

УДК: 004.942

## ФОРМИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПОДВОЗА БОЕПРИПАСОВ АРТИЛЛЕРИЙСКИМ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМ

А.А. Воробьёв, Д.М. Карагодин, В.В. Корзо (Санкт-Петербург)

Изменения в характере и тактике артиллерийских подразделений определяют необходимость дальнейшего совершенствования обеспечения их различными материальными средствами, в том числе, боеприпасами (БП). В свою очередь, расстояния доставки БП на технологических участках процесса обеспечения непосредственно зависят от порядка и размещения войсковых и оперативных сил и средств материально-технического обеспечения (МТО), их возможностей штатными грузовыми автомобилями (ШГА) осуществлять доставку и подачу БП.

В современных динамически изменяющихся условиях ведения боевых действий с высокотехнологичным противником обеспечение БП с использованием только ШГА становится невозможным из-за возросших возможностей противника по уничтожению транспортных средств, в частности, за счет значительного сокращения времени между обнаружением цели и нанесением удара.

Вследствие этого возрастает актуальность проведения исследований для оценки целесообразности применения, наряду с ШГА, высококомобильных малотоннажных грузовых автомобилей (МТГА) для своевременной (срочной) доставки БП в ограниченных (малых) объемах.

Обоснованные В.В. Шмелёвым алгоритмы построения на основе «классической» модели штрафных функций аналогичной модели с целочисленными функциями и переменными [9], в последние годы находили широкое применение при решении ряда прикладных задач теории календарного планирования и теории расписаний. Дальнейшее развитие этого подхода оказывается чрезвычайно эффективным для комплексного исследования процессов расходования/пополнения разнородных ресурсов [3-5, 7].

Под комплексным исследованием процессов любой природы будем понимать методологию и технологии их описания, а также комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных управленческих решений, связанных с созданием и развитием рассматриваемых процессов в динамически изменяющихся внешних и внутренних условиях [1, 2].

В качестве примера рассмотрим задачу своевременного (срочного) пополнения БП, динамично расходуемых артиллерийским подразделением в ходе выполнения задач по предназначению.

Обозначим  $F_{арт.подр}^b(t)$  – функция обеспеченности артиллерийского подразделения БП вида  $b_q$ ,  $b_q \in B$ ,  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_Q\}$ ,  $q = \overline{1, Q}$  в период времени  $t \in T$ , где  $T$  – продолжительность ведения боевых действий (моделируемого периода).

Тогда

$$F_{арт.подр}^b(t) = f(U_{арт.подр}^b(t), V_{арт.подр}^b(t)), \quad (1)$$

где:  $U_{арт.подр}^b(t)$  – функция расходования БП, которая зависит от характера решаемых артиллерийским подразделением задач, вида БП  $b_q \in B$  и ряда других параметров;

$V_{арт.подр}^b(t)$  – функция пополнения БП, определяется, преимущественно, совокупностью взаимосвязанных мероприятий по обеспечению артиллерийского подразделения БП в рассматриваемый период боевых действий.

Следовательно, функция обеспеченности  $i$ -го орудия  $j$ -ой батареи артиллерийского подразделения БП вида  $b_q \in B$  в рассматриваемый период боевых действий примет вид

$$F_{ij}^b(t) = f(U_{ij}^b(t), V_{ij}^b(t)), i \in I, j \in J. \quad (2)$$

Таким образом, обеспеченность артиллерийского подразделения БП определяется как суммарное значение наличия БП вида  $b_q \in B$  в боеукладках самоходных артиллерийских орудий (САО), фактически задействованных в выполнении ОЗ в ходе ведения боевых действий

$$F_{арт.подр}^b(t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J F_{ij}^b(t) \quad (3)$$

Обозначим  $N_{ШГА}^b$  – количество ШГА, используемых в мероприятиях по доставке БП вида  $b_q \in B$   $i$ -му орудью  $j$ -ой батареи.

Дополнительно к ШГА подразделений МТО, в целях своевременной (срочной) доставки БП, рассмотрим возможность использования МТГА типа  $s, s \in S, S = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  различной грузоподъёмности, как альтернатива ШГА.

Обозначим  $N_{МТГAs}^b$  – количество МТГА типа  $s \in S$ , используемых в мероприятиях по доставке БП вида  $b_q \in B$   $i$ -му орудью  $j$ -ой батареи.

Будем полагать, что процесс обеспечения артиллерийских подразделений БП описывается последовательностью состояний, каждое из которых отражает совокупность действий по выполнению соответствующей ОЗ. Так как изменение подобных состояний происходит в соответствующие дискретные моменты времени, в качестве аргумента для входных  $U_{ij}^b(t), V_{ij}^b(t)$  и выходных  $F_{ij}^b(t)$  переменных определим дискрету  $t \in [0, t_1, t_2, \dots, t_c, \dots, T], t_c \in T$ .

Главное требование исследуемого процесса заключается в том, что численное значение функции обеспеченности каждого  $i$ -го орудия  $j$ -ой батареи артиллерийского подразделения (в боекомплектах) БП  $F_{ij}^b(t)$  должно быть больше или равно директивному (минимально необходимому) значению обеспеченности БП вида  $b_q \in B$   $F_{ij_{доп}}^b(t)$ , а обеспеченность артиллерийского подразделения  $F_{арт.подр}^b(t)$  – не меньше значения уровня обеспеченности БП, определяющего степень его боеспособности  $F_{арт.подр_{боевн}}^b$ .

Следовательно, задача своевременного (срочного) пополнения БП, динамично расходуемых артиллерийским подразделением в ходе выполнения задач по предназначению может быть представлена в виде модифицированной функции штрафа

$$F_{ij}^b(t) = f(U_{ij}^b(t), V_{ij}^b(t)), \text{ при } \begin{cases} F_{ij}^b(t_{+1}) \geq F_{ij_{доп}}^b(t_{+1}); \\ F_{арт.подр}^b(t_{+1}) \geq F_{арт.подр_{боевн}}^b; \\ \sum_{p=1}^{N_{МТГAs}} m_{p^{s_{МТГА}}}(t) \rightarrow \min \end{cases} \quad (4)$$

где:  $F_{ij}^b(t_{+1})$  – функция обеспеченности БП вида  $b_q \in B$   $i$ -го орудия  $j$ -ой батареи артиллерийского подразделения в ожидаемом дискретном моменте времени  $(t_{+1})$ ;

$F_{ij_{опр}}^b(t_{+1})$  – директивное (минимально необходимое) значение обеспеченности БП вида  $b_q \in B$   $i$ -го орудия  $j$ -ой батареи артиллерийского подразделения в ожидаемом дискретном моменте времени  $(t_{+1})$ ;

$F_{арт.подр}^b(t_{+1})$  – функция обеспеченности артиллерийского подразделения БП вида  $b_q \in B$  в ожидаемом дискретном моменте времени  $(t_{+1})$ ;

$\sum_{p=1}^{N_{МТГА}} m_{ps_{МТГА}}(t)$  – количество МТГА типа  $s$ , используемых в мероприятиях по доставке БП вида  $b_q \in B$   $i$ -му орудию  $j$ -ой батареи в текущем моменте времени  $(t)$ .

В выражениях (2) и (4) функция  $U_{ij}^b(t)$  является детерминированной (априорно заданной для вида БП и типа тактической задачи) для каждого дискретного момента времени  $t \in [t_1, t_2, \dots, t_c, \dots, T]$ .

В приведенной постановке задачи (4) выполнение условия  $F_{ij}^b(t_{+1}) \geq F_{ij_{опр}}^b(t_{+1})$  позволяет говорить о том, что каждое САО артиллерийского подразделения способно гарантированно выполнить назначенную ОЗ в ожидаемый дискретный момент времени  $(t_{+1})$  и, с учетом условия  $F_{арт.подр}^b(t_{+1}) \geq F_{арт.подр_{боевн}}^b$ , суммарный уровень их обеспеченности БП вида  $b_q \in B$  будет не ниже значения показателя, определяющего требуемую степень боеспособности артиллерийского подразделения в целом. При этом условие  $\sum_{p=1}^{N_{МТГА}} m_{ps_{МТГА}}(t) \rightarrow \min$  направлено на предельно возможное сокращение состава привлекаемых сил и средств (количество и тип МТГА) для обеспечения артиллерийских подразделений БП как при выполнении любой отдельно взятой ОЗ, так и за весь период времени  $T$  в целом.

Приведенная постановка задачи допускает решение на основе комплексного исследования двух взаимосвязанных процессов (расхода  $U_{ij}^b(t)$  и пополнения  $V_{ij}^b(t)$  БП вида  $b_q \in B$ ) методом двух функций, и в частности – методом штрафных функций [5].

В качестве функции штрафа будем понимать размер «дефицита» БП вида  $b_q \in B$ , например, по сравнению с заранее заданным директивным (минимально необходимым, с учетом потребностей в БП для выполнения ОЗ) значением уровня обеспеченности  $i$ -го орудия  $j$ -ой батареи артиллерийского подразделения БП вида  $b_q \in B$   $F_{ij_{опр}}^b(t_{+1})$ , определяемого динамическим формированием совокупности вида требований (рисунок 1), рассчитываемых с учетом значений неснижаемого запаса (НЗ) САО и  $U_{ij}^b(t_{+1})$  – функции расходования БП вида  $b_q \in B$   $i$ -ым орудием  $j$ -ой батареи артиллерийского подразделения на выполнение очередных ОЗ в ожидаемом дискретном моменте времени  $(t_{+1})$ .

	$(t)$		$t_c=0$				$(t_{c+1})$		$t_c=1$
	Обеспеченность БП на начало периода $F_{ij}^b(t_c)$	Установленный НЗ БП $W_{sz_n}^b$	Функция пополнения БП $R_{ij}^b(t_c)$	Функция расхода БП $U_{ij}^b(t_c)$	Формирование совокупности вида требований $F_{iacc}^b(t_c)$	Потребность САО в БП для ожидаемого периода времени $P_{ij}^b(t_{c+1})$	Обеспеченность БП на начало периода $F_{ij}^b(t_c)$	Функция расхода БП $U_{ij}^b(t_c)$	
САО №1 1-ой батареи	$F_{11}^b(t_0)$	$W_{sz_{n1}}^b$	$R_{11}^b(t_0)$	$U_{11}^b(t_0)$	$W_{sz_{n1}}^b + U_{11}^b(t_0)$	$F_{sz_{n1}}^b(t_0) - F_{11}^b(t_0)$	$F_{11}^b(t_0) + R_{11}^b(t_0) - U_{11}^b(t_0)$	$U_{11}^b(t_0)$	
САО №2 1-ой батареи	$F_{21}^b(t_0)$	$W_{sz_{n2}}^b$	$R_{21}^b(t_0)$	$U_{21}^b(t_0)$	$W_{sz_{n2}}^b + U_{21}^b(t_0)$	$F_{sz_{n2}}^b(t_0) - F_{21}^b(t_0)$	$F_{21}^b(t_0) + R_{21}^b(t_0) - U_{21}^b(t_0)$	$U_{21}^b(t_0)$	
САО №3 1-ой батареи	$F_{31}^b(t_0)$	$W_{sz_{n3}}^b$	$R_{31}^b(t_0)$	$U_{31}^b(t_0)$	$W_{sz_{n3}}^b + U_{31}^b(t_0)$	$F_{sz_{n3}}^b(t_0) - F_{31}^b(t_0)$	$F_{31}^b(t_0) + R_{31}^b(t_0) - U_{31}^b(t_0)$	$U_{31}^b(t_0)$	
САО №4 1-ой батареи	$F_{41}^b(t_0)$	$W_{sz_{n4}}^b$	$R_{41}^b(t_0)$	$U_{41}^b(t_0)$	$W_{sz_{n4}}^b + U_{41}^b(t_0)$	$F_{sz_{n4}}^b(t_0) - F_{41}^b(t_0)$	$F_{41}^b(t_0) + R_{41}^b(t_0) - U_{41}^b(t_0)$	$U_{41}^b(t_0)$	
САО №5 1-ой батареи	$F_{51}^b(t_0)$	$W_{sz_{n5}}^b$	$R_{51}^b(t_0)$	$U_{51}^b(t_0)$	$W_{sz_{n5}}^b + U_{51}^b(t_0)$	$F_{sz_{n5}}^b(t_0) - F_{51}^b(t_0)$	$F_{51}^b(t_0) + R_{51}^b(t_0) - U_{51}^b(t_0)$	$U_{51}^b(t_0)$	
САО №6 1-ой батареи	$F_{61}^b(t_0)$	$W_{sz_{n6}}^b$	$R_{61}^b(t_0)$	$U_{61}^b(t_0)$	$W_{sz_{n6}}^b + U_{61}^b(t_0)$	$F_{sz_{n6}}^b(t_0) - F_{61}^b(t_0)$	$F_{61}^b(t_0) + R_{61}^b(t_0) - U_{61}^b(t_0)$	$U_{61}^b(t_0)$	

Рис. 1 – Динамическое формирование (фрагмент) потребностей

$$F_{ij_{доп}}^b(t), F_{ij_{доп}}^b(t_{+1}), F_{ij_{доп}}^b(t_{+2}) \text{ и т.д.}$$

Основными ограничениями являются:

1. Продолжительность ведения боевых действий (моделируемого периода)

$$t \in [0, t_1, t_2, \dots, t_c, \dots, T], t_c \in T \quad (5)$$

2. Область определения функции обеспеченности САО БП

$$F_{ij}^b(t) \in [0, F_{ij_{пред}}^b] \quad (6)$$

3. Директивные (минимально необходимые) значения обеспеченности  $i$ -го орудия  $j$ -ой батареи артиллерийского подразделения БП в рассматриваемый период боевых действий  $F_{ij_{доп}}^b(t)$

$$F_{ij}^b(t) \geq F_{ij_{доп}}^b(t), \text{ при } \forall t \in ]0, T] \quad (7)$$

4. Суммарный уровень обеспеченности САО артиллерийского подразделения БП, определяющий степень его боеспособности в рассматриваемый период боевых действий  $F_{арт.подр_{боевн}}^b$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J F_{ij}^b(t) \geq F_{арт.подр_{боевн}}^b, \text{ при } \forall t \in ]0, T] \quad (8)$$

5. Время реализации  $k$ -ых мероприятий по доставке БП  $i$ -му орудию  $j$ -ой батареи артиллерийского подразделения

$$\Delta t_{ij}^{kb} \leq \tau_{ij}^{kb} \quad (9)$$

6. Количество средств доставки:

$N_{ШГА}^k$  – лимитное количество ШГА, используемых в  $k$ -ых мероприятиях по доставке БП  $i$ -му орудию  $j$ -ой батареи;

$N_{МТГА_s}^k$  – лимитное количество МТГА типа  $s$  ( $s = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ), используемых в  $k$ -ых мероприятиях по доставке БП  $i$ -му орудию  $j$ -ой батареи.

Таким образом, модификация метода штрафных функций заключается в том, что вместо контроля заданного (в виде скалярного значения) уровня обеспеченности БП осуществляется контроль уровня обеспеченности, заданного интервальным значением (то есть как верхней границей, означающей, например, максимально возможную вместимость БП для  $i$ -го орудия, так и нижней границей, равной, например, сумме размера неприкосновенного запаса БП и количества БП, нужного для выполнения ОЗ).

Вследствие этого, в развитие работы [9], фактически упраздняется обязательное в классической теории штрафных функций жесткое ограничение вида

$U_{арт.подр}^b(t) = 1 - V_{арт.подр}^b(t)$ . В дальнейшем необходимая «синхронизация» функций расхода  $U_{ij}^b(t)$  и пополнения  $V_{ij}^b(t)$  БП осуществляется с учетом текущего времени и допустимого времени на обеспечение выполнения ОЗ, с использованием ограничений (7) и (9).

Для демонстрации возможностей предлагаемого подхода в качестве средств своевременной (срочной) доставки БП были выбраны пять типов МТГА ( $s = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ), грузоподъемностью до 1 (1,5; 2; 2,4; 2,8) тонн(ы) соответственно. Программная реализация имитационной модели для исследования процессов расходования/пополнения БП артиллерийского подразделения в соответствии с заданными зависимостями и ограничениями была реализована в среде разработки (IDE) для языка программирования Python [8].

Программа предназначена для практической реализации имитационной модели процесса своевременной (срочной) доставки динамично расходующих артиллерийским подразделением БП различными видами грузового автомобильного транспорта, осуществляющими подвоз до потребителей ограниченного запаса БП по маятниковому маршруту с обратным холостым пробегом. Вариативными параметрами в модели являются: количество и эксплуатационные характеристики средств доставки, расстояния плеч подвоза, запас БП в пункте подвоза и время на его пополнение, количество потребителей, их потребности и предельные возможности по приему БП, очередность их обеспечения, время на проведение погрузочно-разгрузочных работ.

В качестве исходных данных в программе задавались интервал моделирования, удаленность CAO от подразделений обеспечения, критический и неснижаемый уровень запаса, количество и эксплуатационные характеристики ШГА подразделений обеспечения и предлагаемых в качестве средств доставки БП МТГА, а также различные временные параметры, необходимые для согласования функций  $U_{ij}^b(t)$  расхода и пополнения  $V_{ij}^b(t)$  БП в общей модели (4). На рисунке 2 представлен интерфейс ввода исходных данных программы своевременной (срочной) доставки БП CAO артиллерийского подразделения с использованием МТГА, который содержит условно-постоянные параметры (на темном фоне) и переменные (на светлом фоне) имитационной модели.

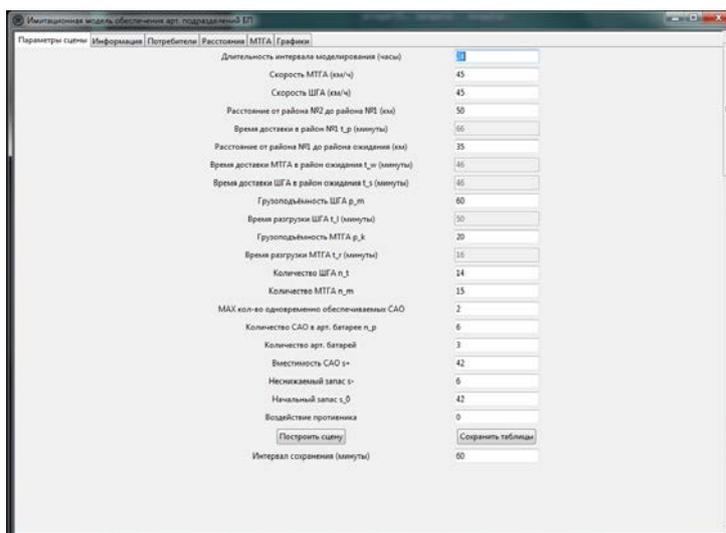


Рис. 2 – Интерфейс ввода исходных данных программы своевременной (срочной) доставки БП CAO артиллерийского подразделения с использованием МТГА

Результатом имитационного моделирования является прогнозирование динамики изменения для каждого вида  $b_q$  БП функции штрафа  $F_{ij(-)}^b(t) = F_{ij_{sup}}^b(t) - F_{ij}^b(t)$ , в зависимости от различных вариантов применения МТГА и удаленности CAO от подразделений обеспечения (рисунок 3).

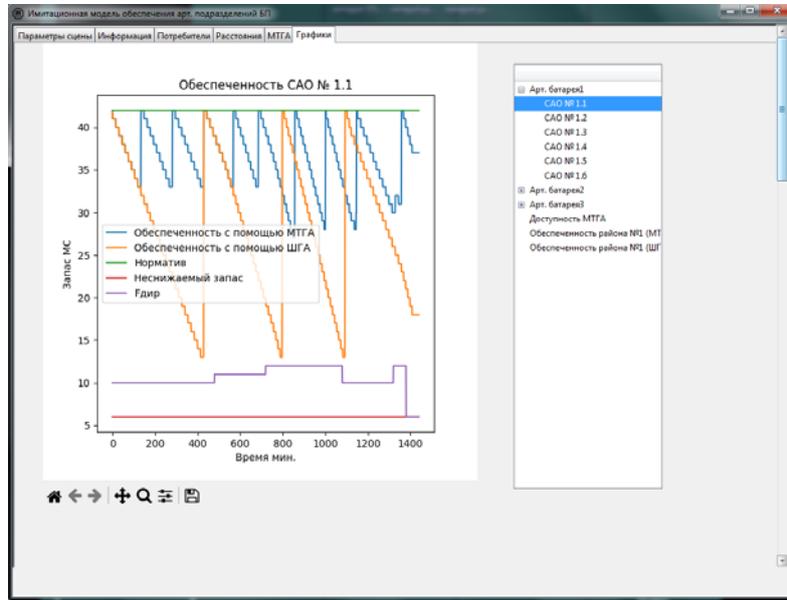


Рис. 3 – Уровень обеспеченности CAO артиллерийского подразделения БП в зависимости от различных вариантов применения грузовых автомобилей в качестве средств доставки

На рисунке 4 представлены сведения о доступности и загруженности МТГА БП в течении моделируемого периода.

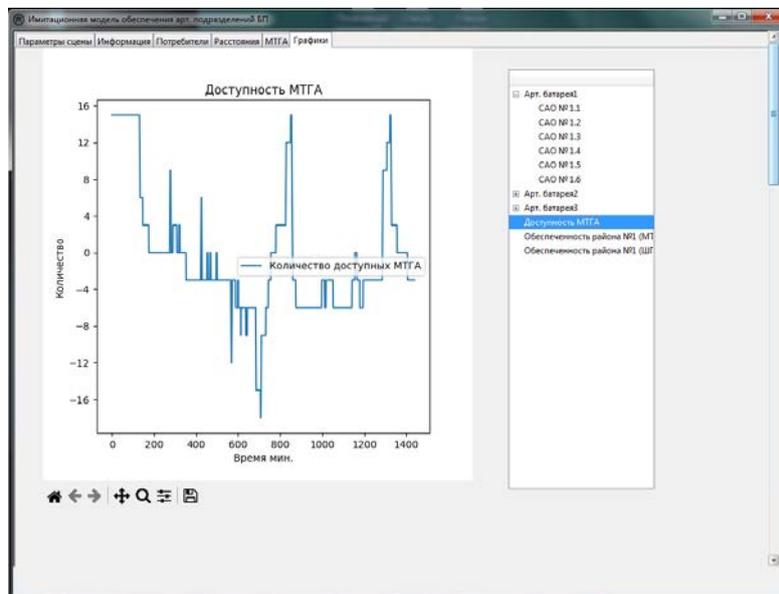


Рис. 4 – Сведения о доступности и загруженности МТГА БП в течение моделируемого периода

Практическое применение программы позволяет сформировать рациональный вариант распределения парка транспортных средств для доставки БП САО артиллерийского подразделения в заданных условиях обстановки.

Наряду с этим, применение модели на практике дает возможность:

- рассчитать минимально необходимую численность парка средств доставки БП САО артиллерийского подразделения с различной грузоподъемностью и очередность их применения в заданных условиях обстановки (рисунок 6);
- прогнозировать динамику своевременной (срочной) доставки БП артиллерийским подразделениям.

Общий алгоритм формирования рационального варианта подвоза БП артиллерийским подразделениям в заданных условиях обстановки представлен на рисунке 5.

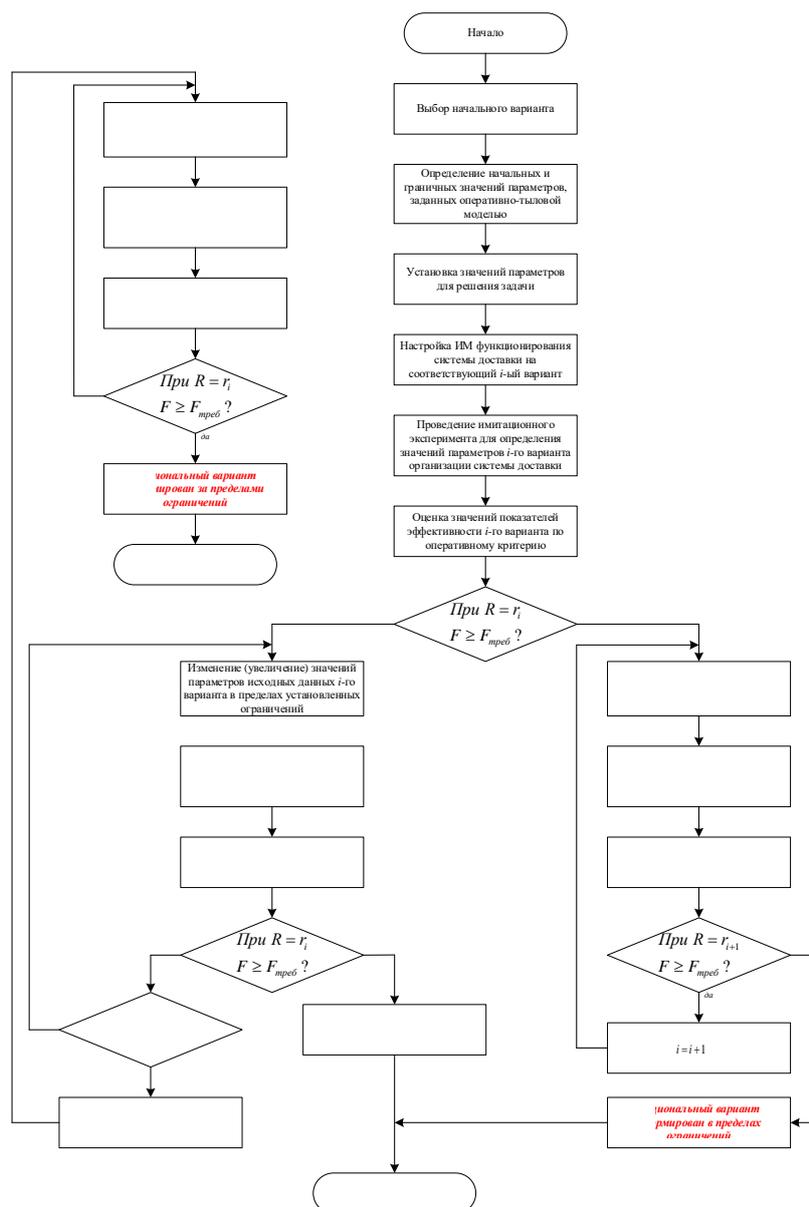


Рис .5 – Алгоритм формирования рационального варианта подвоза БП артиллерийским подразделениям в заданных условиях обстановки

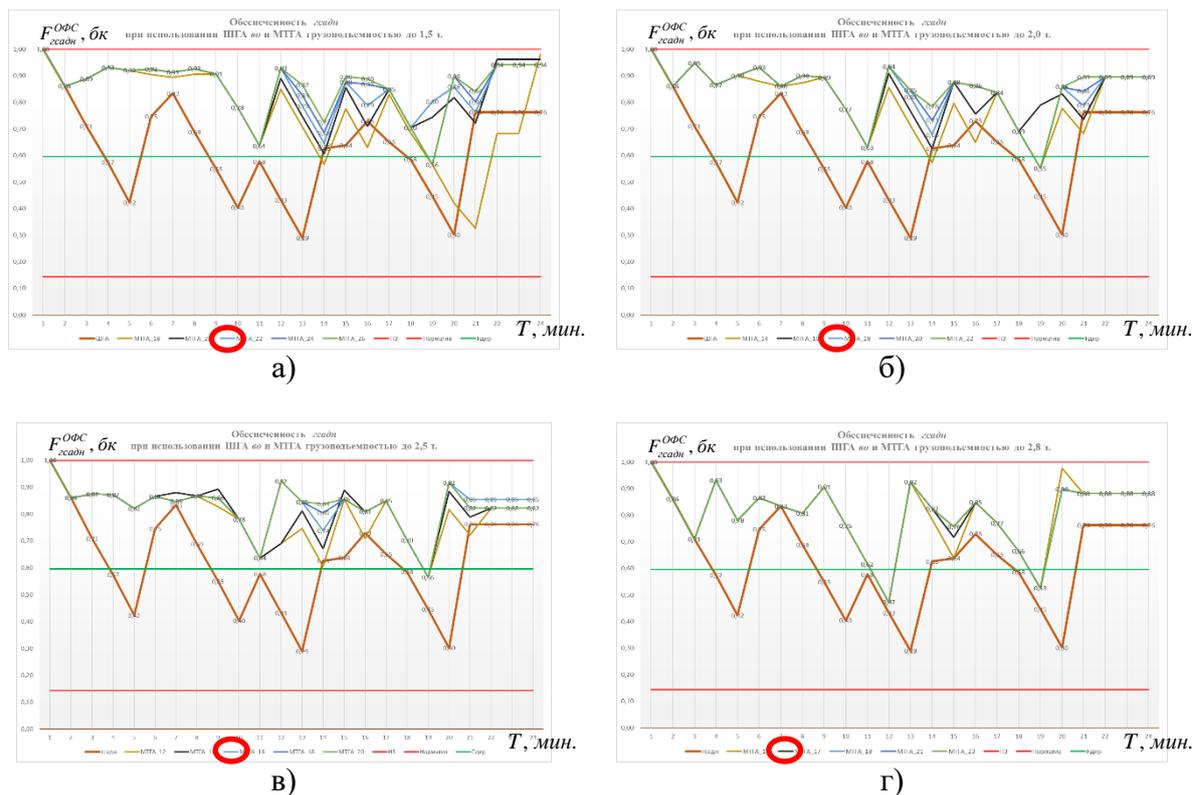


Рис. 6 – Сравнительные оценки результативности обеспечения артиллерийских подразделений БП с применением МТГА различной грузоподъёмности

Таким образом, исследованы в теоретическом плане и подтверждены экспериментально большие возможности применения модифицированного метода штрафных функций при исследовании широкого спектра практических задач, связанных с поиском рациональных решений по восполнению динамично расходуемых разнородных ресурсов при ограничениях на количество транспортных средств.

### Литература

1. Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А., Емельянов С.В. и др. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С. В. Емельянова. М.: Машиностроение, 1988.
2. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
3. Ахметьянов Р.В., Воробьев А.А., Мاستин А.Б. Имитационное моделирование экстренной доставки материальных средств на основе метода штрафных функций [Электронный ресурс] // Труды Первой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в военной сфере «Имитационное моделирование систем военного назначения, действий войск и процессов их обеспечения» («ИМСВН-20220») (Санкт-Петербург, 25 ноября 2020 г.). СПб: Изд-во ВА МТО – АО ЦТСС, 2020. 286 с. ISBN 978-5-902241-47-8. С. 33-37.
4. Ахметьянов Р.В., Воробьев А.А., Мастин А.Б. Обоснование количества и типов грузовых беспилотных летательных аппаратов для экстренной доставки материальных средств // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020610995 от 23.01.2020.
5. Гроссман К.Г., Каплан А.А. Нелинейное программирование на основе безусловной

- минимизации. – Новосибирск: Наука, 1981. – 184 с.
6. **Пантелеев А.В., Летова Т.А.** Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2005. – 544 с.
  7. **Потапов М.М.** Методы оптимизации. Конспект лекций. – М: МГУ им. Ломоносова, 2003. – 78 с.
  8. **Воробьев А.А., Карагодин Д.М., Корзо В.В., Кузин М.С.** Программная реализация имитационной модели процесса своевременной (срочной) доставки динамично расходуемых материальных средств различными видами грузового автомобильного транспорта // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024663249 от 05.06.2024.
  9. **Шмелёв В.В.** Метод точных штрафных функций для линейных смешанных целочисленных задач оптимизации. Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. – М.: ИСА РАН, 2000. – 34 с.