

## ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗРАБОТКИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ (НА ПРИМЕРЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ)

---

Владислав Валерьевич КЛОЧКОВ родился в городе Нальчике в 1976 г. Профессор МАИ. Доктор экономических наук, доцент. Основные научные интересы — в области экономики авиационной промышленности. Автор более 120 научных работ. E-mail: vlad\_klochkov@mail.ru

Vladislav V. KLOCHKOV, D.Sci, was born in 1976, in Nalchik. He is a Professor at the MAI. His research interests are in economics of aerospace industry. He has published over 120 technical papers. E-mail: vlad\_klochkov@mail.ru

---

Анна Константиновна НИКИТОВА родилась в городе Иванове. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области экономических проблем организации производства и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов. Автор шести научных работ. E-mail: A-Nikitova@yandex.ru

Anna K. NIKITOVA, was born in Ivanovo. She is a Postgraduate Student at the MAI. Her research interests are in economic problems related to industrial engineering and maintenance of unmanned aerial vehicles. She has published 6 technical papers. E-mail: A-Nikitova@yandex.ru

---

Наталья Сергеевна ЕФИМОВА родилась в городе Москве. Ассистент МАИ. Основные научные интересы — в области экономических аспектов разработки и производства малых летательных аппаратов. Автор пяти научных работ. E-mail: k506@mai.ru

Natalia S. EFIMOVA, was born in Moscow. She is an Assistant Professor at the MAI. Her research interests are in economic aspects of development and manufacturing of small flying machines. She has published 5 technical papers. E-mail: k506@mai.ru

---

*На основе упрощенной модели оптимального спроса на патрульные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) предложены методы оптимизации модельного ряда перспективных БПЛА, предназначенных для нескольких категорий потенциальных заказчиков с различными требованиями к полезной нагрузке.*

*Optimization techniques are suggested to solve family design problem for advanced patrol unmanned aerial vehicles (UAV). It is stated that UAV family members are intended for various customer kinds each of which has different payload requirements. The developed techniques are based on a simplified optimal demand model.*

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, воздушное патрулирование, модельный ряд.

**Key words:** unmanned aerial vehicles, air surveillance, family.

Одной из важнейших задач при формировании продуктовой стратегии авиастроительных предприятий является рациональное определение типоразмерного ряда (типажа) перспективных изделий. Наивысшая эффективность и конкурентоспособность продукции в каждом сегменте рынка авиатехники может быть достигнута, если конкретная модель предназначена именно для данного сегмента, т.е., при специализации изделий. С другой стороны, стремление производителя сократить себестоимость продукции и увеличить объемы ее реализации способствует унификации летательных аппаратов (ЛА), предназначенных для различных сегментов рынка. Стремление удовлетворить этим противоречивым требованиям приводит к проблеме формирования оптимального типоразмерного ряда

перспективных ЛА. Решению этой задачи применительно к пассажирским и грузовым самолетам посвящены работы ряда отечественных ученых. За десятилетия развития гражданской авиации в России и в мире накоплен огромный объем эмпирических данных об эффективности эксплуатации пассажирских и грузовых ЛА того или иного типоразмера на авиалиниях различной дальности и с различным пассажиропотоком (грузопотоком). Поэтому на рынках транспортных самолетов уже сложилась приемлемая как для производителей, так и для авиакомпаний структура модельного ряда, причем ее формирование происходило не только под влиянием научных рекомендаций, но и путем обобщения реального опыта. Поскольку решение об унификации приходится принимать на самых ран-

них стадиях жизненного цикла продукции — на этапе сегментации рынка и выбора целевой группы потребителей, в относительно новой рыночной нише, какой является рынок БПЛА, оценка экономической эффективности того или иного решения не может опираться на эмпирические данные. Поэтому возникает задача прогнозирования, а не апостериорной оценки экономической эффективности унификации или специализации БПЛА, причем применимость эконометрических методов ограничена. Остается наиболее сложный путь — экономико-математическое моделирование.

БПЛА, предназначенные для патрулирования различных объектов, различаются по многим параметрам. Так, обнаружение утечек на газопроводах требует облета последних на предельно малых высотах, поскольку обнаружение происходит, в основном, с помощью газоанализаторов. Для локализации неисправности трубопровода и уточнения ее характера бывает необходимо приблизиться к вероятному месту неисправности и зависнуть вблизи него, что подразумевает применение БПЛА вертолетного, а не самолетного типа. Поэтому, прежде всего, возможна унификация ЛА, предназначенных для выполнения однородных задач. Они могут различаться радиусом действия, скоростью полета, взлетно-посадочными характеристиками и т.д. Однако в данной работе в качестве основного показателя, определяющего различия унифицируемых типов ЛА, выбрана величина полезной нагрузки. Большая величина допустимой полезной нагрузки позволяет установить на БПЛА более тяжелую, но и более чувствительную аппаратуру, расширить спектр диапазонов, в которых ведется наблюдение (например, кроме видимого диапазона, вести наблюдение в инфракрасном и т.п.). Таким образом, унификация означает выбор наибольшей полезной нагрузки для нескольких сегментов рынка.

Обозначим потенциальных заказчиков (или группы однородных заказчиков) индексами  $i = 1, \dots, n$ ;  $i$ -му заказчику необходимо, чтобы БПЛА мог нести полезную нагрузку, равную, по меньшей мере,  $G^i$ . Предположим, что потенциальные заказчики (сегменты рынка) упорядочены по возрастанию потребного значения полезной нагрузки:  $G^1 < G^2 < \dots < G^n$ .

Предлагается следующий способ формализации состава модельного ряда. Введем индикатор  $\delta^i$ , который принимает значение 1, если для  $i$ -го сегмента рынка предлагается специализированный тип БПЛА, рассчитанный на полезную нагрузку  $G^i$ , и 0, если такой тип БПЛА не предлагается. Очевидно,

что в последнем случае  $i$ -му заказчику приходится приобретать изделия более тяжелого класса.

Обозначим типы изделий в модельном ряду (т.е. модели БПЛА) индексами  $j = 1, \dots, m$ , а максимально допустимую величину полезной нагрузки БПЛА  $j$ -го типа —  $G_j$ . Предположим, что типы БПЛА также упорядочены по возрастанию допустимой полезной нагрузки:  $G_1 < G_2 < \dots < G_m$ . Если  $G^i \leq G_j$ ,  $i$ -й заказчик может использовать БПЛА  $j$ -го типа; если  $G^i > G_j$ ,  $i$ -й заказчик не может эксплуатировать БПЛА  $j$ -го типа.

Выбор оптимального решения осуществляется не по народно-хозяйственному критерию, а с учетом индивидуальных интересов отдельных заказчиков. Такой подход более корректен в рыночных условиях. Необходимо достичь согласования интересов всех участников рынка — как разработчиков и производителей изделий, так и платежеспособных покупателей. Рационально действующий заказчик выберет наиболее выгодную для себя альтернативу. Помимо различных типов БПЛА, предлагаемых данным производителем, в качестве альтернатив заказчик может рассматривать БПЛА конкурирующих производителей, а также иные средства патрулирования (в том числе пилотируемые или неавиационные).

### Упрощенная модель оптимального спроса потенциальных заказчиков на БПЛА

В работе [4] предложен следующий подход к прогнозированию спроса на БПЛА патрульного назначения. Потенциальному заказчику требуется патрулировать трассу (магистраль, границу и т.п.) длиной  $L$ , на которой со средней интенсивностью  $\omega$  (год  $\cdot$  км) $^{-1}$  могут возникать аварийные ситуации (утечки из трубопроводов, разрывы и т.п.), приносящие ущерб в размере  $z$  денежных единиц в расчете на одну аварию в час. Ущерб от аварийной ситуации включает в себя:

- прямые потери (например, стоимость продукта, вытекшего из трубопровода);
- возможные штрафы и затраты на устранение последствий (например, на сбор разлившейся нефти и экологическую рекультивацию пострадавших территорий);
- неустойки и репутационный ущерб в результате прекращения перекачки продукта по трубопроводу, подачи электроэнергии и т.п.

Обозначив средние длительности обнаружения аварийной ситуации в ходе патрулирования и последующего устранения аварии соответственно  $\bar{t}_{\text{обн}}$

и  $\bar{t}_{устр}$ , оценим ожидаемую сумму потерь заказчика из-за аварийных ситуаций в течение года:

$$D = L\omega z (\bar{t}_{обн} + \bar{t}_{устр}).$$

Средняя продолжительность устранения аварии  $\bar{t}_{устр}$  не зависит от средств патрулирования\*. Среднее время обнаружения аварии  $\bar{t}_{обн}$ , напротив, практически полностью определяется системой патрулирования. Если данную трассу обслуживает парк летательных аппаратов численностью  $n$ , среднегодовой налет одного изделия равен  $\eta$ , л.ч./г, а средняя скорость полета в режиме патрулирования равна  $v$ , км/ч, тогда годовой объем патрульных полетов составит  $x = n\eta$  летных часов, и за год парк

пройдет расстояние, равное  $xv$ , т.е. совершит  $\frac{xv}{L}$  облетов трассы. Соответственно, средняя периодичность пролета ЛА над заданным участком трассы

составит  $365 \cdot 24 \cdot \frac{L}{xv}$  ч. Если считать, что аварийные

ситуации и пролет патрульных ЛА независимы друг от друга, время обнаружения аварии распределено

равномерно от 0 до  $365 \cdot 24 \cdot \frac{L}{xv}$  ч, и среднее время

обнаружения аварии составит  $\bar{t}_{обн} = 365 \cdot 12 \cdot \frac{L}{xv}$  ч.

Здесь предполагается, что при пролете патрульного ЛА над местом аварии она будет обнаружена со 100%-ной вероятностью. В реальности вероятность локализации аварии в одном пролете  $p_{обн}$  меньше 100% и определяется целым рядом факторов: погодными условиями, составом и чувствительностью аппаратуры, установленной на борту, режимом полета и т.п. Чем чувствительнее аппаратура, чем обширнее ее состав (например, оптические приборы, работающие в различных диапазонах, газоанализаторы и т.д.), тем выше вероятность обнаружения, но тем больше стоимость и масса аппаратуры, а также потребная полезная нагрузка БПЛА. Можно показать, что ожидаемое количество пролетов, необходимых для обнаружения аварии,

равно  $\frac{1}{p_{обн}}$ . Соответственно, среднее время обнаружения

ружения аварии с учетом данного фактора составит

$\bar{t}_{обн} = 365 \cdot 12 \cdot \frac{L}{xvp_{обн}}$  ч. Что касается режима полета, то, как правило, аварии обнаруживаются с большей вероятностью при меньшей скорости полета (что входит в противоречие с соображениями по повышению производительности патрульных средств) и при полете на малой высоте (что требует усложнения системы управления БПЛА и усиления его конструкции для обеспечения полета в режиме облета местности, а также увеличивает риск потери или повреждения ЛА при столкновении с землей). В реальности необходимо учитывать все указанные факторы, решая задачу совместной оптимизации интенсивности патрульных полетов, состава бортового оборудования и режима полета БПЛА. Однако в данной работе для упрощения будем считать, что аварии обнаруживаются и локализуются в первом же пролете, т.е.  $p_{обн} = 1$ .

Таким образом, ожидаемая сумма потерь из-за аварийных ситуаций может быть выражена следующей формулой:

$$D = L\omega z \left( 365 \cdot 12 \cdot \frac{L}{xv} + \bar{t}_{устр} \right) = 365 \cdot 12 \cdot \frac{L^2\omega z}{xv} + L\omega z \bar{t}_{устр} = \frac{a}{xv} + b,$$

где  $a = 365 \cdot 12 \cdot L^2\omega z$ ;  $b = L\omega z \bar{t}_{устр}$ .

Подчеркнем, что  $a$  и  $b$  — постоянные величины, определяемые объектом патрулирования данного заказчика и не зависящие от системы патрулирования.

Из полученного выражения видно, что ожидаемые потери тем ниже, чем выше интенсивность патрульных полетов. В то же время повышение интенсивности патрулирования требует дополнительных затрат. Ожидаемые годовые затраты на организацию патрулирования можно упрощенно представить следующим образом:

$$C = FC + cx,$$

где  $c$  — средняя стоимость летного часа;  $FC$  — годовые постоянные затраты на организацию патрулирования (в том числе на создание и поддержание необходимой наземной инфраструктуры).

Целевой функцией заказчика предлагается считать сумму затрат на патрулирование и ожидаемых

\* За исключением случая, когда патрульный вертолет несет на борту аварийную бригаду, которая, таким образом, уже находится на месте аварии и может приступить к ее ликвидации вскоре после обнаружения.

потерь из-за аварийных ситуаций, а управляющей переменной — годовой объем патрульных полетов:

$$TC = C + D = FC + cx + \frac{a}{xv} + b \rightarrow \min_x.$$

Оптимальный годовой объем патрульных полетов можно найти из условия

$$\frac{\partial TC}{\partial x} = 0:$$

$$x_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{a}{vc}}.$$

Показателем экономической эффективности того или иного средства патрулирования для данного заказчика служит минимум его целевой функции, получаемый при оптимизации объема патрульных полетов данного средства патрулирования:

$$TC^{\min} = TC(x_{\text{opt}}) = FC + b + 2\sqrt{a\frac{c}{v}}.$$

Таким образом, в рамках модели [4], экономическая эффективность любых средств патрулирования для данного заказчика определяется тремя агрегированными показателями:

- постоянными затратами на организацию патрулирования и содержание соответствующей инфраструктуры;
- скоростью движения в режиме патрулирования;
- стоимостью летного часа.

Предположим, что для каждого потенциального заказчика заданы соответствующие параметры наилучшей альтернативы  $c_{\text{alt}}^i$ ,  $FC_{\text{alt}}^i$ ,  $v_{\text{alt}}^i$  и определен достижимый при этом минимум целевой функции

$$TC_{\text{alt}}^{i\min} = FC_{\text{alt}}^i + b + 2\sqrt{a\frac{c_{\text{alt}}^i}{v_{\text{alt}}^i}}. \text{ Данный заказчик сдела}$$

ет выбор в пользу БПЛА данного типа, если его применение позволит достичь меньшего значения целевой функции.

Предположим, что цена БПЛА  $j$ -го типа равна  $p_j$  и одинакова для всех потенциальных заказчиков, т.е. ценовой дискриминации нет. Тогда средняя стоимость летного часа БПЛА  $j$ -го типа для  $i$ -го потенциального заказчика может быть выражена следующим образом:

$$c_j^i = \frac{p_j}{T_j^i} + g_j^i p_{\text{mon}}^i + r_j^i + z^i,$$

где  $g_j^i$  — среднее значение часового расхода топлива;  $p_{\text{mon}}^i$  — цена авиатоплива (с учетом доставки

к месту базирования ЛА, хранения, и т.п.);  $T_j^i$  — назначенный ресурс БПЛА;  $r_j^i$  — затраты на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) в расчете на летный час;  $z^i$  — часовая ставка зарплаты оператора наземного пункта управления БПЛА.

Подчеркнем, что вышеперечисленные технико-экономические параметры, определяющие стоимость летного часа БПЛА данного типа, принимают индивидуальные значения в парках различных заказчиков, из-за различия условий эксплуатации, системы цен и т.п. Что касается затрат на оплату труда операторов, они зависят, прежде всего, не от типа БПЛА, а от характера целевой нагрузки и специфических обязанностей операторов, соответствующих данному заказчику, а также от ставок оплаты труда в данной отрасли и регионе. Постоянные затраты  $i$ -го потенциального заказчика на организацию патрулирования при помощи БПЛА  $j$ -го типа обозначим  $FC_j^i$ . На основании этих данных можно оценить оптимальный объем патрульных полетов БПЛА  $j$ -го типа и минимально достижимый при этом уровень целевой функции  $i$ -го потенциального заказчика:

$$x_{j\text{opt}}^i = \sqrt{\frac{a^i}{v_j^i c_j^i}};$$

$$TC_j^{i\min} = TC(x_{j\text{opt}}^i) = FC_j^i + b + 2\sqrt{a^i \frac{c_j^i}{v_j^i}}.$$

Оптимальный среднегодовой спрос  $i$ -го заказчика на БПЛА  $j$ -го типа будет определяться следующим образом:

$$q_j^i = \gamma_j^i \frac{x_{j\text{opt}}^i}{T_j^i} = \frac{\gamma_j^i}{T_j^i} \sqrt{\frac{a^i}{v_j^i c_j^i}},$$

где  $\gamma_j^i$  — индикатор, принимающий следующие значения:

1, если БПЛА  $j$ -го типа является для  $i$ -го заказчика оптимальным средством патрулирования (т.е.

$TC_j^{i\min} = \min_k TC_k^{i\min}$ , где  $k$  — индекс средства патрулирования) и удовлетворяет требованиям по величине полезной нагрузки ( $G^i \leq G_j$ );

0 во всех остальных случаях.

То есть

$$\gamma_j^i = \begin{cases} 1, & TC_j^{i\min} = \min_k TC_k^{i\min} \cup G^i \leq G_j; \\ 0, & \end{cases}$$

Заметим, что величина  $\sqrt{a^i}$  фактически определяет потребность  $i$ -го заказчика в БПЛА (если выбор будет сделан в их пользу) и возможную емкость соответствующего сегмента рынка, а также минимальное значение целевой функции  $i$ -го заказчика. Можно назвать эту величину *параметром масштаба* заказчика. Она определяется характеристиками патрулируемого объекта и пропорциональна длине трассы, а также корню квадратному из частоты аварийных ситуаций и стоимостной оценки ущерба. Следует подчеркнуть, что параметр масштаба, хотя и не имеет непосредственной физической интерпретации, не сконструирован искусственно, а естественным образом вытекает из вышеописанной модели оптимального спроса на патрульные БПЛА.

Можно оценить суммарный спрос на БПЛА  $j$ -го типа, выпускаемые данным производителем, по следующей формуле:

$$q_j = \sum_{i=1}^n q_j^i, \quad j = 1, \dots, m.$$

### Прогнозирование и оптимизация финансовых результатов разработки и производства БПЛА

Годовая выручка производителя от продажи всех выпускаемых им типов БПЛА определяется следующей формулой:

$$R = \sum_{j=1}^m p_j q_j = \sum_{j=1}^m p_j \cdot \sum_{i=1}^n q_j^i.$$

Предположим для упрощения (при необходимости оно может быть снято), что длительность периода продаж БПЛА  $j$ -й модели составляет  $\tau_j$  лет и на протяжении этого периода потребности потенциальных заказчиков не меняются. Тогда прогноз общего объема продаж БПЛА за весь жизненный цикл изделия (ЖЦИ) можно получить, умножив на  $\tau_j$  оценку среднегодового спроса:

$$Q_j = \tau_j \cdot q_j, \quad j = 1, \dots, m.$$

На основе прогнозных значений общих объемов продаж различных моделей БПЛА, можно оценить общую прибыль производителя за весь ЖЦИ:

$$P = \sum_{j=1}^m \left\{ (p_j - c_{\text{мат } j}) Q_j - c_{\text{тр } j}^{\text{перв}} \sum_{q=1}^{Q_j} (1 - \lambda)^{\log_2 q} - FC_{\text{произв } j} \right\} - FC_{\text{произв БПЛА}},$$

где  $c_{\text{мат } j}$  — удельные материальные затраты на выпуск одного БПЛА  $j$ -й модели;

$c_{\text{тр } j}^{\text{перв}}$  — удельные трудозатраты на выпуск первого экземпляра БПЛА  $j$ -й модели;

$\lambda$  — темп обучения в процессе серийного производства\*;

$FC_{\text{произв } j}$  — постоянные затраты на разработку и технологическую подготовку производства БПЛА  $j$ -й модели. В эту величину включаются лишь те постоянные затраты, которые являются специфичными для данной модели БПЛА, поскольку любое предприятие, разрабатывающее и выпускающее БПЛА, вынуждено, в любом случае, нести постоянные затраты  $FC_{\text{произв БПЛА}}$ , общие для всех типов изделий. К таким общим затратам относятся:

- стоимость НИОКР, нацеленных на развитие конструкций и технологий производства БПЛА как таковых;
- затраты на универсальное (т.е. предназначенное для выпуска изделий различных типоразмеров) технологическое оборудование, программное обеспечение и т.п.

В дальнейшем на основе оценок оптимального спроса на БПЛА различных типов можно ставить и решать разнообразные оптимизационные задачи. В качестве критериев оптимальности могут выступать суммарная прибыль данного производителя за весь жизненный цикл портфеля проектов БПЛА, *чистая текущая стоимость* портфеля проектов и т.д. Управляющими переменными в этих задачах являются:

- индикаторы  $\{\delta^i\}$ , определяющие состав модельного ряда данного производителя;
- если  $\delta^i = 1$ , т.е. если принято решение о выпуске специализированного типа БПЛА для данного сегмента рынка, — цена БПЛА и его проектные параметры, определяющие достижимые в парке различных заказчиков скорость полета, расход топлива, ресурс и т.п.

Последовательность решения оптимизационной задачи формирования модельного ряда такова. Сначала определяется некоторый состав модельного ряда, т.е. набор индикаторов  $\{\delta^i\}$ . Затем при заданном составе модельного ряда оптимизируются цены и проектные параметры каждой модели БПЛА и

\* Например, если темп обучения равен 0,2, при каждом удвоении накопленного выпуска удельные трудозатраты сокращаются на 20%.

рассчитывается максимально достижимое для данного состава модельного ряда значение интегрального критерия (прибыли разработчика и производителя БПЛА, его рентабельности и т.п.). После этого состав модельного ряда может быть изменен. Задачу оптимизации состава модельного ряда можно назвать «внешней», а задачу совместной оптимизации цен и проектных параметров отдельных моделей БПЛА — «внутренней» оптимизационной задачей. В общем случае для нахождения глобального оптимума придется перебрать все возможные составы модельного ряда, т.е. все возможные сочетания индикаторов  $\{\delta^i\}$ . Их общее количество равно  $2^n$ , поскольку каждый из индикаторов может принимать значения 0 и 1. При этом допускается, что модельный ряд не будет покрывать потребности всех потенциальных заказчиков, если окажется, что данному производителю вообще невыгодно создавать изделия для соответствующих сегментов рынка.

Решению задачи оптимального проектирования многоцелевых беспилотных комплексов посвящены классические работы еще советской эпохи. Принципиальные отличия постановки «внутренней» оптимизационной задачи от традиционной задачи оптимального проектирования таковы. Во-первых, в рыночных условиях в число управляющих переменных включается цена изделия. Во-вторых, критерием является целевая функция разработчика и производителя БПЛА, а согласование его интересов с интересами потенциальных заказчиков происходит в процессе рыночных торгов. Каждый потенциальный заказчик решает свою оптимизационную задачу (см. выше) при заданных ценах и характеристиках БПЛА. В-третьих, уже не считается необходимым удовлетворить (тем более оптимальным, в некотором смысле, образом) запросы всех потенциальных заказчиков, поскольку им доступны и альтернативные средства патрулирования.

В случае, если данный производитель БПЛА является монополистом, решение его оптимизационной задачи полностью определяет равновесие на данном рынке. Если же (что наиболее вероятно в реальности) у данного производителя есть конкуренты, их продукция может быть альтернативой продукции данного производителя. В принципе описанный выше подход к прогнозированию спроса на БПЛА предусматривает наличие у каждого потенциального заказчика альтернативных возможностей организации патрулирования, характеризующихся агрегированными параметрами  $c_{alt}^i, FC_{alt}^i, v_{alt}^i$ . С одной стороны, продукция конкурентов может и не

являться в данный момент наилучшей альтернативой для того или иного заказчика. С другой стороны, она может стать таковой, если конкуренты проводят активную маркетинговую политику, изменяя цены и характеристики своей продукции.

С учетом наличия конкурирующих производителей, анализ конъюнктуры рынка БПЛА можно проводить по следующему итеративному алгоритму:

1) при заданных составах модельных рядов, проектных параметрах и ценах продукции конкурентов найти оптимальный состав модельного ряда, оптимальные проектные параметры и цены изделий данного производителя;

2) решить аналогичные оптимизационные задачи для каждого из конкурирующих производителей, считая поведение всех остальных предприятий неизменным.

Далее следует повторять шаги (1—2) до тех пор, пока изменения оптимальных решений не станут относительно малыми, что будет свидетельствовать о приближении к состоянию игрового равновесия. Предполагается, что каждый игрок, принимая оптимальное на данном шаге решение, считает поведение своих соперников заданным и не предвидит их реакции, поэтому данную модель конкурентного рынка можно классифицировать как *олигополию Курно*.

### Пример применения предлагаемых моделей и методов

В качестве иллюстрации применения предлагаемого подхода, рассмотрим следующий упрощенный пример. Имеются три группы потенциальных заказчиков, характеристики которых приведены в табл. 1. Предположим для простоты иллюстративных расчетов, что скорость полета БПЛА в режиме патрулирования, их ресурс, а также постоянные затраты данного заказчика на организацию патрулирования с помощью БПЛА не зависят от типа используемых БПЛА и в большей степени определяются спецификой заказчика. Скорость полета определяется характером патрульных задач, составом бортового оборудования. Что касается ресурса, здесь считается, что гораздо вероятнее потеря БПЛА при столкновении с землей (вероятность которого также определяется, в основном, спецификой патрулируемого объекта и режима патрулирования), чем достижение предельных значений повреждаемости конструкции.

На рис. 1 наглядно представлены основные интегральные характеристики потенциальных заказчиков — значения требуемой полезной нагрузки  $G^i$  и значения параметра  $\sqrt{a^i}$ , который, как

Характеристики потенциальных заказчиков

Заказчик	A	B	C
Потребная полезная нагрузка, кг	55	10	20
Часовая ставка оплаты труда операторов БПЛА, долл./л.ч	100	20	30
Цена авиатоплива с доставкой, долл./т	1000	1000	1000
Постоянные затраты при использовании БПЛА, млн долл./год	15	10	11
Среднегодовой налет БПЛА, л.ч/год	1000	1500	1300
Средний ресурс БПЛА в режиме патрулирования, л.ч	500	1000	700
Скорость полета БПЛА в режиме патрулирования, л.ч	100	150	120
Коэффициенты, описывающие патрулируемый объект			
Длина патрулируемой магистрали, тысяч км	150	120	130
Средняя частота возникновения аварий, событий/(км·год)	0,004	1	0,5
Удельный ущерб от неустраненной аварии, долл./ч	4000	100	500
Среднее время устранения обнаруженной аварии, ч	12	24	18
Коэффициент $a$ , млрд (долл./год)·(км/год)	3,15	12,6	37,0
Коэффициент $b$ , млн долл./год	28,8	288	585
Параметры наилучшей альтернативы			
Стоимость летного часа, долл./л.ч.	1000	1000	1000
Постоянные затраты, млн долл./год	0	0	0
Средняя скорость полета, км/ч	100	150	120
Достижимый минимум целевой функции, млн долл./год	384	868	1696

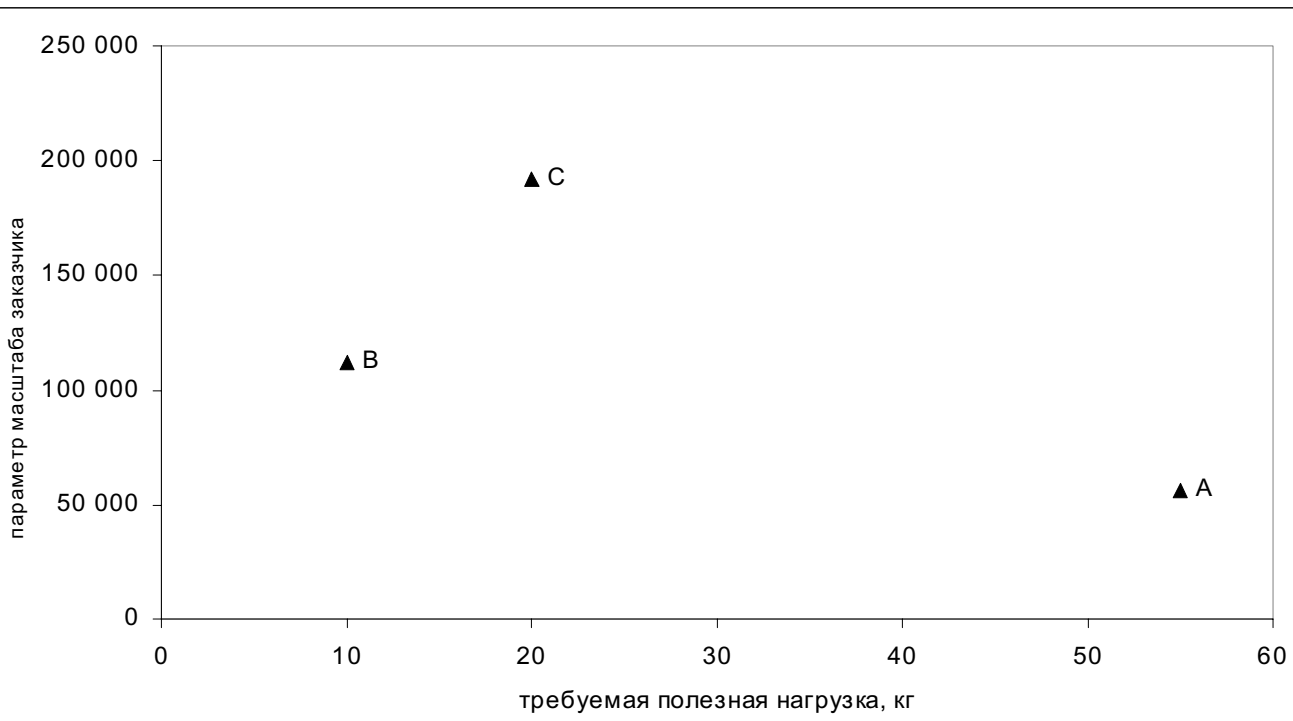


Рис. 1. Характеристики потенциальных заказчиков в пространстве «масштаб — требуемая полезная нагрузка»

было отмечено выше, характеризует масштаб данного заказчика и его возможную потребность в БПЛА (натуральную и стоимостную).

В данном примере требуемая заказчиком А полезная нагрузка существенно выше, чем для заказчиков В и С, которые по данному параметру отно-

нительно близки, поэтому заказчик А обособлен от прочих. При этом параметр масштаба «младшего» (по величине требуемой полезной нагрузки) заказчика В существенно ниже, чем у «старшего» заказчика С. Хотя в предлагаемой модели предусмотрено различие скорости полета и стоимости летного часа данной модели БПЛА в парках разных заказчиков, эти величины могут варьироваться, как правило, в пределах нескольких десятков процентов, тогда как параметры масштаба и требуемая полезная нагрузка для разных заказчиков могут различаться в несколько раз или даже на порядки. Поэтому именно этим показателям уделяется основное внимание.

В табл. 2 приведены технико-экономические параметры всех моделей БПЛА, которые в принципе могли бы быть разработаны и выпускаться данным предприятием для нужд заказчиков А—С.

Для упрощения примера предполагается, что технико-экономические параметры данного типа БПЛА не зависят от того, в парке какого заказчи-

В табл. 3 приведены параметры себестоимости всех моделей БПЛА, которые потенциально могут быть разработаны и выпускаться.

Предположим, что длительность периода продаж БПЛА  $\tau_j$  для всех моделей составляет 20 лет и на протяжении этого периода потребности потенциальных заказчиков не меняются. В качестве критерия оптимизации выступает суммарная прибыль данного производителя за весь жизненный цикл описанных моделей БПЛА. В табл. 4 приведены результаты решения этой оптимизационной задачи.

На рис. 2, помимо характеристик потенциальных заказчиков, приведенных на рис. 1, наглядно изображены параметры моделей БПЛА, которые оказалось целесообразным разрабатывать и выпускать: полезная нагрузка и цена (по вспомогательной оси ординат).

Масштаб заказчика В в данном примере существенно меньше, чем масштаб заказчика С. При этом модель, предназначенная для заказчика С, может удовлетворять и потребности заказчика В. В итоге оказалось целесообразным предложить заказчикам В и С унифицированную модель. Однако, если при прочих равных условиях параметр масштаба заказчика В существенно увеличится (например, если частота возникновения аварий возрастет до  $2 \text{ (год}\cdot\text{км)}^{-1}$ , а удельный ущерб от аварии — до 150 долл./ч, он возрастет почти вдвое, при неизменной длине патрулируемой трассы), уже станет выгодным разрабатывать и производить для него спе-

Таблица 2

**Технико-экономические параметры БПЛА**

Модель БПЛА	1	2	3
Допустимая полезная нагрузка, кг	60	12	25
Максимальная скорость полета, км/ч	200	180	170
Среднечасовой расход топлива, кг/л.ч	90	22	37
Среднечасовые затраты на ТОиР, долл./л.ч	20	10	15

**Себестоимость разработки и производства БПЛА**

Модель БПЛА	1	2	3
Общие постоянные затраты производителя БПЛА, млрд. долл.	2,0		
Постоянные затраты на НИОКР и ТПП, млн. долл.	1000	500	750
Удельные материальные затраты на 1 изделие, тысяч долл./ед.	100	25	50
Удельные трудозатраты на первое изделие, тысяч долл.	500	150	300
Темп обучения в процессе серийного производства	20%		

ка эксплуатируются эти изделия. Также предполагается, что проектные параметры всех моделей фиксированы. В данном примере фактически задача состоит в следующем. Необходимо определить, целесообразно ли выпускать специальные типы БПЛА для всех трех категорий потенциальных заказчиков, или выгоднее унифицировать модели, предназначенные для некоторых заказчиков. При этом для каждого возможного состава модельного ряда необходимо оптимизировать цены выпускаемых моделей БПЛА.

Таблица 3

Таблица 4

**Оптимальные цены БПЛА и показатели работы производителя**

Модель БПЛА	1	2	3
Оптимальная цена, тысяч долл./ед.	353	-	393
Суммарный объем выпуска за ЖЦИ	7400	0	28240
Суммарная прибыль за ЖЦИ, млрд. долл.	7,0		



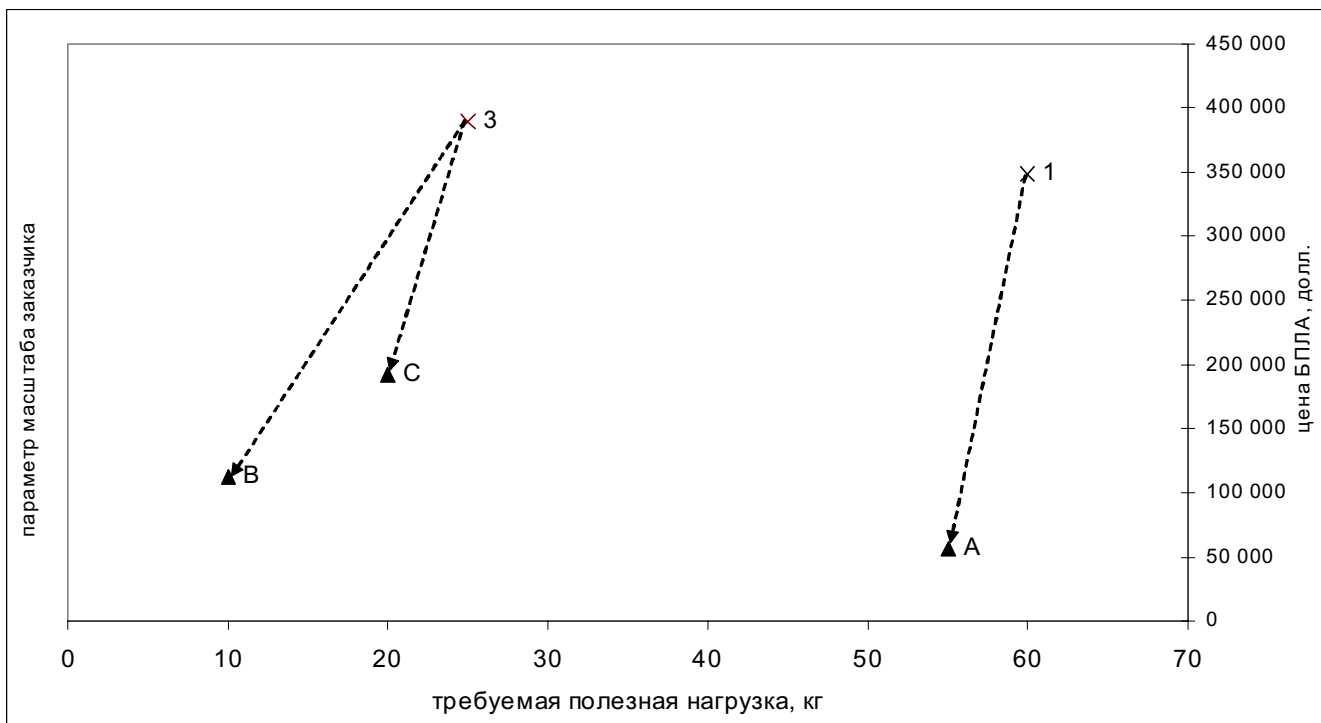


Рис. 2. Характеристики потенциальных заказчиков, оптимальный состав модельного ряда и оптимальные цены БПЛА

Таблица 5

**Оптимальные цены БПЛА и показатели работы производителя**

Модель БПЛА	1	2	3
Оптимальная цена, тысяч долл./ед.	353	412	393
Суммарный объем выпуска за ЖЦИ	7400	14720	19760
Суммарная прибыль за ЖЦИ, млрд. долл.	9,3		

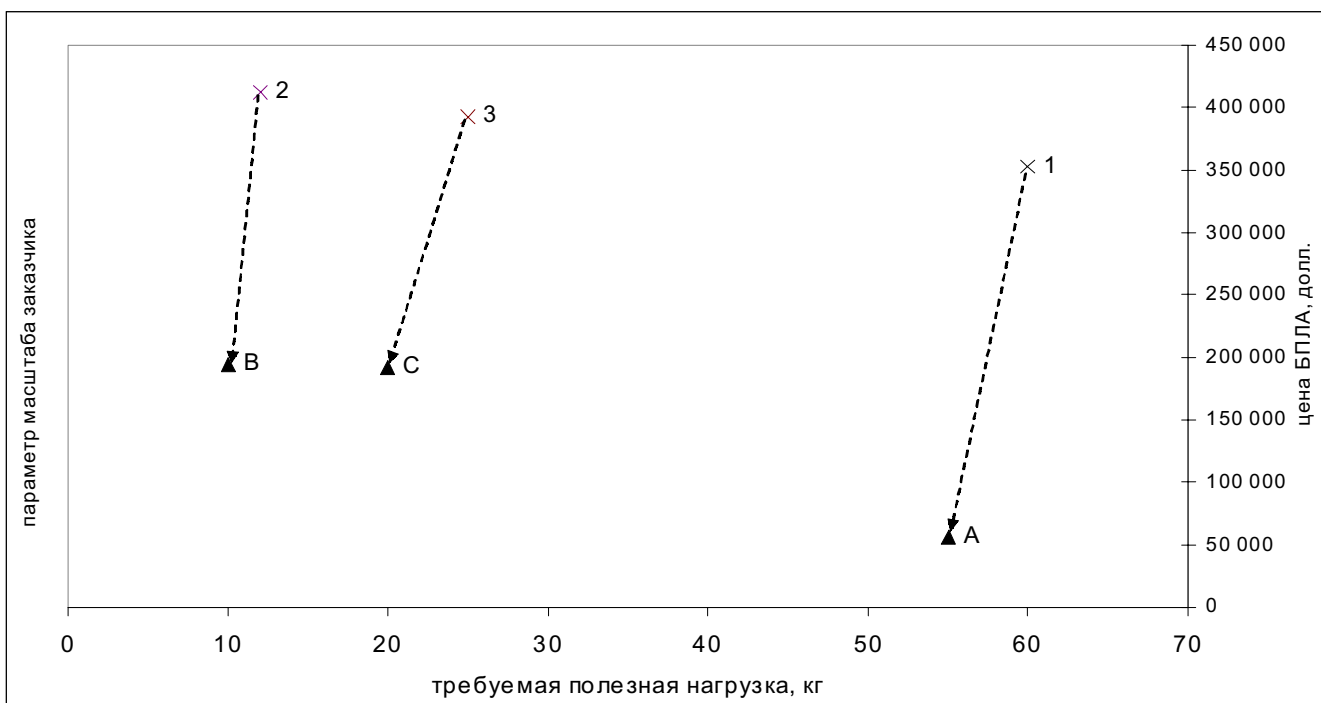


Рис. 3. Характеристики потенциальных заказчиков, оптимальный состав модельного ряда и оптимальные цены БПЛА

специализированную модель. Соответствующие результаты приведены в табл. 5 и на рис. 3, аналогичных табл. 4 и рис. 2.

Можно заметить, что в данном примере оптимальные цены меньших моделей оказались выше, чем более крупных. Это объясняется следующим образом. Цена БПЛА ограничивается, главным образом, параметрами наилучшей для данного заказчика альтернативы. Поскольку эти параметры для всех заказчиков принимались в табл. 1 одинаковыми (например, соответствующими вертолету), «запретительные» уровни стоимости летного часа для всех заказчиков также близки. В то же время эксплуатационные затраты более легких БПЛА ниже, и заказчики готовы заплатить за них больше. Разумеется, при наличии конкуренции на рынке БПЛА меньшие себестоимости более легких моделей обусловят их меньшие цены.

### Выводы

Разработана система экономико-математических моделей и методов оптимизации модельного ряда БПЛА патрульного назначения. С помощью предложенных методов выявлены следующие закономерности:

- целесообразность унификации моделей, предназначенных для разных заказчиков, повышается, если требования этих заказчиков к минимальной полезной нагрузке близки, и масштаб «младших» заказчиков не превосходит масштаба «старшего» заказчика;

- целесообразность разработки и производства специализированной модели, предназначенной для данного заказчика, повышается, если расход топлива такой модели и удельные материальные затраты на ее производство существенно ниже соответствующих показателей унифицированной модели.

Предлагаемый подход может использоваться при формировании модельного ряда перспективных ЛА, для которых отсутствует опыт массового выпуска и коммерческой эксплуатации.

### Библиографический список

1. *Калачанов В.Д., Турищева М.А.* Организация производства наукоёмкой продукции. — М.: Изд-во «Росавиакосмос», 2004.
2. *Калачанов В.Д., Кобко Л.И.* Экономическая эффективность внедрения информационных технологий: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 2006.
3. *Клочков В.В.* Прогнозирование спроса на продукцию авиационной промышленности в современных условиях // Проблемы прогнозирования. 2006. № 1. С. 71—86.
4. *Клочков В.В., Никитова А.К.* Методы прогнозирования спроса на беспилотные летательные аппараты и работы по воздушному патрулированию // Проблемы прогнозирования. 2007. № 6. С. 144—151.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 14.10.2009