

## МЕТОД «ЗАТРАТЫ — ЭФФЕКТИВНОСТЬ»

(Обзор)

С. Д. Б Е Ш Е Л Е В

(Москва)

Процесс создания новой техники можно разделить на два основных этапа: выбор и разработку. На первом этапе решается, какое техническое средство необходимо создать, на втором — техническое средство проектируется, изготавливается и вводится в эксплуатацию.

Выбор проектов новой техники связан с будущим, а следовательно, с неопределенностью в отношении ценности конечного результата, сроков разработки и величины затрат. Очень часто новая техника в начальный период ее использования уступает по своим экономическим характеристикам старой. Кроме того, в любой области науки и техники существуют проблемы, при решении которых нельзя ориентироваться лишь на экономические расчеты ввиду многообразия факторов, определяющих эти проблемы, или вследствие того, что некоторые из факторов не могут быть измерены количественно.

Недооценка особенностей этапа выбора новой техники и попытки ориентироваться лишь на «точные» показатели явились причиной ряда неудач при создании новых технических средств за рубежом [1]. Это повлекло за собой усиление внимания к этапу выбора и формулированию новых подходов к проблемам планирования новой техники.

Метод «затраты — эффективность»\*, разработанный специалистами корпорации РЭНД в США, в последнее время широко используется для выбора проектов новой техники, а также как средство для непрерывной оценки программ ее создания и эксплуатации.

В начале 60-х годов этот метод был положен в основу анализа и выбора всех военных систем в США, а в настоящее время внедряется в практику многих министерств и ведомств не только в США, но и в ряде стран Западной Европы. Отмечается, что решения, полученные с помощью этого метода, обладают значительно большей достоверностью, чем при использовании традиционных методов [2].

В ряде работ американских авторов содержатся и критические замечания. В частности, что слишком большой оптимизм в отношении метода «затраты — эффективность» является «чрезмерной реакцией на отсутствие подобных исследований в предыдущий период» [3].

Не анализируя справедливость подобной оценки, необходимо отметить, что в ряде случаев применение метода характерно попыткам заменить социально-экономический анализ формальными логическими и математическими построениями. Несмотря на этот недостаток, присущий многим работам буржуазных экономистов, критическое ознакомление с широко применяемым за рубежом методом представляет для советских специалистов несомненный интерес.

\* В отечественной литературе используются также термины: метод «стоимость — эффективность» и «функционально-стоимостный метод».

## 1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА «ЗАТРАТЫ — ЭФФЕКТИВНОСТЬ»

Рациональное распределение и использование ресурсов всегда было важной проблемой экономической теории. Вместе с тем до последнего времени редко предпринимались попытки применить эту теорию для достижения наибольшей эффективности в условиях, когда нельзя ограничиваться расчетом прибыли или экономического эффекта.

Оценка эффективности перспективных технических устройств связана не только с проблемой рационального распределения ресурсов, но и с проблемой прогнозирования научно-технического развития. Каждая из этих проблем таит в себе ряд неопределенностей, затрудняющих принятие решений, однако ясно, что если работа по созданию новой техники базируется на реальных задачах и ресурсы распределены надлежащим образом, вероятность того, что результаты работы будут иметь ценность в будущем, значительно возрастает.

Отсутствие надежных критериев для технико-экономической оценки перспективных проектов создало ряд трудностей. Анализ, сделанный в 50-х годах в США, показал, что время, фактически затрачиваемое на создание технических систем, в 1,4 раза превышало намеченные сроки, а действительные затраты денежных средств были в 1,7—3,2 раза больше запланированных [4]. Как правило, недооценивалась взаимосвязь решаемой задачи со смежными задачами или с задачами более высокого уровня. Очень часто решения о выборе были основаны на соображениях второстепенного порядка таких, например, как сохранение существующей экономической структуры или желание поскорее добиться результатов, которые уже достигнуты за рубежом [5].

Недооценка важности проблемы получения надежных критериев выбора явилась одной из причин того, что ряд новых военных систем в США оказались неэффективными и их разработка была прекращена после того, как на эти цели уже было израсходовано около 6,3 млрд. долл. [6].

Нахождение правильного критерия, позволяющего отыскать лучший вариант решения, — важная проблема этапа выбора. Ни затраты, ни эффективность сами по себе не являются достаточным критерием для выбора системы.

В ряде случаев, когда выбор не может быть сделан однозначно на основе экономических критериев, необходимо анализировать альтернативные варианты решений на базе критериев, обеспечивающих расчет относительной ценности каждого из вариантов. При выборе наилучшего варианта нельзя исходить из предположения о получении максимальных результатов при минимальных затратах. Принимаемые решения здесь должны быть основаны на выборе так называемых «предпочтительных» вариантов, т. е. таких, когда все остальные являются чрезмерными с точки зрения затрат или недостаточными в смысле обеспечения получаемых выгод [7].

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА «ЗАТРАТЫ — ЭФФЕКТИВНОСТЬ»

Разнообразие технических систем и ситуаций, в которых они используются, не дает возможности применить единый критерий для всех случаев анализа. В общем случае под эффективностью понимается некий положительный результат, полученный при решении поставленных задач. Выгоды, которые дает технический прогресс, связаны или с уменьшением затрат или с более высокими характеристиками новой техники по сравнению со старой, поэтому при решении проблем выбора необходим комплексный

подход, обеспечивающий анализ всех основных технических и экономических характеристик новой техники.

Каждое техническое устройство или система устройств представляет собою одну из многих комбинаций технических и эксплуатационных параметров, обеспечивающих определенные выходные характеристики, а следовательно, и определенный уровень эффективности. Изменение характеристик системы, обусловленное различными комбинациями ее параметров, отражается не только на уровне эффективности, но и на величине необходимых затрат. Поэтому главной задачей анализа по методу «затраты — эффективность» является установление последовательных зависимостей между техническими параметрами системы, ее характеристиками, эффективностью и затратами.

Основные этапы этого анализа могут быть в общем случае сведены к следующему [8]: 1) определение внешних условий, при которых должна функционировать система; 2) подбор предполагаемых вариантов систем; 3) установление критерия для оценки эффективности выходных характеристик системы; 4) формулирование модели характеристик; 5) формулирование модели затрат; 6) сопоставление затрат и эффективности.

В общей форме основные этапы такого анализа могут быть представлены в виде ряда соотношений. Например, уравнение

$$P = f(B) \quad (1)$$

показывает, что для любого из вариантов известных нам внешних условий технические параметры системы  $P$  являются функцией определенной характеристики, выбранной из ряда  $B$ .

Поскольку эффективность  $E$  зависит от технических параметров, она также будет функцией характеристик. Следовательно,

$$E = g(P), \quad (2)$$

откуда эффективность может быть представлена в виде

$$E = g[f(B)] \quad (3)$$

и сведена к

$$E = h(\{B\}). \quad (4)$$

Формулирование модели затрат также заключается в нахождении математических зависимостей между характеристиками системы и затратами

$$C = m(\{B\}). \quad (5)$$

Поскольку эффективность  $E$  также является функцией  $B$ , затраты и эффективность для любой технической системы с данной комбинацией характеристик могут анализироваться комплексно.

Предположим, что эффективность  $E$  для какой-либо системы определяется комбинацией ее характеристик  $B$ . Тогда, если имеется несколько таких характеристик, проблема получения наибольшей эффективности сведется к максимизации  $E(B_1, \dots, B_n)$ . Однако до тех пор, пока не существует каких-либо ограничений, априорно ничего нельзя сказать о максимальном значении эффективности.

Одним из таких ограничений может быть бюджет. Тогда при заданном уровне затрат находится максимально возможный уровень эффективности. Задачу выбора наилучшего варианта системы можно решать и другим способом: задаться определенным уровнем эффективности и искать наиболее экономичный способ ее достижения. Такой путь решения более сложен. В самом деле, если система I более эффективна, чем система II, а так-

же и более дорогостояща, невозможно заранее сказать, будут ли эффективны еще более высокие затраты или оптимум будет где-то посередине. Но если стоимости систем I и II одинаковы, то, несомненно, система с более высокой эффективностью будет предпочтительней.

Когда имеется больше двух альтернативных вариантов, одним из способов решения задачи выбора может быть построение графика «стоимость — эффективность» [9]. Зависимость между стоимостью и эффективностью показана на графике в виде точек (рис. 1).

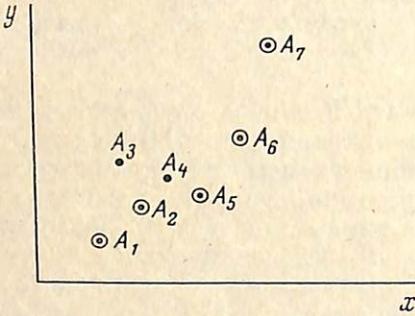


Рис. 1. График «стоимость ( $y$ ) — эффективность ( $x$ )»

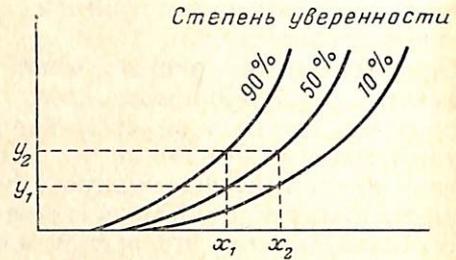


Рис. 2. Соотношение между затратами ( $y$ ) и характеристиками ( $x$ ) при различной степени уверенности (в %)

Стоимость и эффективность каждой системы сопоставляются попарно, при этом ставится цель определить наиболее эффективную систему из систем с одинаковой стоимостью и систему с минимальной стоимостью из систем с одинаковой эффективностью. Например, система  $A_3$  не рассматривается, поскольку  $A_2$  стоит меньше и более эффективна. Системы  $A_4$  и  $A_5$  также имеют более высокую эффективность, чем  $A_3$ . Точно так же  $A_4$  не рассматривается, поскольку эффективность  $A_5$  выше.

Если после исключения  $A_3$  и  $A_4$  снова рассматривать оставшиеся пары систем, то уже невозможно найти две системы, из которых одна была бы более эффективна и стоила меньше, чем другая. Таким образом, оставшиеся пять систем должны быть представлены на рассмотрение лицу, принимающему окончательное решение.

Если в качестве критерия выбрать минимальное отношение стоимости к эффективности, то должна быть выбрана система  $A_5$ . Это можно видеть, если провести прямые между началом координат и точками, соответствующими каждой системе. Прямая, образующая минимальный угол с осью эффективности, соответствует минимальному отношению стоимости к эффективности. Однако использование отношения стоимости к эффективности не всегда возможно.

Так, это отношение нельзя использовать, когда большая стоимость системы обеспечивает ее более высокую эффективность, но при дальнейшем увеличении затрат выигрыш в эффективности становится меньше. В этих случаях при использовании критерия отношения стоимости к эффективности, выбор падает на систему с меньшей стоимостью. Более правильным подходом в этом случае будет такой, когда сопоставляются дополнительные затраты и прирост эффективности.

Практика показывает, что после определенной величины затрат часто наступает «насыщение», когда дополнительные затраты не дают практически заметного улучшения характеристик системы. Тогда вводится показатель степени риска. На рис. 2 показана такая зависимость [10]. Пользуясь

кривыми (рис. 2), можно выбрать определенное соотношение между затратами и характеристиками. Так, если  $x_1$  — определенная величина характеристик, обеспечивающая требуемую эффективность техники, а  $y_1$  — величина затрат, необходимых для обеспечения этих характеристик, то ясно, что достаточно 50% уверенности (степень риска 0,5), чтобы требования были выполнены. Более активная деятельность, которая обеспечивается затратами  $y_2$  ( $y_2 > y_1$ ), проводится, когда необходимо повысить степень уверенности получения характеристик  $x_1$  или для того, чтобы на том же самом уровне риска получить более высокие характеристики создаваемой техники.

Когда существует определенная, локальная зависимость между затратами и эффективностью, обычно выявляются предпочтительные значения каждой характеристики для каждого уровня эффективности. Значение считается предпочтительным, если все другие значения этой переменной или чрезмерны с точки зрения затрат или недостаточны для обеспечения заданного уровня эффективности.

На рис. 3 показана зависимость между затратами и эффективностью, с одной стороны, и частным значением характеристики, с другой. Для каждого уровня эффективности  $E$  предпочтительные значения переменной определяются точками  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$ . Это точки минимальных затрат, необходимых для достижения каждого уровня эффективности. Они определяют предпочтительный диапазон значений переменной (от  $v_i$  до  $v_{i_2}$ ) для всех рассматриваемых уровней эффективности и для заданного ряда значений всех других переменных.

Точки минимальных затрат  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  могут быть представлены в виде другого графика (рис. 4). Здесь для переменной  $v_i$  кривая  $R_i$  определяет минимальные затраты для достижения заданных уровней эффективности. Кроме того, любая комбинация затрат и эффективности, определяемая кривой  $R_i$ , представляет систему, в которой значение переменной  $v_i$  ограничено в диапазоне от  $v_{i_1}$  до  $v_{i_2}$ . Такая кривая может быть построена для любой переменной при условии использования заданного ряда значений для остальных переменных.

На рис. 4, например, показаны еще две кривые  $R_j$  и  $R_k$ , каждая из которых представляет минимальные затраты в функции заданной эффективности для двух других переменных  $v_j$  и  $v_k$ .

Каждая группа точек, используемая для оценки кривых, определяющих значение  $P$ , устанавливается путем итерации. Во время этого процесса каждое значение  $P$  рассматривается в сравнении с другими переменными для того, чтобы можно было определить предпочтительные значения. «Жирная» кривая показывает значение решения, на основании которого должны быть выбраны расчетные характеристики предпочтительной системы; она обеспечивает количественную базу для выбора оптимальной системы с учетом ограничений в ресурсах.

В пределах диапазона значений характеристик кривая определяет уровень эффективности любой из возможных систем, соответствующие затраты на эту систему и показывает, как каждое дискретное приращение характеристики влияет на эффективность. Используя эту кривую, можно определить затраты на любое улучшение системы.

Один из путей решения задачи выбора технических систем, различающихся по затратам и эффективности, — оценка их дифференцированного вклада в решение поставленных задач. Практика показывает, что подобный сравнительный анализ систем, направленный на определение их комплексного вклада в достижение установленных целей, дает существенно лучшие результаты, чем использование ограничений в ресурсах или в эффективности [4].

В этом случае все альтернативные варианты систем прежде всего должны быть оценены по их относительной ценности с точки зрения достижения поставленных целей [11]. Предполагается, что существует известная система параметров  $\{j = 1, 2, \dots, n\}$ , которые играют существенную роль в достижении целей, а также система оценок (весов)  $\{w_j: j = 1, 2, \dots, n\}$ ,

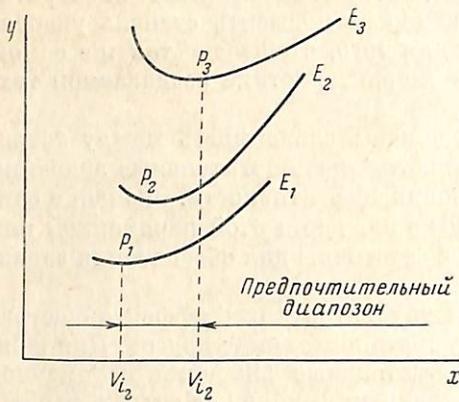


Рис. 3. Зависимость между затратами ( $y$ ), эффективностью ( $E$ ) и меняющейся характеристикой ( $x$ )

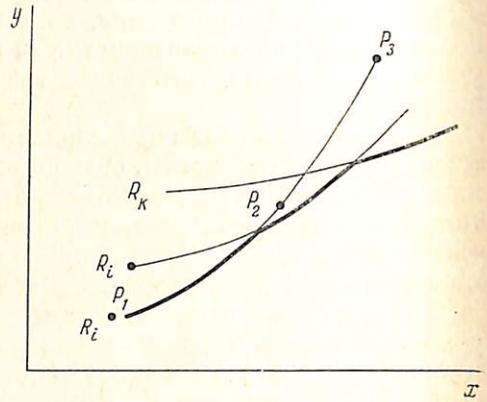


Рис. 4. Выбор предпочтительных значений характеристик (где  $y$  — затраты,  $x$  — эффективность)

которые соответствуют параметрам и являются мерами их относительной важности, т. е. успеха в достижении целей

$$\begin{aligned} 0 \leq w_j \leq 1, \\ \sum_{j=1}^{j=n} w_j = 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Трудности оценки относительной важности или ценности вариантов очевидны, но поскольку во многих случаях не существует другого пути решения проблемы выбора, эти трудности не должны являться причиной отказа от количественного сравнения альтернатив.

Рассмотрим систему из  $m$  проектов  $\{i = 1, 2, \dots, m\}$ .

Предполагается, что значение  $j$ -го параметра по отношению к  $i$ -му проекту задается величиной  $y_{ij}$ , где можно заменить систему  $mn$  значений матриц типа  $m \times n$ . Считая, что параметры модели аддитивны, общую весовую оценку проекта  $W_i$  можно представить в виде

$$W_i = \sum_{j=1}^{j=n} w_j y_{ij}. \quad (7)$$

Предположим далее, что существует ограничение в ресурсах, которое задается для  $i$ -го проекта величиной  $m_i$ , а общий резерв ресурсов равен  $M$ . Тогда задача выбора проектов сводится к

$$\max_{x_i} \left\{ \sum_{i=1}^{i=n} x_i W_i \right\} \quad (8)$$

при условии, что  $x_i = 0$  или  $1$ ,

$$\sum_{i=1}^{i=m} x_i m_i \leq M. \quad (9)$$

Величина  $x_i$  равна 1 или 0 в зависимости от того, выбран или нет  $i$ -й проект соответственно.

Предположим, что имеются две группы существенных параметров, например, технические и коммерческие. Тогда общая весовая оценка  $W_i$  может быть записана в виде

$$W_i = W_{i'} + W_{i''} = a \sum_j w_j y_{ij'} + b \sum_k w_k y_{ik''}, \quad (10)$$

где  $W_i$  — общая весовая оценка  $i$ -го проекта;  $W_{i'}$  — техническая оценка  $i$ -го проекта;  $W_{i''}$  — коммерческая оценка  $i$ -го проекта;  $w_j$  — вес  $j$ -го технического параметра;  $w_k$  — вес  $k$ -го коммерческого параметра;  $y_{ij'}$  — значение технического параметра  $j$  в  $i$ -м проекте;  $y_{ik''}$  — значение коммерческого параметра  $k$  в  $i$ -м проекте;  $a, b$  — решающие переменные,  $a, b \geq 0, a + b = 1$ .

Численные значения весов устанавливаются с помощью метода экспертных оценок.

Неопределенность будущего часто не позволяет экстраполировать технико-экономические тенденции развития прошлого, т. е. вводить неявное предположение о стабильности рассматриваемых факторов в будущем. В этих случаях можно с определенными допущениями считать стабильными лишь основные цели и задачи. Не изучая строгих зависимостей между рассматриваемыми факторами, можно оценить аргументы в виде целей и функцию как логически связанный с этими целями параметр. Во многих случаях это ничуть не хуже, чем попытка разработать «абсолютно точную» математическую модель, которая может привести к ошибочным результатам из-за какой-нибудь специфической неточности.

Поскольку эффективность каждого проекта или технического устройства рассматривается как определенный вклад в достижение поставленных целей, необходимо определять относительную важность и самих целей. Такое определение обычно осуществляется группой специалистов, хорошо информированных в областях, связанных с установленными задачами и целями.

Покажем на простом примере, как сравниваются альтернативные варианты [12].

Предположим, что есть два научных проекта  $A$  и  $B$ , один из которых нужно выбрать, исходя из двух основных задач, которые заключаются в увеличении прибыли и в получении научных данных.

Предположим также, что с помощью экспертов установлено, что первая задача (увеличение прибыли) в два раза важнее, чем вторая. Тогда, принимая, что суммарная ценность обеих задач равна единице, можем найти, что относительная ценность (вес) первой задачи будет равна 0,67, а второй — 0,33.

Далее производится экспертная оценка каждого из проектов с точки зрения решения каждой из поставленных задач, по арбитражной шкале от 0 до 10. Возможные результаты такой оценки сведены в таблицу.

Ожидаемая ценность каждого проекта вычисляется умножением оценки проекта на вес каждой частной задачи с последующим суммированием по всем задачам. В данном примере ожидаемая ценность проекта  $A$  будет:  $5 \times 0,67 + 8 \times 0,33 = 6$ , а проекта  $B$ :  $7 \times 0,67 + 1 \times 0,33 = 5$ . Делается вывод, что проект  $A$  с точки зрения комплекса поставленных задач предпочтительней проекта  $B$ .

Т а б л и ц а

Проекты	Задачи и их вес	
	получение прибыли 0,67	получение научных данных 0,33
$A$	5	8
$B$	7	1

Поскольку все частные задачи, решаемые на уровне отдельных организаций, должны быть увязаны с отраслевыми и общегосударственными задачами и целями от верхнего уровня, определяющего общегосударственные задачи и цели, до нижнего уровня идет увеличивающееся число задач, образующих иерархическую структуру. Последовательная оценка с помощью коэффициентов относительной важности позволяет вскрывать такие особенности, которые ввиду сложности общей задачи выбора не могут быть учтены при традиционной практике принятия решений.

В случае, когда сравниваются варианты, имеющие одинаковое назначение и по своим свойствам мало отличающиеся друг от друга, можно оценить относительную важность изменения любого параметра с точки зрения влияния на общую эффективность технического устройства [13].

Различные параметры или свойства играют разную роль в эффективности технического устройства.

Важность какого-либо свойства выразим числом  $n$ . Для выражения ценности этого свойства  $x = f(s)$  составляется уравнение

$$W_x = x^n = f^n(s). \quad (11)$$

Здесь  $s$  является параметром проекта, управляющим свойством  $x$ . Оценка двух сравниваемых проектов (в отношении параметра  $x$ ) производится по формуле

$$\begin{aligned} \frac{W_{x_I}}{W_{x_{II}}} &= \left( \frac{x_I}{x_{II}} \right)^n = \left( 1 + \frac{x_I - x_{II}}{x_{II}} \right)^n = (1 + \Delta x)^n = \\ &= 1 + \binom{n}{1} \Delta x + \binom{n}{2} \Delta x^2 + \binom{n}{3} \Delta x^3 + \dots \end{aligned}$$

В этом выражении  $\Delta x$  представляет собою разность параметров  $x$  обоих технических устройств, отнесенную к параметру  $x_{II}$  одного из двух. Можно считать, что величина  $\Delta x$  мала по сравнению с  $x_I$  и  $x_{II}$ , так как сравниваются устройства, мало отличающиеся по своим свойствам.

Приближенное отношение будет иметь вид

$$\frac{W_{x_I}}{W_{x_{II}}} = 1 + n\Delta x. \quad (12)$$

Важность  $n$  какого-либо параметра указывает, таким образом, насколько ценным является изменение параметра  $\Delta x$ . Так,  $n = 3$  означает, что если параметр  $x$  увеличится на 10%, то это повышает ценность  $W$  на 30%.

Очень часто различные свойства имеют противоположное влияние на эффективность устройства. Так, ухудшение свойства  $x_I$  по отношению к  $x_{II}$  у двух сравниваемых устройств можно компенсировать за счет улучшения какого-либо другого свойства  $y_{II}$  по отношению к  $y_I$ .

В этом случае отдельные оценки важности перемножаются

$$W_T = W_{x_I} W_{y_{II}} W_{z_I} = x_I^{n_x} y_{II}^{n_y} z_I^{n_z}. \quad (13)$$

Общие оценки сравниваются друг с другом путем деления

$$\frac{W_I}{W_{II}} = \left( \frac{x_I}{x_{II}} \right)^{n_x} \left( \frac{y_I}{y_{II}} \right)^{n_y} \left( \frac{z_I}{z_{II}} \right)^{n_z}. \quad (14)$$

Это уравнение говорит о следующем. Если, например, показатель степени  $n_x = 3$  и при этом свойство  $x$  меняется на 10%, то ценность  $W_x$  изменяется на 30%; если показатель степени  $n_y = 1$  и свойство  $y$  изменяется на 10%, то ценность  $W_y$  тоже изменится на 10%.

Таким образом, отношение  $n_x : n_y = 3$  показывает, что параметр  $x$  для общей оценки является в 3 раза более ценным, чем параметр  $y$ .

При сравнении неважно, в каких единицах измеряются параметры  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , так как уравнение (14) безразмерно.

Параметр  $x$  может в свою очередь состоять из какой-то группы параметров  $x_1, x_2, x_3 \dots$ , имеющих свою оценку. Если группа свойств имеет групповую важность  $n_x$ , то она получает оценку

$$W_x = (W_{x_1} W_{x_2} W_{x_3})^{n_x} = X^{n_x}. \quad (15)$$

Результат отдельных оценок внутри одной группы параметров рассматривается как комплексная характеристика  $X$ , которую нужно возвести в степень групповой важности  $n_x$  и для получения общей оценки подставить в (13).

Общая формула для определения относительной важности

$$W = \frac{W_I}{W_{II}} = \left[ \frac{X_I}{X_{II}} \right]^{n_x} \left[ \frac{Y_I}{Y_{II}} \right]^{n_y} \left[ \frac{Z_I}{Z_{II}} \right]^{n_z}$$

позволяет установить, по какому показателю одно техническое устройство хуже другого, и сопоставить качественно различающиеся параметры, характеризующие эффективность технических устройств.

### 3. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА «ЗАТРАТЫ — ЭФФЕКТИВНОСТЬ»

Как отмечалось, понятие «эффективность» может трактоваться по-разному, в зависимости от характеристик системы и этапа, на котором осуществляется выбор. При разработке систем эффективность может быть представлена как мера достижения системой требуемых характеристик; в период эксплуатации эффективность может означать надежность и удобство эксплуатации.

В общем случае под эффективностью системы понимается ее способность к выполнению поставленных задач. Вместе с этим существует понятие «обеспечение эффективности», под которым подразумевается не только надежность получения требуемых характеристик, но и степень уверенности в том, что в результате всего комплекса работ требуемая система будет создана в установленные сроки.

Техническая эффективность может определяться следующими составляющими: 1) надежностью действия; 2) эксплуатационной готовностью и 3) конструктивным соответствием [14]. Надежность действия определяется как вероятность того, что при данных окружающих условиях система будет работать без неисправностей в течение запроюктированных сроков эксплуатации. Эксплуатационная готовность есть вероятность того, что в любой момент система будет успешно решать поставленные задачи. Конструктивное соответствие есть вероятность обеспечения при эксплуатации системы запроюктированных выходных параметров.

Организационные возможности создания системы определяются критериями технической доступности, которая измеряется вероятностью того, что требуемая система может быть получена к определенной дате.

Кроме эффективности и технической доступности применяются критерии полезности, ценности и желательности. Если полезность является оценкой меры выполнения системой определенного целевого назначения, то ценность характеризуется величиной полезности с учетом вероятности успеха и требуемых ресурсов [15].

Комплексная оценка обычно ведется по показателю желательности, который рассчитывается по формуле [16]

$$\text{Желательность} = \frac{\text{Полезность} \times \text{вероятность успеха}}{\text{Требуемые ресурсы}}.$$

Произведение показателя полезности на вероятность успеха может служить показателем ценности системы.

Для военных систем вероятность успеха определяется показателем технической осуществимости, который рассчитывается как вероятность получения определенных характеристик в требуемые сроки [17].

Тогда показатель желательности системы рассчитывается по формуле [18]

$$\text{Желательность} = \frac{\text{Военная полезность} \times \text{осуществимость}}{\text{Затраты}}.$$

Естественно, что все параметры, входящие в эту формулу, меняются во времени.

На рис. 5 показан график, по которому рассчитывается изменение ценности системы во времени.

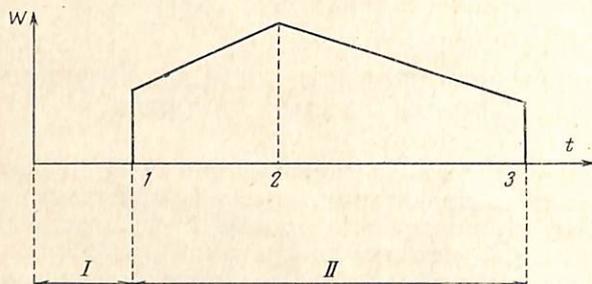


Рис. 5. График изменения ценности системы во времени: I — фаза выбора системы; II — фаза эксплуатации; 1 — дата первоначальной эксплуатационной надежности; 2 — дата полной эксплуатационной надежности; 3 — дата списания системы

В год, когда система достигает первоначальной эксплуатационной надежности, ее ценность меньше, чем в год достижения полной эксплуатационной надежности. Для упрощения расчета ценности рост ее между датами первоначальной и полной эксплуатационной надежности принимается пропорциональным увеличению числа изделий.

После достижения полной эксплуатационной надежности износ уменьшает ценность системы. Степень износа рассчитывается по прямой линии, угол наклона которой определяется остаточной ценностью в момент списания, которая рассчитывается в процентах от величины максимальной ценности на дату полной эксплуатационной надежности.

Полная ценность системы определяется площадью под кривой графика ценности от текущей даты до даты списания системы. Для расчета желательности новых систем эта полная ценность делится на величину полных затрат на создание и эксплуатацию системы.

Величина затрат на перспективные периоды также корректируется с учетом срока создания и эксплуатации системы, т. е. срока программы.

Обычно исходят из того, что национальная экономика имеет тенденцию к росту. Темпы роста экономики определяются в основном ежегодным темпом роста дохода на вложенный капитал, который ограничен определенным процентом (например, 3% в год). Если рост национальной экономики составляет  $r$  процентов в год, то вложение  $I$  через  $y$  лет достигнет величины

$$I(1+r)^y,$$

где  $I$  — величина капиталовложений на сегодняшний день. Таким образом, затраты суммы в  $D$  долларов в  $y$ -м году могут быть компенсированы издержкой или возмещением  $I = D / [(1+r)^y]$  долларов в текущем году.

Величина  $1 / [(1+r)^y]$  называется коэффициентом «скидки» для стоимости программы в  $y$ -м году.

Из этого следует, что если стоимость вложений в программу в  $y$ -м году составляет  $D_y$  долларов (по курсу сегодняшнего дня), то «действительная» стоимость  $c_{ay}$ , вложенная в  $y$ -м году, будет

$$c_{ay} = \frac{D_y}{(1+r)^y}. \quad (16)$$

Коэффициент скидки  $1 / [(1+r)^y]$  для  $r > 0$  есть величина, убывающая с ростом  $y$ , и меньшая единицы для всех  $y \geq 1$ . Именно для всех  $y \geq 1$  и  $r > 0$  справедливо неравенство

$$\frac{1}{(1+r)^{y+1}} < \frac{1}{(1+r)^y}.$$

Таким образом, процесс образования скидки снижает стоимость системы в будущем, и влияние любого снижения стоимости в последующие периоды будет сведено к минимуму или вообще исчезнет. Обстоятельства, связанные с образованием «скидки», играют важную роль при проведении численных оценок эффективности затрат.

На величину стоимости влияет и устаревание, снижающее целесообразность использования системы. Вероятность прекращения программы вследствие ее устаревания обозначается через так называемый коэффициент риска  $p_y$ , который имеет значение меньше единицы и уменьшается с ростом  $y$ .

Ожидаемая стоимость программы в  $y$ -м году рассчитывается по формуле  $\bar{c}_{ay} = c_{ay}p_y$ , а ожидаемая полная стоимость программы определяется выражением

$$\bar{c}_a = c_{a_1}p_1 + c_{a_2}p_2 + \dots + c_{a_L}p_L = \sum_{i=1}^L c_{a_i}p_i, \quad (17)$$

где  $c_{a_L}$  — действительная стоимость, установленная для последнего года программы. Величина затрат, рассчитанная на каждый год создания системы и ее эксплуатации, корректируется на величину «скидки».

При расчете эффективности учитываются все виды затрат, необходимые для создания и эксплуатации системы. Сюда входят затраты на исследования, разработку, производство, испытание и эксплуатацию системы, а также затраты на снабжение, обучение кадров и т. п. Последовательная детализация и классификация затрат позволяет выявить ключевые факторы, оказывающие наибольшее влияние на эффективность систем.

Поскольку при выборе вариантов исходят из расчета ценности всего комплекса систем, необходимых для решения поставленных задач, ис-

пользование или отказ от применения той или иной системы оказывает влияние на всю структуру новой техники. Поэтому после расчета желательности систем в модель вводятся бюджетные ограничения и рассчитывается маргинальная ценность системы. Под маргинальной ценностью понимается величина, на которую уменьшается суммарная ценность оптимальной структуры новой техники, если данная система будет изъята и затраты на нее будут использованы для другой, более предпочтительной системы.

Системы, имеющие отрицательную маргинальную ценность и низкий показатель желательности, исключаются из рассмотрения.

Непрерывный анализ систем с учетом фактора времени по методу «затраты — эффективность» обеспечивает необходимую гибкость планирования и делает программу работ «наблюдаемой» на всех этапах создания и эксплуатации новой техники.

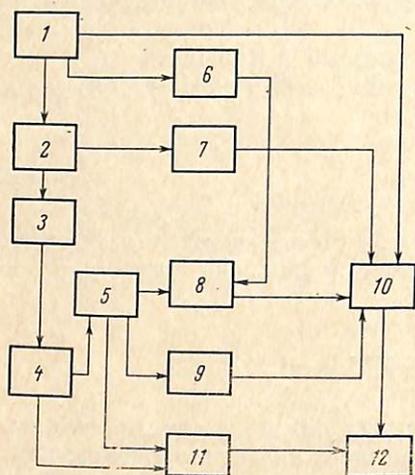


Рис. 6. Последовательность анализа эффективности затрат для технической системы: 1 — определение необходимых действий; 2 — классификация функций; 3 — технические условия на систему; 4 — существующий технический уровень; 5 — конструкция системы; 6 — надежность действия; 7 — эксплуатационная готовность; 8 — конструктивное соответствие; 9 — использование; 10 — стоимость системы; 11 — эффективность системы; 12 — эффективность затрат.

чины затрат. Когда такие общие характеристики отсутствуют, пытаются отыскать общие конструктивные характеристики или сопоставимые параметры.

Для большинства подобных решений могут быть установлены следующие основные этапы анализа [7]: 1) определение задач; 2) разработка перечней основных параметров систем в виде матриц; 3) определение основных характеристик сравниваемых вариантов; 4) разработка модели затрат; 5) разработка модели эффективности; 6) заключительные обобщения. Первые три этапа существенны для выявления показателей эффективности затрат. Матрицы основных параметров систем должны быть двух типов: в первой классифицируются все функциональные характеристики системы, во второй — функциональные характеристики увязываются с обобщенными показателями эффективности.

#### 4. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ АНАЛИЗА ПО МЕТОДУ «ЗАТРАТЫ — ЭФФЕКТИВНОСТЬ»

Анализ по методу «затраты — эффективность» находит применение для решения трех основных типов проблем выбора: оптимальных конструкций технических вариантов, вариантов предпочтительных систем и предпочтительных действий.

При решении первых двух типов проблем анализ должен начинаться с определения основных задач, выявления параметров и характеристик, имеющих первостепенное значение для решения поставленных задач и сведения их в специальные матрицы.

На рис. 6 показана схема последовательного выявления характеристик и их связи с оценкой эффективности и затратами [14].

Классификационный анализ служит «входом» для уточнения требуемых характеристик. Если рассматриваемые системы имеют общую характеристику, связанную с их назначением, то выбор осуществляется в зависимости от величины

Определение характеристик сравниваемых вариантов заключается в установлении таких технических особенностей, которые могут служить в качестве «входов» для выработки критериев и оценки стоимости.

Характеристики системы делятся на статические, которые описывают основные технические данные или конструктивные параметры (вес, габариты, скорость), и динамические, описывающие работу системы под нагрузкой.

Следующие три этапа имеют аналитический и расчетный характер.

Разработка модели затрат включает в себя: 1) сбор данных о затратах и характеристиках системы; 2) расчет статистических отношений между этими показателями; 3) разработку структуры модели.

Разработка модели эффективности состоит из установления показателей эффективности для подсистем и элементов и разработки структуры модели, т. е. определения количественных показателей, сведенных в перечни матричного типа, в которых показатели эффективности обычно располагаются горизонтально, а характеристики — вертикально.

Заключительный этап анализа включает: 1) расчет величины затрат и эффективности; 2) определение границ сопоставления затрат и эффективности; 3) проверку «чувствительности» моделей к изменению отдельных технических характеристик; 4) выбор предпочтительных вариантов.

Как уже отмечалось, кроме выбора предпочтительных вариантов анализ по методу «затраты — эффективность» может быть использован для выбора предпочтительных действий.

Примером подобного использования метода может служить методика РДЕ, разработанная в лаборатории динамики полета ВВС США [19].

Задачей методики РДЕ было составление вычислительной программы, дающей возможность распределить имеющиеся ресурсы, т. е. денежные средства, кадры и экспериментальное оборудование между 228 работами с целью эффективного завершения их при минимизации затрат. Так как для каждой работы было установлено шесть возможных уровней ресурсов, а перспективы развития работы определялись в зависимости от большого числа факторов, то при оценке работ пришлось анализировать несколько тысяч возможных комбинаций и вариантов. Была составлена матрица, содержащая 232 ряда и 1369 столбцов, которая обрабатывалась с помощью ЭВМ.

Программа РДЕ рассчитана на пять лет и позволяет не только определить эффективность любой работы, но и разработать графики, показывающие состояние и вероятность выполнения в срок каждой научно-исследовательской работы (НИР) или опытно-конструкторской работы (ОКР). Программа позволяет за 24 часа произвести перепланирование работ и перераспределение ресурсов между работами. Последовательность основных этапов программы РДЕ описана ниже.

На оптимальное распределение ресурсов и эффективность работ оказывают влияние: принятая программа перспективного развития техники, состояние технических наук и доступные ресурсы.

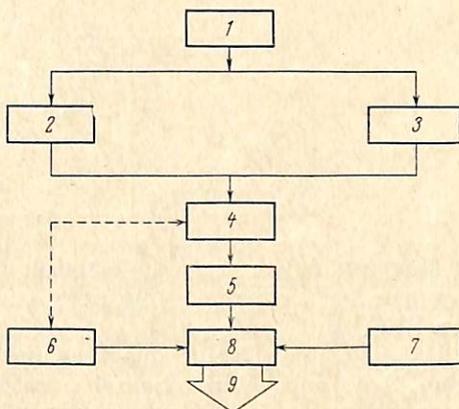


Рис. 7. Блок-схема программы РДЕ

На рис. 7 показана блок-схема программы РДЕ, в которой учитываются основные факторы, оказывающие влияние на развитие НИР и ОКР.

С помощью этой блок-схемы производятся все необходимые математические расчеты, связанные с оценкой эффективности и распределением ресурсов для НИР и ОКР.

Блок 1 программы представляет собою матрицу задач ВВС. Примерная структура такой матрицы показана ниже.

В матрице задач ВВС рассматриваются 30—40 перспективных систем летательных аппаратов и их возможные действия в различных ситуациях.

Матрица задач ВВС

Основные функции	Возможные ситуации		
	I	II	III
1	$n_{I1}$	$n_{II1}$	$n_{III1}$
2	$n_{I2}$	$n_{II2}$	$n_{III2}$
3	$n_{I3}$	$n_{II3}$	$n_{III3}$
4	$n_{I4}$	$n_{II4}$	$n_{III4}$

Матрица задач является основой программы РДЕ, а ее элементы представляют весь спектр возможных ситуаций, в которых должны действовать ВВС.

Блок 4 программы представляет собою перечень исследовательских задач. Этот перечень создается с помощью матрицы задач ВВС (блок 1), перечня перспективных летательных аппаратов (блок 2) и перечня перспективных технических направлений, обеспечивающих решение задач, стоящих перед ВВС (блок 3).

Относительная ценность каждого перспективного летательного аппарата и технического направления по каждому элементу задач ВВС устанавливается с помощью нормализации матриц задач.

Для определения эффективности каждой НИР и ОКР и расчета с помощью ЭВМ была разработана математическая модель

$$V_i = \frac{\Delta p_{si}}{\Delta t} \frac{1}{p_{si}} D_T \sum_{j=1}^M f(t)_j b_j c_j + \frac{\Delta c L_i}{\Delta t} \frac{1}{c L_i} \sum_{k=1}^L f(t)_k g_k h_k, \quad (18)$$

где  $V_i$  — эффективность определенной научно-исследовательской работы  $i$ .

Выражение слева от знака плюс в этой формуле представляет эффективность исследований, связанных с разработкой перспективных летательных аппаратов для ВВС, а выражение справа от знака плюс — эффективность работ, связанных с осуществлением необходимых научных и технических идей.

Величина  $p_{si}$  — вероятность успеха в использовании существующей техники для следующего, перспективного этапа развития ВВС, без проведения дополнительных исследовательских работ;  $\Delta p_{si} / \Delta t$  характеризует темп роста вероятности успеха в течение эталонного периода времени.

Для всех исследований величина  $p_{si}$  является показателем технического состояния работы;  $D_T$  — показатель полезности определенной исследовательской работы с точки зрения влияния ее на другие исследовательские проблемы;  $f(t)_j$  — функция своевременности проведения работ по отношению к запланированному сроку;  $b_j$  — показатель содействия дан-

ной исследовательской проблемы в определенной  $j$ -й системе летательного аппарата;  $c_j$  — относительная ценность системы летательного аппарата с точки зрения увеличения мощи ВВС.

Математическое выражение справа от знака плюс, представляющее оценку уровня развития науки и техники, составлено аналогично выражению слева.

Величина  $cL_i$  во второй части формулы называется показателем достоверности, характеризующим уровень прогресса технической идеи, с момента ее возникновения до претворения в летательном аппарате;  $L$  — число технических направлений;  $g_k$  — показатели содействия исследовательской работы  $k$ -му техническому направлению;  $h_k$  — относительная ценность технического направления.

Математическая модель эффективности работ на блок-схеме программы РДЕ представлена блоком 8.

Определение величины показателей, входящих в формулу, производится на основании экспертных оценок и фактического состояния ресурсов. Каждый руководитель исследовательской работы составляет график развития проблемы, основываясь на ресурсах, необходимых для развития от одного показателя достоверности к другому.

Обычно задается несколько уровней ресурсов, т. е. требуемых средств и кадров, а оценка значений показателей математической модели производится с помощью десятибалльной шкалы.

Блок 8 программы РДЕ представляет собой полную математическую модель, необходимую для распределения ресурсов между работами. Этот блок включает: коэффициенты эффективности каждой научно-исследовательской работы (блок 5); уровни ресурсов для каждой проблемы (блок 7); максимальные годовые ресурсы, с учетом бюджетных ограничений (блок 6).

В результате применения программы РДЕ оказалось возможным значительно сократить перечень рекомендованных проблем и уменьшить затраты лаборатории на 50%.

Таким образом, применение метода «затраты — эффективность» с целью выявления предпочтительных действий при разработке долгосрочных программ также основано на расчетах относительной ценности проектов с учетом фактора времени и изменения ситуации. На этих же принципах построен так называемый проект «Форкаст», с помощью которого в США определяются перспективы ВВС [20].

Существует ряд трудностей, связанных с использованием метода «затраты — эффективность». Необходимость широкого охвата проблем, требующих учета большого числа разнородных факторов, многие из которых нельзя оценить количественно, и невозможность подлинно объективного анализа, поскольку количественная оценка эффективности альтернативных вариантов основана на экспертных оценках, снижают достоверность получаемых результатов. Вместе с тем практика применения метода доказала его полезность. В настоящее время этот метод является обязательным элементом системы «планирование — программирование — разработка бюджета», на основе которой обеспечивается единство организационных и методических принципов планирования военной техники в США [21, 22].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Smith. Major Factors in Aerospace Planning and Decision Making. NASA. N 76298, 1966.
2. New Approach in Decision Making. In: «Cost-Effectiveness Analysis». N. Y., 1967.
3. K. Knorr, O. Morgenstern. Science and Defense. Some Critical Thoughts on Military Research and Development. Princeton University, 1965.

4. Defense Management. N. Y., Prentice Hall, 1966.
5. C. Hitch, R. McKean. The Economic of Defense in the Nuclear Age. Harvard University Press, 1960. (Русский перевод: Ч. Хитч, Р. Маккин. Военная экономика в ядерный век. М., Воениздат, 1964).
6. T. Cleenan. Policies for Military Research and Development. RAND, AD-N 477017, 1966.
7. D. Fields. Cost-Effectiveness Analysis. Task and Their Interrelation. Oper. Res., 1966, v. 14, N 3.
8. M. Heuston, G. Ogawa. Observation on the Theoretical Basis of Cost-Effectiveness. Oper. Res., 1966, v. 14, N 2.
9. P. Fox. A Theory of Cost-Effectiveness for Military System Analysis. Oper. Res., 1965, v. 13, N 2.
10. L. Ball. System Effectiveness-Assurance in Response to DOD/NASA Requirements. ASE, N 660729, 1966.
11. B. Dean, M. Nishry. Scoring and Profitability Models for Evaluating and Selecting Engineering Projects. Oper. Res., 1965, v. 13, N 4.
12. W. Pound. Research Project Selection. Testing a Model in the Fields. IEEE Trans. on Engng. Management, 1964, v. EM-II, N 1.
13. W. Herbst. Ein Einfaches Bewertungsverfahren für Militarflugzeugel. Luftfahrttechnik — Raumfahrttechnik, 1967, N 3.
14. E. Hogan, R. Nodeau. Operation Concept of the Integrated Helicopter Avionics System. J. Aircraft, 1965, v. 2, N 6.
15. A. Wood. Weapon System Effectiveness and Defense Decisions. ASE, N 660772, 1966.
16. R. Ayres. Technological Forecasting and Long — Range Planning. N. Y., McGraw — Hill Book Company, 1969.
17. M. Cetron. Technological Forecasting. A Practical Approach. N. Y., Gordon and Breach Science Publishers, 1969.
18. H. Wells. Weapon System Planner's Guide. In: «Long — Range Forecasting and Planning». Air Force Academy, 1966.
19. A. Nutt. An Approach to Research and Development Effectiveness IEEE Trans. on Engng. Management, 1965, N 3.
20. B. Schriever. Forecast. Air University Review, 1965, N 3.
21. Management of Aerospace Programs. V. 12, Washington, 1966.
22. C. Hitch. Decision — Making for Defense. Berkeley — Los-Angeles, 1965. (Русский перевод: Ч. Хитч. Руководство обороной. М., «Сов. радио», 1968).

Поступила в редакцию  
28 XI 1969