплуатационных и эргонометрических требований. Анализ полученных плотных упаковок показал, что есть возможность доукомплектовать автомобиль другим оборудованием, расширив сферы его использования. Методология решения поставленной задачи может быть непосредственно использована при проектировании отсеков со спасательным снаряжением на летательных аппаратах, отсеков с оборудованием на кораблях, в спасательных вагонах на железнодорожном транспорте и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковенко Ю.Ф. Современные пожарные автомобили. – М.: Стройиздат, 1988. – с.5 – 17, 195 – 204
2. Пивоваров В.В., Яковенко Ю.Ф. Типаж и концептуальные особенности автомобилей для пожарно-спасательной службы // Пожарное дело. –2003.-№3.С.28-29.
3. Gehring H., Menschner K. and Meyer M. A computer-based heuristic for packing pooled shipment containers. *European Journal of Operational Research*, Vol.44, pp. 277-288 (1990).
4. Bischoff E.E. Stability aspects of pallet loading. *Operational Research Spek.*, Vol.13, pp. 189-197 (1991).
5. Dowsland W.B. Three-dimensional packing-solution approaches and heuristic development. *International Journal Production Research*, Vol.29, pp. 1673-1685 (1991).
6. Y. Stoyan, J. Terno, G. Scheithauer, N. Gil, T. Romanova. Φ - functions for primary 2D-objects. – Technische Universitat Dresden, Math-NM-15-2001, 28 p.
7. Стрелец В.М., Калашников А.А. Разработка и анализ сетевой модели боевого развертывания аварийно-спасательного автомобиля // Проблемы пожарной безопасности. - Выпуск 14.-Харьков: Фолио, 2003.- С.183-188.
8. Калашников А.А. Геометрическое и компьютерное моделирование компоновки оборудования специальной техники быстрого реагирования: Автор. дис... канд. техн. наук: 05.01.01. – Мелитополь, 2005. – 20 с.
9. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. М.: Наука, 1969.-386с.

10. Стоян Ю.Г., Ємець О.О., Ємець Є.М. Множини полірозміщень в комбінаторній оптимізації // Доповіді НАН України.-1999. N8.-С.37-41.
11. Комяк В.М., Соболь О.М., Калашников О.О. Математична модель та алгоритм розв'язання задачі компоновки спеціальних автомобілів //Сб. трудов 8-й Международной научн.-пр. конф. “Современные проблемы геометрического моделирования”.- Мелитополь: ТГАТА.-2004.-с.19-24.
12. Яковлев С.В., Гиль Н.И., Комяк В.М. Элементы теории геометрического проектирования. Киев: Наук.думка, 1995.-246с.

