

ОПЕРАЦИОННО-СИСТЕМНЫЕ ОСНОВАНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО КРИТЕРИЯМ СТОИМОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

А.И.Егоров
(г. Москва)

Задача оптимизации характеристик летательных аппаратов по таким объективным признакам их совершенства, как стоимость и эффективность, относится к той разновидности задач рационального планирования операций, где должны быть определены параметры технических средств, осуществляющих операцию. Роль этих параметров в рассматриваемой задаче играют характеристики, формирующие технико-экономический облик комплексов летательных аппаратов.

Комплекс летательных аппаратов (КЛА) представляет собой совокупность собственно летательных аппаратов со всеми их составными частями (планер, двигатели, бортовое снаряжение и полезный груз) и наземных сооружений, обслуживающих летательные аппараты (аэродромно-стартовый комплекс, станции наведения, сопровождения и др.). Исходя из операционного подхода к задаче, следует формировать смысловую (логическую), а затем для количественных исследований и математическую части модели операции таким образом, чтобы отразить не только направленность операции, но и цель рассматриваемого конкретного научного исследования. Это значит, что в рассматриваемом случае модель операции, охватывающая исследование количест-

венными методами, должна быть чувствительна („критична“) к характеристикам летательных аппаратов. Все вышеизложенное обусловило формирование следующего понятия исследуемой типовой операции.

Определение. Типовой операцией называется схема целенаправленного выполнения задания исследуемыми комплексами летательных аппаратов, поддающаяся количественным методам определения характеристик этих аппаратов и содержащая:

- 1) описание всех этапов выполнения задания;
- 2) описание схемы построения, состава, параметров и принципов работы комплексов летательных аппаратов;
- 3) описание условий, в которых действуют рассматриваемые комплексы;
- 4) указание на целесообразность параметрирования в исследовании количества комплексов летательных аппаратов, участвующих в операции, и количества вылетов, совершаемых каждым комплексом;
- 5) формулировку целевого назначения исследуемых комплексов;
- 6) функциональную зависимость показателей эффективности и стоимости типовой операции от:
 - а) количества комплексов, участвующих в операции;
 - б) количества вылетов, совершаемых каждым комплексом;
 - в) показателей эффективности и стоимости действия одного комплекса за один вылет.

Приведенный выше подход к рассматриваемой задаче обусловлен следующей общей схемой исследования операций с использованием летательных аппаратов (рис.1).

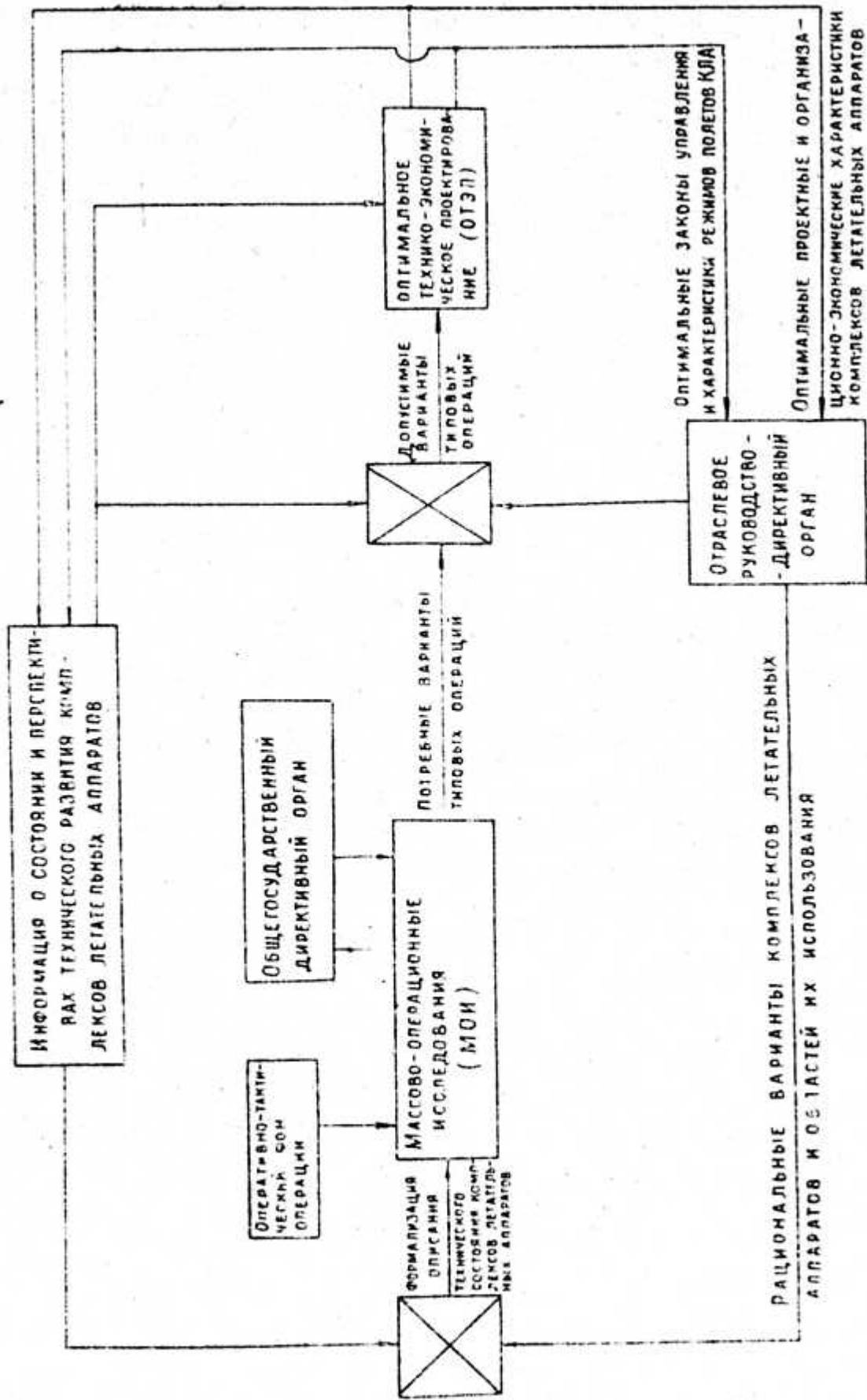


Рис.1. Общая схема исследования операций.

Как видно из этой схемы, процессу оптимизации характеристик летательных аппаратов соответствуют две взаимосвязанные стадии исследования.

1. На первой стадии (стадии массово-операционных исследований - МОИ), используя информацию об условиях действия летательных аппаратов (оперативно-тактический фон операции) и о состоянии и перспективах их технического развития, исследуют массовые операции (вплоть до взаимодействия государств в мировом масштабе) с разнородными техническими средствами (авиация, ракеты, автомобильный и железнодорожный транспорт, морской флот, речные суда и т.д.). Результаты этих исследований обуславливают формирование вариантов типовых операций, подлежащих рассмотрению на второй стадии исследования.

2. На второй стадии (стадии оптимального технико-экономического проектирования - ОТЭП) исследование вариантов типовых операций, сформированных на предыдущей стадии, приводит к определению оптимальных проектно-экономических параметров и характеристик режимов полета летательных аппаратов (геометрические размеры, веса, компоновки, размеры опытных партий, периоды производства, ресурсы элементов комплексов летательных аппаратов, траектории, законы управления и т.д.).

Таким образом, именно на этой стадии и определяется оптимальный технико-экономический облик комплексов летательных аппаратов и области их использования. Полученные количественные обоснования оптимальных решений поступают в отраслевой директивный орган, который производит выбор рационального варианта решения.

Это решение в свою очередь используется в процедуре исследования массовых операций с участием летательных аппаратов. При этом результаты массово-операционных исследований анализируются в общегосударственном директивном органе, формирующем задания на исследования и принимающем решения относительно рациональных направлений этих исследований.

В рассматриваемой схеме процесс исследования завершается, когда выбранный рациональный вариант технико-экономического решения приходит в соответствие с состоянием и перспективами развития комплексов летательных аппаратов.

Поскольку задача оптимизации характеристик летательных аппаратов, формирующих их технико-экономический облик, относится ко второй стадии исследования, рассмотрим ее подробнее.

Подробная схема процедуры определения рациональных характеристик комплексов летательных аппаратов по критериям эффективности и экономичности приведена на рис.2.

Весь процесс оптимального технико-экономического проектирования описывается следующим образом.

После того, как были сформулированы варианты типовых операций на основании анализа и обработки собранного статистического массива комплексов аппаратов-прототипов, производится формирование первого приближения компоновки, расчетных весовых, экономических и геометрических связей для исследуемых комплексов летательных аппаратов.

Эти связи используются в системе ограничений, входящих в составленную для исследуемой типовой операции математическую модель оптимизации характеристик летательных аппаратов по критериям стоимости и эффективности. После этого, используя схему учета надежности летательных аппаратов, осуществляют первое приближение процесса оптимизации; в результате — определяются численные значения проектно-экономических параметров и характеристик режимов движения летательных аппаратов. На основании этих значений осуществляется второе и т.д. последовательные приближения оптимизации, пока не будет достигнута с приемлемой точностью сходимости процесса.

Отметим, что в процессе этих приближений непрерывно совершенствуется математическая модель оптимизации технико-экономического облика комплексов летательных аппаратов.

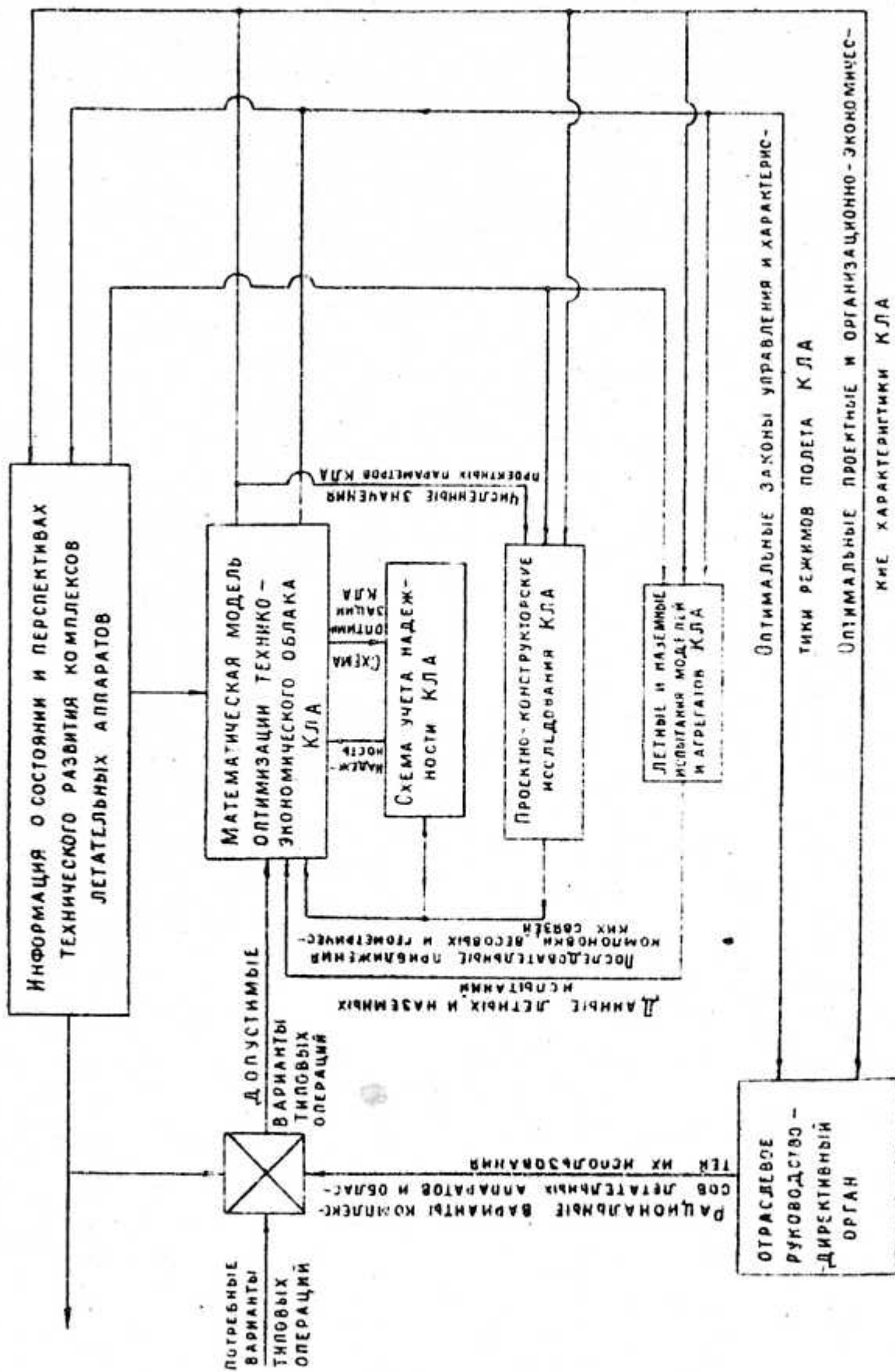


Рис.2. Схема процедуры определения рациональных характеристик комплексов летательных аппаратов.

Этому способствуют летные и наземные испытания масштабных и натурных моделей и агрегатов составных частей комплекса.

Результаты указанных испытаний позволяют сопоставить расчетные и экспериментальные значения параметров математической модели исследования. Среди этих параметров в первую очередь рассматриваются аэродинамические, прочностные и тепловые характеристики, характеристики двигателей и систем, входящих в исследуемый комплекс и др., что позволяет оценить и уровень полноты функциональных зависимостей, составляющих используемую математическую модель.

Таким образом, по результатам указанных испытаний непрерывно уточняются характеристики и схема математической модели оптимизации технико-экономического облика комплексов летательных аппаратов, составленной для исследуемой типовой операции.

Выше описывался процесс количественного обоснования выбора технико-экономического облика комплексов летательных аппаратов и областей их использования.

Само понятие решения - выбора является компетенцией отраслевого директивного органа, где, опираясь на количественные обоснования рациональных решений и на известные дополнительные данные (среди которых есть и не поддающиеся математической формализации), выбирают рациональный вариант решения.

Схемы рис.1 и 2 позволяют без труда установить кибернетически-системный характер процедуры определения рациональных характеристик и областей использования комплексов летательных аппаратов по критериям эффективности и экономичности.

Как известно, кибернетически система представляет собой совокупность элементов любого происхождения, которая рассматривается как связанное целое. При этом техническую кибернетику отличает относительность взгляда на систему в том смысле, что одна и та же совокупность элементов может рассматриваться с одной стороны как система, а с другой - как

часть некоторой большей системы, в которую она входит. Системный подход и термин „большая система“ введены в техническую кибернетику не с целью классификации систем (деления их на „большие“ и „небольшие“), а с целью выделения способа постановки и исследования задач, не позволяющего игнорировать тесную взаимосвязь между факторами, характеризующими состояние системы.

Системный подход характеризуется учетом участия в системе людей, машин, природной среды, наличием материальных и информационных связей между частями системы.

Отличительной особенностью больших систем является иерархичность их структуры, характеризуемая последовательным объединением частей системы (подсистем), каждая из которых содержит компоненты, наиболее тесно связанные друг с другом.

Легко увидеть, что схемам, приведенным на рис.1 и 2, присущи все указанные выше отличительные признаки больших систем.

Действительно, процесс оптимального технико-экономического проектирования (ОТЭП) является, с одной стороны, составной частью большой системы, изображенной на рис.1, а с другой – сам представляет собой большую систему (рис.2). При этом ОТЭП, как большая система, характеризуется тесной связью подсистемы оптимизации характеристик комплексов летательных аппаратов по критериям экономичности (стоимости) и эффективности с подсистемой проектных исследований.

Участие людей в системах (рис.1 и 2) очевидно; причем процессы проектирования и принятия решений отраслевым и общегосударственным директивными органами следует пока полагать математически не формализуемыми.

Иерархичность структуры приведенных больших систем проявляется уже в том, что подсистемы математического моделирования, надежности и типовых операций объединяются в систему более высокого ранга,

решающую общую задачу оптимизации характеристик комплексов летательных аппаратов по критериям экономичности (стоимости) и эффективности.

При этом каждая из этих подсистем, самостоятельно решая свои локальные задачи, совместно с другими подсистемами того же ранга решает общую задачу оптимизации, соответствующую системе более высокого ранга, составленной подсистемами математического моделирования, надежности и типовых операций.

Важнейшую сторону оптимального технико-экономического проектирования комплексов летательных аппаратов по критериям экономичности (стоимости) и эффективности составляет исследование планирования и оперативного управления соответствующими работами, укрупненно моделируемыми конечным ориентированным графом, который приведен на рис.3 и соответствует схеме рис.2.

Работы, составляющие указанный граф оптимального технико-экономического проектирования, количественно характеризуются временем и затратами (стоимостью) необходимыми для выполнения каждой из них.

Это открывает возможность использовать граф оптимального технико-экономического проектирования для решения таких задач.

а. Анализ временных характеристик графа заданной структуры для определения такой продолжительности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, которая удовлетворит заданному ограничению на время создания исследуемого комплекса

($T_{созд}$), участвующему в математической модели рассматриваемой типовой операции ($T_{созд} \leq T_{пред}$), где $T_{пред}$ - предельное значение времени создания комплекса.

б. Анализ стоимостных характеристик графа заданной структуры, для определения затрат на научно-исследовательские ($C_{НИР}$) и опытно-конструкторские работы ($C_{ОКР}$), входящих в стоимость исследуемой типовой операции.

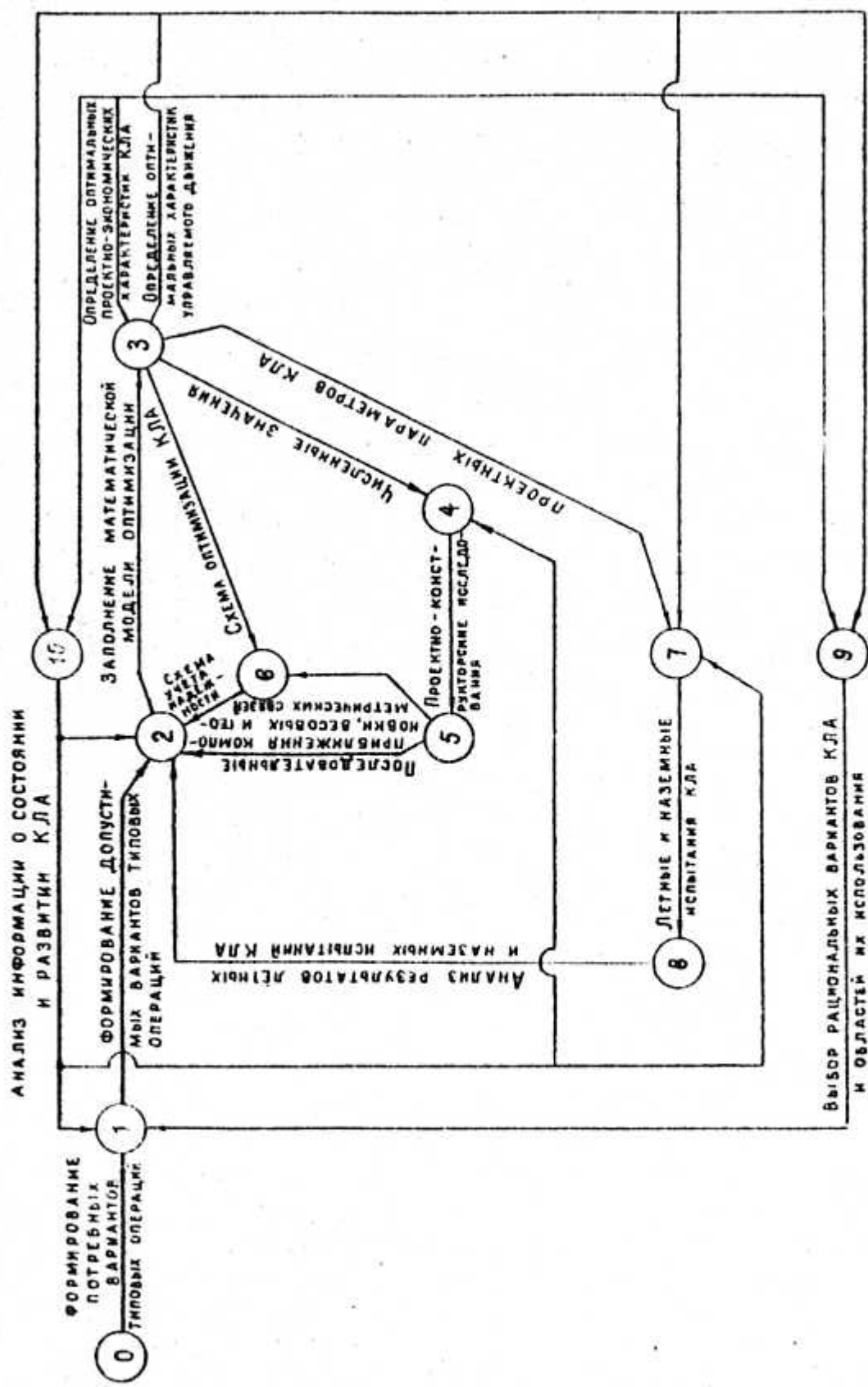


Рис.3. Граф работ по определению рациональных характеристик летательных аппаратов и областей их использования.

в. Синтез количественных характеристик и структуры графа для определения оптимального технико-экономического обмена комплексов летательных аппаратов и областей их использования.

В целом формализм оптимального технико-экономического проектирования летательных аппаратов может быть описан следующим образом.

Рассмотрению подлежит комплекс летательных аппаратов (КЛА) – физическая система N , состояние которой – вектор S – в типовой операции описывается определенным множеством параметров. Это множество содержит, с одной стороны, совокупность параметров, характеризующих режимы движения (координаты, скорость, углы наклона вектора скорости в пространстве и т.д.), и с другой – совокупность параметров, характеризующих проектный и организационно-экономический облик КЛА (геометрические размеры, абсолютные и относительные веса составных частей и всего аппарата в целом, размеры опытных партий, периоды производства и т.д.). Параметры, входящие в первую совокупность и образующие вектор $Y = \{y_1, \dots, y_p, \dots, y_n\}$, назовем, как это обычно принято, фазовыми координатами, а параметры, входящие во вторую совокупность и образующие вектор Π , – проектно-экономическими параметрами.

Процесс изменения состояния S управляем, т.е. существует совокупность воздействий – вектор $U = \{u_1, \dots, u_k\}$, называемый управлением, с помощью которой можно изменять S .

Управление определяется углами атаки, скольжения, крена, тягой двигателей и параметрами, характеризующими разделение ступеней аппарата (число M и высота полета в момент разделения). С процессом изменения состояния системы N в типовой операции связана наша заинтересованность в наиболее успешном выборе вектора Π и изменения во времени (t) вектора Y , выражающаяся количественно с помощью критериев оптимальности, роль которых играют показа-

тель экономичности типовой операции (C) и показатель эффективности типовой операции (I) . Для определенности полагаем, что чем меньше C и больше I , тем выше совершенство КЛА.

Показателем экономичности является стоимость исследуемой типовой операции, определяемая стоимостью разработки, серийного производства и эксплуатации исследуемого комплекса воздушно-космических летательных аппаратов и зависящая как от количества комплексов, участвующих в операции, так и от количества вылетов каждого комплекса.

Поскольку в настоящее время не существует математических методов оптимизации по более чем одному критерию оптимальности, дальнейшее изложение предполагает использование в качестве критерия оптимальности показателя экономичности с ограничением снизу показателя эффективности типовой операции $(I \geq I_{пред}, \text{ где } I_{пред} = \inf I)$.

В качестве показателя эффективности типовой операции могут быть использованы вероятность выполнения задания или математическое ожидание причиненного (предотвращенного) ущерба. При этом $I = I(S, U)$.

Необходимо так сформировать вектор Π и изменение с помощью вектора U во времени вектора Y (что определит в каждый момент времени вектор состояния S), чтобы величина C стала минимальной.

При этом должны быть соблюдены „дисциплинирующие“ условия, налагающие ограничения на область допустимых решений (ограничения на показатель эффективности типовой операции и время создания исследуемого комплекса, на фазовые координаты, на проектно-экономические параметры и управление, на характер кинематики маневрирования, на перегрузки и тепловое воздействие, тактические ограничения и т.д.).

В указанном смысле найденное решение является оптимальным.

Математическая модель типовой операции состоит из системы связей, содержащей:

уравнения движения и расхода массы аппарата:

$$\dot{y}_i = \varphi_i(y_1, \dots, y_p, \Pi_1, \dots, \Pi_m, u_1, \dots, u_k, t), \quad i=1, \dots, r \quad (r < p); \quad (1)$$

дисциплинирующие условия:

$$\left. \begin{aligned} F_j(y_1, \dots, y_n, \Pi_1, \dots, \Pi_m, u_1, \dots, u_k, t) &= 0, \quad j=r+1, \dots, p, \dots, n, \dots, n+d \\ \Phi_\ell(y_1, \dots, y_n, \Pi_1, \dots, \Pi_m, u_1, \dots, u_k, \bar{S}_1, \dots, \bar{S}_\pi, t) &\leq 0, \quad \ell=n+d+1, \dots, n+d+\beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь $\bar{S}_1, \dots, \bar{S}_\pi$ — предельные значения параметров, входящих в зависимости (1) + (2), и величин, зависящих от этих параметров.

Оптимизация осуществляется по стоимости исследуемой типовой операции:

$$C = C(S, U) \quad (3)$$

Отметим, что многомерность рассматриваемой задачи и необходимость удовлетворять множеству достаточно сложных ограничений обуславливают, как показывает вычислительная практика, безусловное преимущество прямых методов оптимизации технико-экономического облика комплексов летательных аппаратов.

В результате оптимизации по приведенной выше математической модели формируются зависимости минимальной стоимости исследуемой типовой операции от показателя ее эффективности при использовании рассматриваемых комплексов летательных аппаратов.

Эти зависимости позволяют установить области рационального использования оптимальных комплексов таких аппаратов.

В заключение остановимся на том частном случае общей схемы оптимального технико-экономического проектирования комплексов летательных аппаратов, каким является схема оптимизации облика транспортных самолетов.

Этот случай заслуживает специального рассмотрения из-за специфичности математической модели исследования. Чтобы математически формализовать задачи оптимизации технико-экономического облика транспортных самолетов, целесообразно обратиться к распределительной схеме транспортной операции, достаточно известной в линейном программировании.

Как известно, последняя формализуется следующим образом.

Необходимо минимизировать критерий стоимости перевозок $C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij}$ при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_{ij} \geq b_j \quad (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m);$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = N_i;$$

- Здесь $x_{ij} \geq 0$ (x_{ij} — целые числа).
- x_{ij} — количество самолетов i -го типа на j -й трассе;
 - c_{ij} — стоимость использования одного самолета i -го типа на j -й трассе за рассматриваемый календарный период;
 - a_{ij} — объем грузо (пассажиро-) перевозок самолета i -го типа на j -й трассе за рассматриваемый календарный период;
 - b_j — заданный объем перевозок на j -й трассе за рассматриваемый календарный период;
 - N_i — парк самолетов i -го типа;
 - m — число трасс;
 - n — число типов самолетов.

Представим c_{ij} и a_{ij} таким образом:

$$c_{ij} = A_{ij} K_{ij} W ;$$

$$a_{ij} = K'_{ij} G_{KH_i} \frac{K_{ij} W}{2 \frac{L_j}{V_{P_{ij}}} + t'_{ij} + \left(\frac{L_j}{L_i} \right) t''_{ij}}$$

Здесь $A_{ij} = A_{ij} (Q_{ср\ ij}, P_i, G_{пуст.\ ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}, n_{эк\ i}, n_{борт\ i}, C_{xi}, C_{yi},$

$H_{п\ ij}, L_{P_i}, L_{пр\ i}, C_{Ti}, \dots)$ - часовые затраты на использование самолета i -го типа на j -й трассе;

K_{ij} - коэффициент налета часов самолета i -го типа на j -й трассе за календарный период;

W - фонд рабочего времени самолета;

K'_{ij} - коэффициент использования коммерческой нагрузки самолета i -го типа на j -й трассе;

G_{KH_i} - коммерческая нагрузка самолета i -го типа;

L_j - протяженность j -й трассы;

$V_{P_{ij}} = V_{P_{ij}} (P_i, G_{пуст\ i}, G_{KH_i}, G_{Ti}, C_{xi}, C_{yi}, H_{п\ ij}, \Delta t_{ij})$ - рейсовая скорость самолета i -го типа на j -й трассе;

t'_{ij} - потери времени за один рейс на стоянках в конечных пунктах рейса;

$L_i = L_i (P_i, G_{пуст\ i}, G_{KH_i}, C_{Ti}, C_{xi}, C_{yi}, H_{п\ ij})$ - практическая дальность самолета i -го типа;

t''_{ij} - потери времени за один рейс на стоянках в пунктах промежуточных посадок на j -й трассе;

- $Q_{срj}$ - часовой расход топлива самолета i -го типа на j -й трассе;
- P_i - суммарная тяга двигателей самолета i -го типа;
- $G_{пустi}$ - вес пустого самолета i -го типа;
- α_{ij} - часовая стоимость амортизации и текущего ремонта двигателей самолета i -го типа на j -й трассе;
- β_{ij} - часовая стоимость амортизации и текущего ремонта i -го самолета (с оборудованием) на j -й трассе;
- $n_{эки}$ - число членов экипажа на самолете i -го типа;
- $n_{бортi}$ - число бортопроводников на самолете i -го типа;
- C_{xi} - коэффициент силы сопротивления самолета i -го типа на крейсерском режиме;
- C_{yi} - коэффициент подъемной силы самолета i -го типа на крейсерском режиме;
- $H_{пij}$ - высота полета самолета i -го типа на j -й трассе;
- L_{pi} - длина разбега самолета i -го типа;
- $L_{ппi}$ - длина пробега самолета i -го типа;
- C_{Ti} - цена топлива, используемого на самолете i -го типа;
- G_{Ti} - запас топлива самолета i -го типа;
- Δt_{ij} - потери времени на маневрирование самолета i -го типа на j -й трассе при взлете и посадке.

Вводя в вышеприведенную схему ограничения на фазовые координаты (y_1, \dots, y_r) и проектно-экономические параметры ($П_1, \dots, П_k$) в соответствии с описанной ранее общей схемой оптимизации технико-экономического облика комплексов летательных аппаратов, получаем модель задачи:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij} K_{ij} W x_{ij} \rightarrow \min ,$$

$$\sum_{i=1}^n K'_{ij} G_{KH_i} \frac{K_{ij} W}{2 \frac{L_j}{V_{P_{ij}}} + t'_{ij} + \left(\frac{L_j}{L_i} \right) t''_{ij}} x_{ij} \geq \beta_j \quad (j=1, \dots, m),$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = N_i \quad (i=1, \dots, n),$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (x_{ij} - \text{целые числа}) ,$$

$$\Phi_\ell (y_1, \dots, y_r, \Pi_1, \dots, \Pi_k, \bar{S}_1, \dots, \bar{S}_\Pi) \leq 0 \quad (\ell=1, \dots, \beta).$$

Оптимизируемыми параметрами в рассматриваемой задаче являются величины:

$$G_{KH_i}, t'_{ij}, t''_{ij}, Q_{срj}, P_i, G_{пуст_i}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}, n_{эки}, \\ n_{борг_i}, C_{x_i}, C_{y_i}, L_{P_i}, L_{np_i}, H_{пij}, \Delta t_{ij} .$$

Как видно из этой модели, рассматриваемая задача редуцировалась в задачу нелинейного программирования с нелинейными ограничениями и критерием оптимальности.

Невыпуклость критерия оптимальности и ограничений на область допустимых решений не дает возможности использовать известные методы выпуклого нелинейного программирования.

В качестве первого приближения к решению исходной задачи нелинейного программирования может

быть использовано сведение исходной задачи к конечному множеству распределительных задач линейного программирования. При этом используется то обстоятельство, что допустимые значения оптимизируемых параметров лежат в пределах известных конечных диапазонов. Поэтому каждая распределительная задача линейного программирования характеризуется своими фиксированными значениями искомым технико-экономических характеристик, лежащими в известном конечном диапазоне значений последних.

Точность найденного решения, естественно, определится интервалами разбиения заданных диапазонов искомым параметров на конечное множество значений параметров, лежащих в заданных диапазонах.

Дальнейшее совершенствование вычислительных методов решения рассматриваемой задачи представляется возможным с использованием принципов параметрического линейного программирования [3], а в дальнейшем – и с разработкой методов решения выпуклых задач нелинейного программирования.

З а к л ю ч е н и е

Представлена схема оптимального технико-экономического проектирования комплексов летательных аппаратов по критериям стоимости и эффективности типовых операций, основывающаяся на операционно-системном подходе к задаче.

Приведены кибернетические основания системного рассмотрения процедуры определения рациональных характеристик и областей использования комплексов летательных аппаратов.

Описана математическая модель оптимизации технико-экономического облика комплексов летательных аппаратов.

Показано, что в случае оптимизации комплексов транспортных самолетов возникает задача нелинейного программирования и предложены пути ее решения.

Л и т е р а т у р а

1. Ф.М.Морз, Д.К.Кимбелл, Методы исследования операций, изд-во „Советское радио“, М., 1965.
2. Г.Х.Гуд, Р.Э.Макол, Системотехника, введение в проектирование больших систем, изд-во „Советское радио“, М., 1962.
3. С.И.Зуховицкий, Л.Н.Авдеева, Линейное и выпуклое программирование, изд-во „Наука“, М., 1964.
4. А.И.Егоров, Особенности задачи оптимизации характеристик воздушно-космических летательных аппаратов (ВКЛА) по показателю стоимость-эффективность, журн. „Кибернетика“ (в печати).
5. А.Я.Лернер, Начала кибернетики, изд-во „Наука“, М., 1967.

Доложено на семинаре 9.II 1968 г.