

В.В.Короленко  
Н.М.Лазников, кандидат технических  
наук, доцент

### **Методика рационального распределения заказов на материальные ресурсы при планировании поставок в системе интегрированной логистической поддержки эксплуатации авиационной техники военного назначения**

*В статье описана методика рационального распределения заказов на материальные ресурсы, позволяющая автоматизировать процесс планирования поставок, повысить оперативность организации планирования и оптимизировать стоимость поставок ресурсов. Методика предназначена для использования в системе интегрированной логистической поддержки эксплуатации авиационной техники военного назначения в качестве математического обеспечения автоматизированной системы планирования и управления поставками ресурсов. Методика позволяет повысить объективность решений, принимаемых должностными лицами при оперативном планировании поставок материальных ресурсов.*

Проводимое в последние годы реформирование Вооруженных Сил России не решило проблем с обеспечением эксплуатации авиационной техники военного назначения (АТ ВН) необходимыми материальными ресурсами, прежде всего, запасными частями. Внедрение сервисного обслуживания на данный момент не принесло положительных результатов – простои АТ не сократились, как и стоимость материально-технического обеспечения (МТО). Тем не менее, задача поддержания Вооруженных Сил в заданной степени готовности к боевому применению остается первостепенной. Наряду с этим военная доктрина выдвигает требование оптимизации расходов на оборону.

Одним из факторов, определяющих боеготовность частей Военно-воздушных сил, является поддержание требуемого уровня исправности АТ, эксплуатируемой в авиационных базах. Исправность техники определяет возможности авиабазы по выполнению планов боевой подготовки. Наибольшее негативное влияние на уровень исправности АТ ВН оказывают простои техники по причине отсутствия необходимых запасных частей, комплектующих и других материальных ресурсов.

Исправность АТ ВВС в настоящее время составляет в среднем 60%. При этом разброс значений исправности достаточно большой: в некоторых авиабазах исправность техники – практически стопроцентная, в других – около 30% и даже менее. К тому же, как показывает практика, исправность может значительно измениться за небольшой период времени.

Прежде всего, это связано с неудовлетворительным обеспечением процессов эксплуатации материальными ресурсами. Основная проблема заключается в том, что сроки удовлетворения заявок на поставку запчастей могут достигать нескольких недель и даже месяцев. При этом вопрос экономии средств в процессе МТО не ставится. Прежде всего, это происходит потому, что нет отработанного эффективного механизма удовлетворения заявок.

Уже достаточно давно в системе эксплуатации АТ ВН сложилось противоречие, заключающееся в необходимости удовлетворения потребностей эксплуатирующих авиационную технику частей ВВС в ресурсах с целью поддержания требуемого уровня исправности воздушных судов и выполнения требования минимизации расходов. Разрешению данного противоречия может способствовать внедре-

ние интегрированной логистической поддержки (ИЛП) жизненного цикла (ЖЦ) АТ ВН. Исследования в этом направлении ведутся не первое десятилетие. В России данная идеология начала активно развиваться в начале двухтысячных. В это время перед Вооруженными Силами РФ поставлена задача внедрения ИЛП ЖЦ вооружения и военной техники. В этом направлении принят ряд нормативных актов, которые на данный момент работают лишь частично. Система сервисного обслуживания АТ ВН, которая должна была работать на принципах ИЛП, не обеспечивает выполнение возложенных задач. Это происходит потому, что при новой форме организации системы МТО процессов эксплуатации АТ ВН используются старые методы и технологии.

Во-первых, не используется основной принцип ИЛП – интеграция процессов ЖЦ в единую систему.

Во-вторых, при планировании и управлении бизнес-процессами (в том числе и поставками материальных ресурсов) не внедряется и не используется не только новый методический аппарат и инновационные технологии, но даже проверенные методы и технологии – ERP-системы, ABC/XYZ анализ, RFID-системы, PLM-системы и другие CALS-технологии.

В-третьих, существующая организация МТО в ВВС РФ не позволяет использовать новые принципы управления процессами МТО, поскольку четко не определены обязанности и ответственность органов и организаций, задействованных в системе обеспечения материальными ресурсами. Например, не понятно, кто должен отвечать за нарушение сроков поставки тех или иных предметов МТО. На данный момент ответственность за простой техники не регламентирована.

Однако реформа продолжается и видна тенденция к возвращению упраздненных тыловых органов Вооруженных Сил. Этим органам необходимо предоставить полномочия по руководству системой сервисного обслуживания на принципах ИЛП. Руководство си-

стемой сервисного обслуживания подразумевает создание центра логистической поддержки (ЦЛП), который управляет процессами технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и МТО.

Основными процессами МТО являются планирование и управление поставками материальных ресурсов, необходимых для обеспечения эксплуатации АТ ВН. Все существующие методы планирования разработаны более 20 лет назад и для перспективной системы поставок ресурсов не подходят. При этом они направлены преимущественно на долгосрочное планирование или же на период военных действий. Оперативному планированию поставок ресурсов практически не уделено внимание. При этом данную задачу необходимо решать практически каждый день.

Задача оперативного планирования поставок заключается в определении оптимального варианта распределения заказов на материальные ресурсы и утверждении полученного плана поставок соответствующим должностным лицом. Основная цель задачи оптимизации – минимизация стоимости и времени доставки требуемых ресурсов заказчиком при обеспечении требуемой степени удовлетворения их потребностей.

На данный момент задача оптимизации не может быть решена ввиду отсутствия необходимого методического аппарата.

В качестве методического обеспечения оперативного планирования поставок, способствующего разрешению указанного выше противоречия и позволяющего автоматизировать процесс планирования поставок, повысить оперативность организации планирования и оптимизировать стоимость поставок ресурсов предлагается методика рационального распределения заказов на материальные ресурсы при планировании поставок в системе ИЛП эксплуатации АТ ВН.

Задачу, которую позволяет решать предлагаемый методический аппарат, можно сформулировать следующим образом: на

основании *данных* о поставщиках, заказчиков, ресурсах, стоимости и продолжительности доставки, стоимости ресурсов, уровне исправности техники необходимо составить план поставок, то есть определить, какое количество, какого типа ресурсов, откуда (от какого поставщика) и куда (в какую авиабазу) необходимо поставить, чтобы стоимость поставки была минимальной.

Теория военно-экономического анализа показывает, что наиболее простым способом решения данной задачи является сведение ее к решению задачи линейного программирования (транспортной задачи). Имеются ограничения, которые описываются системой линейных неравенств (заказчикам не может быть поставлено больше ресурсов, чем есть у поставщиков, и потребности заказчиков должны быть удовлетворены), и оптимизируемая целевая функция (стоимость осуществления плана поставок).

Оптимизируемый функционал представляет собой минимизируемую суммарную стоимость поставки ресурсов всем заказчикам (стоимость удовлетворения потребностей заказчиков), т.е. стоимость осуществления плана поставок.

Условия-ограничения обуславливаются необходимостью максимизации уровня исправности АТ в Военно-воздушных силах России, наличием требуемых ресурсов у поставщиков и требованием максимально возможного удовлетворения потребностей заказчиков (авиабаз).

По своей постановке рассматриваемая задача схожа с «транспортной задачей» [1]. Однако, наличие следующих ограничений не позволяют решать рассматриваемую задачу классическими методами [2]:

- задача поиска оптимальных вариантов распределения материальных ресурсов решается на множестве неоднородных грузов;

- для решения задачи достаточно выполнения условия о том, что количество потребностей не должно превышать запасов материальных ресурсов, имеющихся у поставщи-

ков. Поэтому в случае выполнения данного условия задачу не нужно сводить к транспортной задаче с правильным балансом введением фиктивных заказчиков;

- если количество истребованных материальных ресурсов превышает имеющиеся на складах поставщиков запасы, то задача не решается классическим методом – введением фиктивных складов. В этом случае осуществляется уменьшение потребностей до уровня имеющихся запасов на основе эвристического критерия;

- учитывается зависимость удельной стоимости доставки ресурса от количества (массы и объема) доставляемого ресурса.

Таким образом, необходимо решить задачу определения оптимального варианта распределения заказов на материальные ресурсы между заказчиками на множестве неоднородных грузов с учетом ступенчатого изменения удельной стоимости доставки. Для этого необходимо определить входные данные, условия-ограничения и вычислить оптимизируемый функционал.

В качестве исходных данных используется информация, хранящаяся в базе данных ЦЛП:

$A$  – количество имеющихся ресурсов;

$a_{is}$  – количество материального ресурса  $i$ -го типа, хранящегося на складе  $s$ -го поставщика;

$B$  – количество требуемых ресурсов;

$x_{ilsk}$  – количество ресурса  $i$ -го типа, поставляемого  $s$ -м поставщиком  $k$ -му заказчику по расценкам, соответствующим диапазону  $l$ ;

$c_{ilsk}^{nocm}$  – стоимость поставки единицы материального ресурса;

$c_{is}^{pec}$  – стоимость ресурса  $i$ -го типа у  $s$ -го поставщика;

$c_{lsk}$  – удельная стоимость доставки ресурса;

$m_i$  – масса ресурса  $i$ -го типа;

$d_{ilsk}$  – продолжительность (время) доставки;

$k=[1;K]$ ,  $K$  – количество заказчиков;

$s=[1;S]$ ,  $S$  – количество поставщиков;

$l=[1;L]$ ,  $L$  – количество требуемых типов ресурсов;

$l=[1;L]$ ,  $L$  – количество диапазонов изменения стоимости доставки;

$I_{mp}$ ,  $I_{\phi}$  – требуемый и фактический уровень исправности.

Количество имеющихся ресурсов  $A$  определяется по формуле:

$$A = \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S a_{is} . \quad (1)$$

Количество требуемых ресурсов  $B$  определяется следующим образом:

$$B = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K b_{ik} . \quad (2)$$

Оптимизируемая целевая функция  $W$  учитывает минимизацию стоимости поставки ресурсов всем заказчикам ( $k$ ) по всем поставщикам ( $s$ ), типам ресурсов ( $i$ ) и диапазонам количества доставляемого ресурса ( $l$ ):

$$W = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K c_{ilsk}^{nocm} x_{ilsk} \rightarrow \min , \quad (3)$$

где  $c_{ilsk}^{nocm}$  – стоимость поставки единицы материального ресурса  $i$ -го типа  $s$ -м поставщиком  $k$ -му заказчику при доставке количества ресурса, находящегося в границах диапазона  $l$ , руб.;

$x_{ilsk}$  – количество материального ресурса  $i$ -го типа, поставляемого  $s$ -м поставщиком  $k$ -му заказчику по расценкам, соответствующим диапазону  $l$ .

Система ограничений включает следующие условия:

1. Уровень исправности должен быть не менее требуемого:

$$y_{ucnp} \geq y_{треб} , \quad (4)$$

где  $y_{ucnp}$  – уровень исправности АТ ВН.

Уровень исправности представляет собой отношение количества авиабаз с требуемым уровнем исправности к общему количеству авиабаз, подавших заявки на поставку ресурсов:

$$y_{ucnp} = \frac{N_{аб}^{mp}}{N_{аб}} , \quad (5)$$

где  $N_{аб}^{mp}$  – количество авиационных баз, от которых поступили заявки на поставку материальных ресурсов, с требуемым уровнем исправности техники;

$N_{аб}^{mp}$  – общее количество авиационных баз, от которых поступили заявки на поставку материальных ресурсов.

То есть для увеличения уровня исправности необходимо осуществить поставку так, чтобы количество авиабаз, в которых уровень исправности после поставки будет не менее требуемого, было как можно больше.

2. Суммарное количество ресурса, истребованное всеми заказчиками не должно превышать суммарного количества запасов, имеющихся у поставщиков:

$$\sum_{k=1}^K b_{ik} \leq \sum_{s=1}^S a_{is} . \quad (6)$$

3. Суммарное количество  $i$ -го ресурса, поставляемое  $s$ -м поставщиком всем заказчикам, не должно превышать запаса ресурсов поставщика:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K x_{ilsk} \leq a_{is} . \quad (7)$$

4. Необходимо максимально полно удовлетворить заявки заказчиков по каждому поставляемому типу материальных ресурсов:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S x_{ilsk} = b_{ik} . \quad (8)$$

Поставленная задача не может быть решена напрямую («в лоб»), поскольку решение осложнено большой размерностью рассматриваемых множеств (заказчики, поставщики, огромная номенклатура ресурсов), отсутствием необходимой информации (не известно, откуда и в каком количестве будут поставляться требуемые ресурсы, т.е. неизвестны возможные маршруты доставки) и невозможностью соблюсти ограничение по исправности без применения дополнительного методического аппарата.

Разработанная методика позволяет решить задачу определения оптимального плана поставок путем разбиения решения на ряд этапов:

1. Получение исходной информации из базы данных ЦЛП (регистрация заявок, выбор поставщиков, определение наличия ресурсов).

2. Приведение к соответствию количества истребованных и располагаемых ресурсов на

основе критерия, характеризующего исправность парка воздушных судов (ВС) заказчиков, а также их потребности.

3. Построение оптимальных возможных маршрутов доставки ресурсов.

4. Определение оптимального плана поставок ресурсов по критерию минимальной стоимости осуществления плана поставок.

Получение исходной информации осуществляется путем запросов к базе данных ЦЛП. В результате получают данные о множестве поставщиков и заказчиков, наличии и потребностях в ресурсах, исправности АТ.

Второй этап имеет место, если потребности заказчиков превышают все имеющиеся у поставщиков запасы. В этом случае учитывается ограничение по исправности. В отсутствие дефицита все заказчики могут быть удовлетворены и, соответственно, уровень исправности будет максимально возможным (принято допущение, что удовлетворенность или неудовлетворенность заказчика (авиабазы) в ресурсах прямо влияет на уровень исправности).

Процесс приведения к соответствию количества потребных и располагаемых ресурсов заключается в следующем: необходимо итерационно исключать требования заказчиков до момента, когда величина потребных ресурсов перестанет превышать запасы.

Для приведения к соответствию потребных и располагаемых ресурсов необходимо выбрать соответствующий критерий. Для обоснования выбора критерия проведен вычислительный эксперимент.

Наибольшее количество удовлетворенных заказчиков в подавляющем большинстве случаев было получено при исключении заказчиков по алгоритму, учитывающему относительные потребности заказчиков и относительные значения разности фактической и требуемой исправности (относительно требуемого значения исправности). Количество удовлетворенных заказчиков, полученное с использованием данного алгоритма в среднем на 2,5% (в отдельных случаях до 10%) больше, чем в случае использования других

алгоритмов. Это справедливо для различных значений количества истребованных ресурсов и для различных значений количества располагаемых ресурсов. Следовательно, соответствующий критерий является более предпочтительным. Использование данного критерия позволяет максимизировать уровень исправности и соблюсти соответствующее условие-ограничение.

Данный критерий основан на допущении, что потребности порождаются необходимостью восстановления и поддержания исправности воздушных судов, т.е. между потребностями и исправностью воздушных судов существует прямая зависимость.

Критерий описывается с помощью соотношения:

$$K_{un}^k = \Delta b_k \Delta I_{вс}^k, \quad (9)$$

где  $K_{un}^k$  – критериальный показатель приведения к соответствию потребных и располагаемых ресурсов, учитывающий исправность ВС и потребности  $k$ -го заказчика;

$\Delta b_k$  – относительные потребности  $k$ -го заказчика;

$\Delta I_{вс}^k$  – относительное значение разности фактической и требуемой исправности  $k$ -го заказчика.

Относительные потребности  $k$ -го заказчика представляют собой отношение потребностей  $k$ -го заказчика к суммарному значению потребностей всех заказчиков, заявки которых рассматриваются:

$$\Delta b_k = \frac{b_k}{\sum_{k=1}^K b_k}, \quad (10)$$

где  $\Delta b_k$  – относительные потребности  $k$ -го заказчика;

$b_k$  – потребности  $k$ -го заказчика;

$K$  – количество заказчиков.

Относительное значение разности фактической и требуемой исправности представляет собой абсолютное значение отношения разности фактической и требуемой исправности к значению требуемой исправности:

$$\Delta I_{\text{вс}}^k = \left| \frac{I_{\text{вс}}^k - I_{\text{мп}}}{I_{\text{мп}}} \right|, \quad (11)$$

где  $\Delta I_{\text{вс}}^k$  – относительное значение разности фактической и требуемой исправности  $k$ -го заказчика;

$I_{\text{вс}}^k$  – фактическое значение исправности парка ВС  $k$ -го заказчика;

$I_{\text{мп}}$  – требуемое значение исправности парка ВС.

В соответствии с данным критерием из рассмотрения сначала исключаются заказчики с наибольшим значением показателя «исправность-потребности». При равенстве значений данного показателя у нескольких заказчиков исключаются те, у кого потребности выше.

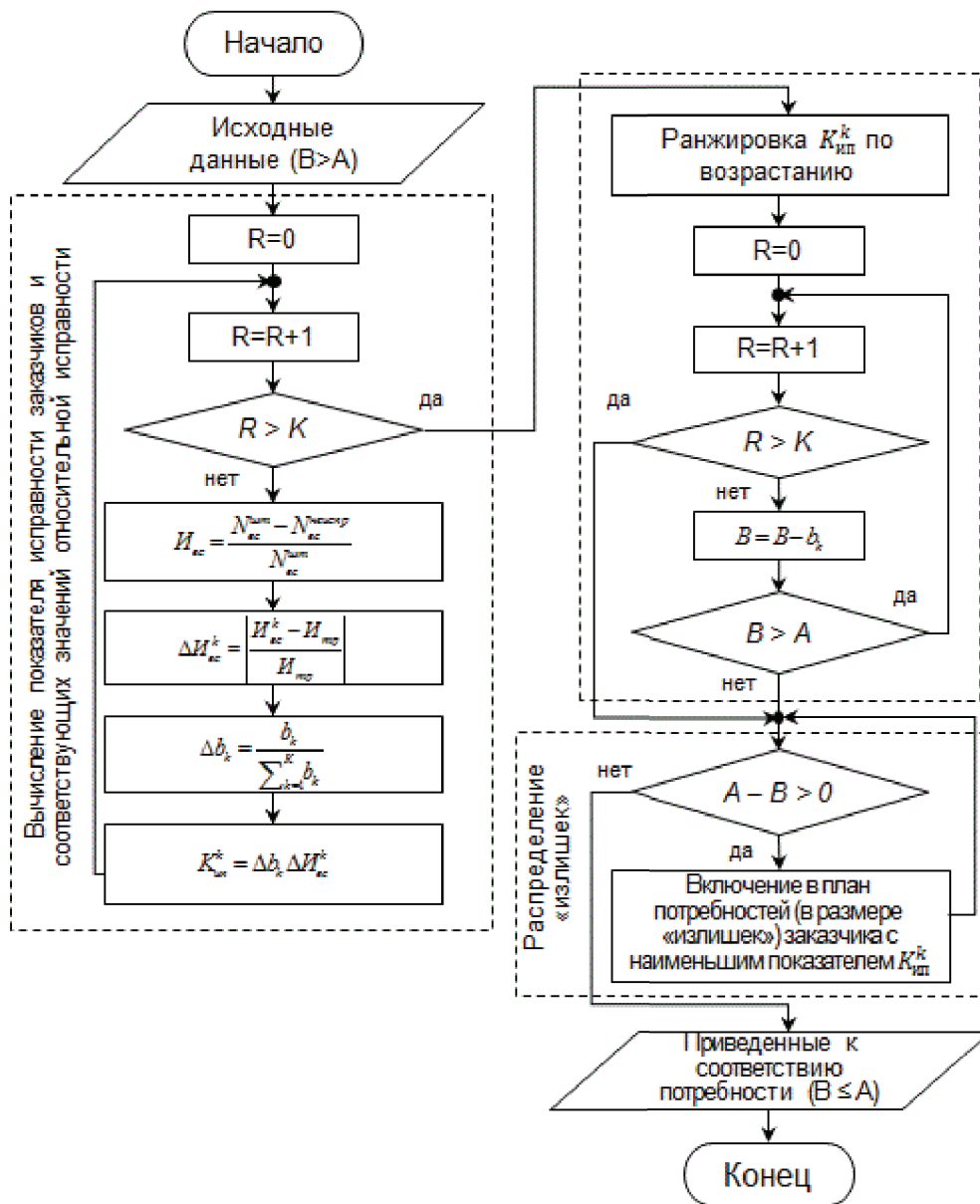


Рисунок 1 – Алгоритм приведения к соответствию истребованных и располагаемых ресурсов

Блок-схема алгоритма приведения к соответствию потребных и располагаемых ресурсов представлена на рисунке 1. Алгоритм заключается в следующем:

1. Вычисление показателя исправности парка ВС  $I_{\text{вс}}^k$  по всем заказчикам, для которых решается задача распределения ресурсов ( $R$  – счетчик,  $K$  – количество заказчиков, приславших заявки).

2. На основании полученных фактических значений исправности парка ВС и требуемых значений исправности по формуле (11) вычисляются относительные значения исправности  $\Delta I_{bc}^k$  по всем рассматриваемым заказчикам ( $R$  – счетчик,  $K$  – количество заказчиков, приславших заявки).

3. На основе исходных данных о потребностях заказчиков по формуле (10) вычисляются относительные потребности каждого заказчика  $\Delta b_k$ .

4. По формуле (9) вычисляются значения критериального показателя приведения к соответствию потребных и располагаемых ресурсов  $K_{un}^k$ .

5. Выполняется ранжировка значений  $K_{un}^k$  по возрастанию.

6. Производится итерационное удаление из рассмотрения потребности заказчика с наибольшим показателем  $K_{un}^k$ . При равенстве значений данного показателя у нескольких заказчиков исключаются те, у кого потребности выше. При равенстве потребностей – те, у кого относительная исправность больше. При равенстве значений относительной исправности заявки удовлетворяются в порядке очередности.

При этом на каждой итерации осуществляется проверка выполнения условия о том, что количество потребностей не должно превышать имеющиеся запасы. При снижении потребностей до уровня, не превышающего имеющихся запасов, удаление потребностей заказчиков прекращается.

Задача распределения ресурсов решается отдельно по каждому типу ресурса, соответственно, удаление потребностей заказчика идет по определенному типу ресурсов, которого не хватает у поставщиков, а не всех потребностей заказчика, обладающего наибольшим критерием. Это дает возможность удовлетворения данного заказчика по другим типам ресурсов.

После уменьшения потребностей заказчиков получаем новое множество истребованных ресурсов  $B$ .

7. При достижении значения величины потребностей ниже значения величины запасов появляется «излишек», заказ на который распределяется заказчику с наименьшим значением критериального показателя среди исключенных.

Применение предложенного алгоритма приведет к выполнению соответствия количества истребованных и имеющихся ресурсов. Это позволит соблюсти условия-ограничения задачи оптимального распределения ресурсов и максимально полно удовлетворить заявки заказчиков.

Целью решения данной задачи является определение стоимостной составляющей  $c_{lisk}$  оптимизируемого функционала  $W$  для решения задачи распределения ресурсов.

Необходимо определить маршруты доставки и получить значения стоимостей доставки по этим маршрутам.

Маршрут состоит из пункта отправления, пункта назначения и одного или нескольких участков пути. В искомым маршрутах пунктом отправления может быть только поставщик (склад поставщика), а пунктом назначения – только заказчик.

Для получения стоимостей маршрутов необходимо просуммировать стоимостные значения участков, составляющих данные маршруты:

$$c_{lisk} = \sum_{p=1}^P c_{plsk}, \quad (12)$$

где  $c_{lisk}$  – удельная стоимость доставки груза со склада  $s$  заказчику  $k$  в количестве, соответствующем диапазону  $l$ , руб./кг;

$c_{plsk}$  – стоимость доставки ресурсов по участку маршрута  $p, p \dots P$ , руб./кг;

$P$  – количество участков в маршруте.

Постановка задачи построения оптимальных маршрутов доставки выглядит следующим образом: имея множество складов и заказчиков, стоимостные и временные значения участков путей, соединяющих данные пункты, необходимо построить оптимальные маршруты доставки ресурсов со складов за-

казчикам с целью получения стоимостных характеристик данных маршрутов.

Информация о поставщиках, их складах, запасах складов, о стоимостных и временных характеристиках участков путей содержится в базе данных, поддерживаемой в актуальном состоянии ЦЛП.

Проведенный анализ показал, что наиболее приемлемым методом решения поставленной задачи является один из методов теории графов, называемый алгоритмом Флойда [2]. Критерий оптимальности зависит от значения приоритета заявки: «срочно», «несрочно».

Для заявок с приоритетом «срочно» критерием является минимум времени доставки. Для заявок с приоритетом «несрочно» критерием является минимум стоимости доставки, поэтому при решении задачи определения

маршрута доставки выбирается маршрут с минимальным значением стоимости доставки.

Основная идея алгоритма заключается в следующем. Пусть есть три вершины  $i, j, k$  и заданы расстояния между ними. Если выполняется неравенство  $A[i, k] + A[k, j] < A[i, j]$ , то целесообразно заменить прямой путь от вершины  $i$  к вершине  $j$  ( $i \rightarrow j$ ) путем, проходящим через вершину  $k$  ( $i \rightarrow k \rightarrow j$ ). Такая замена выполняется систематически в процессе выполнения данного алгоритма.

По завершению работы алгоритма Флойда получают две матрицы: матрицу длин кратчайших путей и матрицу вершин кратчайших путей. Данные матрицы содержат оптимальные значения весовых характеристик дуг.

На рисунке 2 представлена блок-схема алгоритма решения задачи построения оптимальных маршрутов доставки с использованием алгоритма Флойда.



Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма решения задачи построения оптимальных маршрутов доставки



Данный алгоритм состоит в следующем:

1. Необходимо обозначить граф, на котором будем применять алгоритм Флойда, то есть обозначить все вершины и дуги графа.

Для этого, на основании информации о местонахождении рассматриваемых заказчиков, складов и перевозчиков обозначаем все вершины графа.

Затем из базы данных получаем информацию обо всех существующих вариантах доставки, осуществляемых между полученными географическими объектами, и узнаём стоимостные и временные характеристики. Это позволит нам обозначить все существующие дуги графа.

2. Необходимо уйти от многократности дуг, связывающих вершины графа, так как для заполнения начальной матрицы весов дуг необходимо одно весовое значение между двумя вершинами. Для этого необходимо из множества дуг, связывающих две вершины, выбрать две дуги – самую быструю и самую дешевую, так как оптимальные маршруты строятся для «срочных» и «несрочных» заявок. Это подразумевает наличие двух матриц, которые будут обрабатываться при помощи алгоритма Флойда. Элементами одной матрицы являются минимальные продолжительности доставок, элементами второй матрицы – минимальные стоимости.

3. В заключение осуществляется обработка полученных матриц начальных весов алгоритмом Флойда с получением двух матриц для каждого рассматриваемого случая приоритета заявок: матрицы длин кратчайших путей и матрицы вершин кратчайших путей.

При этом для заявок с приоритетом «срочно» после решения задачи осуществляется получение стоимостных значений оптимальных по времени маршрутов. Получение данной информации осуществляется на основе матрицы вершин кратчайших путей, в которой хранится информация о входящих в данные маршруты участках.

В итоге имеем возможные маршруты доставки ресурсов, характеризующиеся оптимальным временем либо стоимостью доставки. Стоимостные значения полученных маршрутов будут использованы в целевой функции.

На заключительном этапе методики решается задача определения оптимального плана поставок на множестве возможных вариантов. Полученный план позволит затратить минимум средств на осуществление доставки и при этом затратить минимум времени. Необходимые входные данные для решения данной задачи получены на более ранних этапах методики:

- определены склады, с которых будет осуществляться доставка истребованных ресурсов;

- определены типы ресурсов, которые будут доставляться заказчикам с обозначенных складов и их количество;

- выбраны возможные маршруты доставки, для которых известны стоимостные и временные характеристики.

Кроме указанных данных необходимо учитывать стоимость ресурса как изделия. Каждый поставщик устанавливает стоимость ресурса самостоятельно. Эта информация хранится в базе данных центра логистической поддержки.

Соответственно, стоимость поставки складывается из стоимости ресурса как изделия и стоимости доставки данного ресурса:

$$C_{ilsk}^{ном} = C_{is}^{pec} + C_{lsk} m_i, \quad (13)$$

где  $C_{ilsk}^{ном}$  – стоимость поставки единицы материального ресурса  $i$ -го типа  $s$ -м поставщиком  $k$ -му заказчику при доставке количества ресурса, находящегося в границах диапазона  $l$ , руб.;

$C_{is}^{pec}$  – стоимость ресурса  $i$ -го типа у  $s$ -го поставщика, руб.;

$C_{lsk}$  – удельная стоимость доставки  $s$ -м поставщиком  $k$ -му заказчику груза массой, соответствующей диапазону  $l$ , руб./кг;

$m_i$  – масса ресурса  $i$ -го типа, кг.

Особенность решаемой задачи распределения ресурсов и отличие от подобных задач, решавшихся ранее, заключается в том, что она учитывает дискретную зависимость стоимости доставки от количества доставляемого

ресурса. Для этого в модели необходимо использовать определенные логические условия (принимающие значения «истинно» и «ложно»).

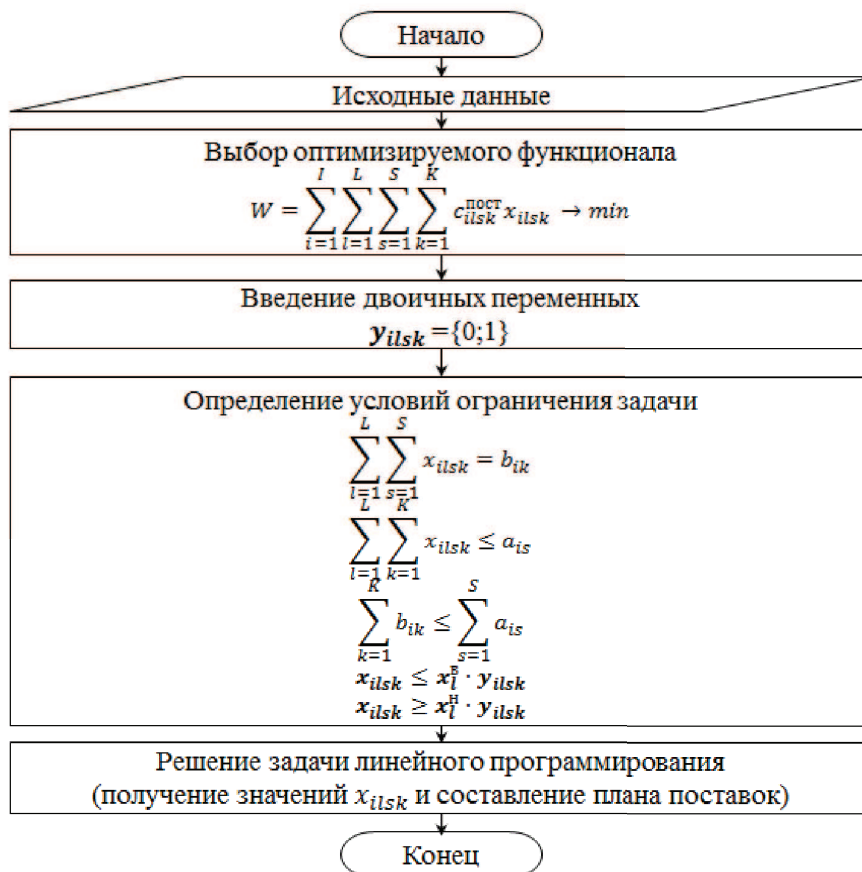


Рисунок 3 – Блок-схема решения задачи определения оптимального плана распределения заказов на ресурсы

Для решения задачи предлагается следующий алгоритм (блок-схема представлена на рисунке 3):

1. В соответствии с полученными на предыдущих этапах данными о стоимости оптимальных маршрутов необходимо построить матрицы стоимостей поставки для соответствующего множества выбранных диапазонов количества доставляемых ресурсов.

2. Выбрать оптимизируемый функционал решаемой задачи  $W$ , учитывающий минимизацию стоимости поставки ресурсов всем заказчикам ( $k$ ) по всем поставщикам ( $s$ ), типам

ресурсов ( $i$ ) и диапазонам количества доставляемого ресурса ( $l$ ):

$$W = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K c_{ilsk}^{nocm} x_{ilsk} \rightarrow \min, \quad (14)$$

где  $c_{ilsk}^{nocm}$  – стоимость поставки единицы материального ресурса  $i$ -го типа  $s$ -м поставщиком  $k$ -му заказчику при доставке количества ресурса, находящегося в границах диапазона  $l$ , руб.;

$x_{ilsk}$  – количество материального ресурса  $i$ -го типа, поставляемого  $s$ -м поставщиком  $k$ -му заказчику по расценкам, соответствующим диапазону  $l$ .

3. Ввести бинарные переменные, принимающие значения 0 или 1 в зависимости от того поставляется ли ресурс данному заказчику определенным поставщиком в каком-либо диапазоне количества доставляемого ресурса.

Обозначим данную переменную  $y$ . Данная переменная интерпретируется следующим образом:

если  $y_{ilsk} = 1$ , то поставка ресурса  $i$ -го типа  $k$ -му заказчику  $s$ -м поставщиком по расценкам на доставку, соответствующим диапазону  $l$ , производится;

если  $y_{ilsk} = 0$ , то поставка ресурса  $i$ -го типа  $k$ -му заказчику  $s$ -м поставщиком по расценкам на доставку, соответствующим диапазону  $l$ , не производится.

Таким образом, появляется матрица  $Y$ , соответствующая матрице количеств доставляемых ресурсов  $X$ .

4. Определить условия-ограничения решаемой задачи.

Первое условие-ограничение заключается в необходимости максимально полно удовлетворить заявки заказчиков по каждому поставляемому типу материальных ресурсов  $i$ , т.е. должно выполняться условие:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S x_{ilsk} = b_{ik}, \quad (15)$$

В соответствии со вторым ограничением суммарное количество  $i$ -го ресурса, поставляемое  $s$ -м поставщиком всем заказчикам, не должно превышать запаса ресурсов, имеющегося у данного поставщика:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K x_{ilsk} \leq a_{is}, \quad (16)$$

Согласно третьему условию-ограничению суммарное количество ресурса, истребованное всеми заказчиками, не должно превышать суммарного количества запасов, имеющихся у поставщиков:

$$\sum_{k=1}^K b_{ik} \leq \sum_{s=1}^S a_{is}, \quad (17)$$

Логические условия, позволяющие выбрать диапазон, реализуются путем добавления ряда условий-ограничений:

$$\begin{aligned} x_{ilsk} &\leq x_l^e y_{ilsk}, \\ x_{ilsk} &\geq x_l^h y_{ilsk}, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $x_l^e, x_l^h$  – соответственно верхняя и нижняя границы диапазона  $l$ .

Смысл данных ограничений заключается в том, что величина поставки, производимая по расценкам, соответствующим определенному диапазону количества доставляемого ресурса, должна находиться в пределах границ данного диапазона.

При  $y_{ilsk} = 1$ , то есть когда поставка производится, количество ресурса  $x_{ilsk}$  должно находиться в границах диапазона, то есть  $x_l^h \leq x_{ilsk} \leq x_l^e$ .

При  $y_{ilsk} = 0$  получаем следующие два неравенства  $x_{ilsk} \leq 0$  и  $x_{ilsk} \geq 0$ . Решением этих двух неравенств будет  $x_{ilsk} = 0$ , что означает, что поставка не осуществляется и условие-ограничение соблюдено.

Кроме того, в качестве ограничения необходимо указать, что логические переменные  $y_{ilsk}$  являются двоичными, т.е. принимают значения  $\{0, 1\}$ .

5. Имея все необходимые данные и условия, решаем оптимизационную задачу линейного программирования, применяя соответствующий математический аппарат.

Таким образом, имея необходимую информацию для решения задачи поиска оптимальных вариантов распределения заказов на материальные ресурсы и учитывая ограничения, накладываемые на решение, мы получим минимальное значение оптимизируемого функционала и соответственно оптимальный план доставки ресурсов со складов поставщиков эксплуатирующим частям (заказчикам).

Разработанная методика позволяет:

- снизить стоимость поставок ресурсов;
- уменьшить время организации поставок ресурсов;
- повысить уровень исправности АТ ВВС.

На основании полученных законов распределения количества заказчиков и количе-

ства типов ЗЧМ в типовом плане поставок определен средний экономический эффект от реализации одного плана поставок. Он составляет 37,6%.

Кроме экономического эффекта методика позволяет повысить оперативность организации поставок. Время организации поставок в системе ИЛП составляет 30 часов, что в 11 раз меньше, чем в существующей системе в соответствии с руководством по обеспечению запасными частями авиационной техни-

ки, простаивающей в неисправном состоянии из-за их отсутствия.

При проведении эксперимента по приведению к соответствию потребных и располагаемых ресурсов было установлено, что выбранный критерий позволяет увеличить количество эксплуатируемых частей с требуемой исправностью парка ВС в среднем на 2,5% за счет удовлетворения потребностей большего количества заказчиков.

#### **Список использованных источников**

1. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Наука, 1988.
2. Гервальд А.В. Построение оптимальных маршрутов доставки запасных частей в перспективной системе поставок. Информационно-измерительные и управляющие системы // Труды Военно-воздушной инженерной академии имени профессора Н.Е. Жуковского. Серия «Пилотажно-навигационные комплексы и авиационные электросистемы». – 2008. – № 2. – Т. 6.