

УДК 629.7.01

А.В. Приймак, К.В. Сюлев, И.А. Рыжук, А.В. Куприенко

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ ПОИСКА НАЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ

В работе приведены подходы к формированию математической модели применения беспилотных летательных аппаратов для решения задач поиска наземных объектов, сформулированы подходы к формированию ограниченной модели. Выполнен анализ результатов использования модели для выбора наилучших вариантов параметров и показателей беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, модель, эффективность, ограничения, типовая задача, выбор параметров.

Введение

Последние десятилетия в мире активно изучаются разные аспекты создания и применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) различного назначения. Столь высокий интерес к данному виду высокоинтеллектуальной научно-технической продукции объясняется недостатками существующих систем вооружения основным звеном которых является человек.

Логичность такого похода не вызывает сомнения, более того, уже сегодняшний уровень развития науки и технологий позволяет решать ряд сопутствующих проблем, которые могут быть рассмотрены со следующих позиций, а именно:

1. С позиции развития интегрированных информационных компьютерных технологий, позволивших снять ряд проблем, касающихся вопросов навигации и передачи данных в реальном масштабе времени.

2. С позиции развития технологий миниатюризации существующей элементарной базы, позволивших существенно снизить массу полезной нагрузки и оборудования без ухудшения качества выполнения боевых задач и тактико-технических характеристик существующих образцов.

3. С позиции накопления опыта создания и применения БПЛА во многих локальных конфликтах и войнах (Вьетнам, Ближний Восток, Балканы, Афганистан и др.), что позволило четко уяснить перспективы и возможности применения БПЛА в составе воинских подразделений и в интересах заказчиков различного уровня ответственности.

Благодаря развитию информационных технологий и успехам миниатюризации все большее количество стран начинают вести свои разработки БПЛА. И Украина не является исключением. За последние годы различными предприятиями, научно-исследовательскими организациями создано целый ряд БПЛА в составе мобильных авиационных ком-

плексов, проведено большое количество исследований в этой области, разработано ряд концепций применения данного вида авиационной техники в составе Вооруженных Сил, других министерств и ведомств. Результаты же, полученные в процессе этой деятельности более чем скромные, что является прямым следствием отсутствия четкой позиции заказчика к соответствующей проблеме, его недоверия к возможностям отечественного научно-промышленного комплекса.

Анализ литературы. Отсутствие государственного заказа на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а следовательно, необходимость использования собственных средств при создании беспилотных комплексов без четких гарантий получить прибыль хотя бы в будущем, вынуждает разработчиков и производителей отказываться от выполнения наукоемких исследований в данной области. В большинстве своем используется опыт создания и применения уже существующих образцов. Этим, скорее всего, и объясняется то количество информации, например [1 – 4], которое сегодня присутствует в средствах массовой информации и носит общий характер. Что же касается серьезных публикаций по вопросам создания и применения БПЛА, то здесь ощущается некоторый вакуум. Рассматриваются, как правило, лишь частные вопросы устройства, функционирования и применения БПЛА. Примером этому являются работы [5, 6]. Впрочем в последние несколько лет вышло ряд изданий, в которых делается попытка обобщить опыт теоретических и практических наработок в этом направлении. Так, в работах [7, 8] рассмотрены методологические основы создания и развития современных беспилотных комплексов, сформированы общие методики оценки характеристик и сравнительной оценки анализа БПЛА различного назначения. Здесь же отмечена исключительная важность применения системного подхода на ранних стадиях создания беспилотных комплексов и оценки пер-

спектив их развития, что подразумевает создание, как частных, так и общих моделей, увязывающих в себе различные параметры и характеристики объекта.

В связи с этим была сформулирована **цель данной работы** – рассмотрение результатов формирования и реализации частной математической модели применения БПЛА при решении задач поиска наземных объектов, позволяющей увязать их основные тактико-технические, конструктивные характеристики и характеристики полезной нагрузки.

Основной материал

При формировании модели применения БПЛА использовались классические подходы, позволяющие рассматривать решение задачи поиска, как многоэтапный процесс, включающий: подготовку БПЛА к полету; запуск и полет к цели; доставку информации к потребителю, а также учитывающий ряд свойств, таких как: надежность функционирования систем БПЛА в полете; надежность выявления и распознавания цели; защищенность БПЛА от воздействия средств поражения противника, количественные значения которых задаются заказчиком уже на этапах отработки оперативно-тактических и тактико-технических требований. В этом случае и при условии независимости событий благополучной реализации этапов полета и обеспечения заданных свойств, оценка эффективности применения БПЛА может быть представлена в виде произведения вероятностей

$$W_p = W_{св} W_{вых} W_B W_p W_d W_{ПВО} W_H, \quad (1)$$

где W_p – вероятность выполнения задачи; $W_{св}$ – вероятность своевременного вылета; $W_{вых}$ – вероятность точного выхода БПЛА в район цели; W_B , W_p – вероятности выявления и распознавания цели; W_d – вероятность доставки разведывательной информации заказнику; $W_{ПВО}$ – вероятность преодоления БПЛА системы противовоздушной обороны (средств поражения) противника; W_H – вероятность надлежащего функционирования систем БПЛА в полете.

Учет экономического аспекта применения БПЛА для решения типовой задачи поиска наземной цели обеспечивает переход от (1) к критерию «эффективность-стоимость», который по сегодняшний день активно используется для решения задач связанных с принятием решений на этапах создания БПЛА, оценки эффективности, сравнительной оценки образцов и др.

Рассматривая составляющие эффективности применения БПЛА особое внимание следует уделить выявлению и распознаванию цели. Методы оценки искомых вероятностей W_B и W_p достаточно

полно расписаны в специальной литературе по эффективности применения летательных аппаратов, тем не менее, вызывает повышенный интерес формирование алгоритмов их расчета как функций от основных тактико-технических параметров (по классификации [9]) и характеристик полезной нагрузки. От полноты учета связей между соответствующими параметрами и характеристиками во многом зависит качество модели, а следовательно и ее исследовательские возможности. Модель также может быть дополнена конструктивными параметрами. Для этого предлагается использовать уравнение существования летательного аппарата в виде:

$$1 = \bar{m}_{кон} + \bar{m}_{cy} + \bar{m}_{об.упр} + \bar{m}_T + \bar{m}_{п.н}, \quad (2)$$

где $\bar{m}_i = m_i / m_0$ – относительная масса i -го элемента массы БПЛА; m_0 – взлетная масса БПЛА; $\bar{m}_{кон}$ – относительная масса конструкции БПЛА; \bar{m}_{cy} – относительная масса силовой установки; $\bar{m}_{об.упр}$ – относительная масса оборудования и управления; \bar{m}_T – относительная масса топлива; $\bar{m}_{п.н}$ – относительная масса полезной нагрузки.

Представив данное уравнение через массу ($\bar{m}_{пуст}$) пустого БПЛА:

$$1 - \bar{m}_{пуст} = \bar{m}_T + \bar{m}_{п.н}, \quad (3)$$

а также заменив m_0 ее оценкой в виде $\hat{m}_0 = \beta_0 + \beta_{m_0}(V, H, L(t_p))$ можно сформулировать ограничение модели вида:

$$1 - \bar{m}_{пуст} - \bar{m}_{п.н} - (\bar{b}_1 V_{кр} + \bar{b}_2 H + \bar{b}_3 L(t_p)) = 0, \quad (4)$$

где $\bar{b}_i = \frac{b_i}{m_0}$ – относительные значения коэффициентов регрессии b_i ; $V_{кр}$ – крейсерская скорость полета БПЛА; H – высота полета; $L(t_p)$ – дальность (продолжительность) полета БПЛА.

В дальнейшем выбор вариантов основных параметров может осуществляться путем решения следующей оптимизационной задачи:

Необходимо определить

$$\max_{k_{1..n} \in K} \frac{W_{p_j}}{C_j}, \quad (5)$$

при ограничениях

$$1 - \bar{m}_{пуст} - \bar{m}_{п.н} - (\bar{b}_1 V_{кр} + \bar{b}_2 H + \bar{b}_3 L(t_p)) = 0; \\ V_{кр}^H \leq V_{кр} \leq V_{кр}^B; H^H \leq H \leq H^B; t_p^H \leq t_p \leq t_p^B; \\ \bar{m}_{пуст} > 0; \bar{m}_{к.н} > 0. \quad (6)$$

В модели символами «н» и «в» обозначены соответствующие границы изменения параметров,

$k_1 \dots k_n$ – комбинации факторов, принадлежащих факторному пространству K ; C_j – стоимость применения БПЛА для j -й точки факторного пространства K . Последняя с точностью 15 – 20% в пределах изменения m_0 от 100 до 1100 кг может быть определена зависимостью

$$C_{\text{выл}} = -0,0768 (\ln m_0)^2 + 1,4462 \ln m_0 - 4,9961,$$

полученной путем обработки статистических данных стоимостей применения БПЛА различных классов.

Для определения количественных значений ограничений оптимизационной модели (6) применялись статистические и расчетные методы. Так, в случае полной информационной неопределенности задачи, установлена целесообразность использования баз характеристик БПЛА, по результатам обработки данных которых были получены диапазоны возможного изменения $V_{\text{кр}}$, H (рис. 1) и $L(t_p)$ (рис. 2) для конкретных классов летательных аппаратов, оснащенных соответствующим типом силовой установки (СУ).

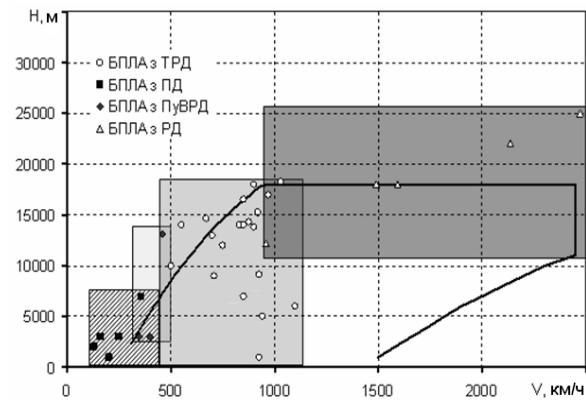


Рис. 1. Диапазон высот и скоростей применения БПЛА с типами СУ

(с ТРД – турбореактивными двигателями; ПД – поршневыми двигателями; ПуВРД – пульсирующими воздушными реактивными двигателями; РД – ракетными двигателями)

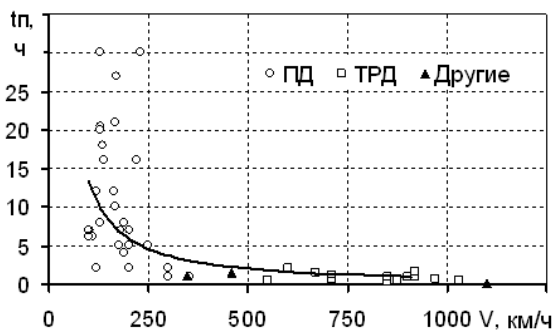


Рис. 2. Изменение продолжительности полета БПЛА

Подобным же образом поступали и при определении средних значений относительных масс $\bar{m}_{\text{пуст}}$ и $\bar{m}_{\text{п.н}}$ для БПЛА соответствующего класса. На рис. 3 а и б представлены результаты анализа статистики изменения данных показателей в зависимости от взлетной массы БПЛА.

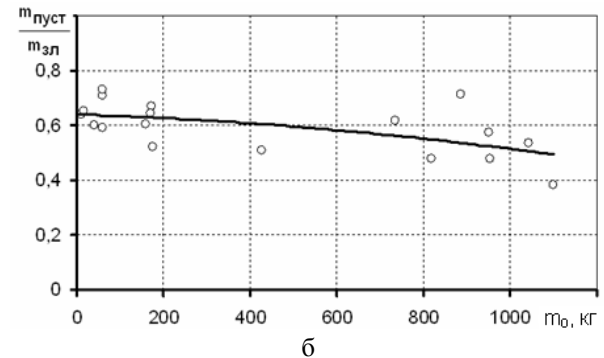
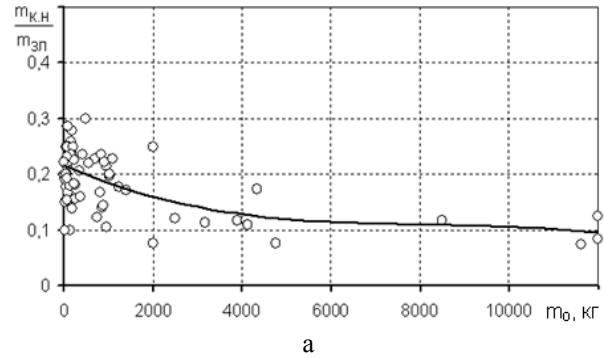


Рис. 3. Изменение значений относительных масс

Из анализа представленных зависимостей становится очевидным следующее:

1. Имеется место четкое разделение диапазона высот и скоростей для БПЛА с разными типами СУ, основными из которых сегодня являются СУ с ТРД – до 20% БПЛА, и СУ с ПД – до 70% БПЛА. При этом следует учитывать, что скоростной диапазон применения БПЛА с ТРД является более широким и составляет 500 – 1100 км/ч по сравнению с БПЛА с ПД, для которых значения скоростей лежат в пределах 100 – 400 км/ч. То же касается и высотности, которая для БПЛА с ТРД составляет около 18000 м. В то же время для БПЛА с ПД она лежит в пределах 3000 – 4000 м (6000-8000 м для ПД с наддувом).

2. Продолжительность полета традиционно ниже для БПЛА с ТРД ввиду более низкой экономичности данного типа двигателей, что подтверждается статистикой. Так, продолжительность полета БПЛА с ТРД составляет в среднем 0,5 – 2,0 часа (иногда до 6), в то время как данный показатель для БПЛА с ПД может достигать до 30 часов.

3. Зависимость относительной массы полезной нагрузки от класса БПЛА. Так, для тактических БПЛА и БПЛА поля боя с радиусом действия до 150 км данный показатель составляет: 0,15 – 0,3, для оперативно-тактических БПЛА с тактическим ради-

усом действия от 200 до 1000 км: 0,16 – 0,24, и для оперативно-тактических и стратегических БПЛА большой дальности и длительности полета этот показатель находится в пределах 0,08 – 0,12. Постоянное уменьшение относительной массы полезной нагрузки объясняется потребностью увеличения массы топлива для обеспечения соответствующих тактико-технических показателей БПЛА.

С другой стороны, следует также учитывать развитие технологий в области минитоаризации оборудования.

4. Снижение относительной массы конструкции в среднем от 0,63 до 0,5 не столь сильно зависит

от класса БПЛА. Приоритетным здесь является применение в конструкции летательных аппаратов современных авиационных материалов.

Исследование предложенной модели выполнялось с использованием специально разработанного для этого расчетного модуля. Моделировалось выполнение типовой задачи закономерного поиска неподвижного объекта.

Результаты моделирования для случая отработки требований к БПЛА при фиксированном значении относительной массы $\bar{m}_{пуст} = 0,6$ для СУ с ТРД и $\bar{m}_{пуст} = 0,5$ для СУ с ПД представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты выполнения расчетов для БПЛА с ТРД
($500 \text{ км/ч} \leq V_{кр} \leq 1200 \text{ км/ч}$; $100 \text{ м} \leq H \leq 4000 \text{ м}$; $t_{п} \leq 6 \text{ ч}$)

Злітна маса, кг (вартість, млн.\$)	$\bar{m}_{пуст}$	$\bar{m}_{п.н}$	$V_{кр}$, км/ч	H, м	$t_{п}$, ч	$W_p / C_{ввл}$
400 (0,912)	0,6	0,16	860	2460	6,00	0,4593
600 (1,112)	0,6	0,16	995	2590	6,00	0,5119
800 (1,24)	0,6	0,16	1125	2835	6,00	0,6339
1000 (1,33)	0,6	0,16	896	3900	5,75	0,6391
1200 (1,397)	0,6	0,18	920	3900	5,59	0,6081
1400 (1,45)	0,6	0,20	980	3900	5,26	0,5858

Таблица 2

Результаты выполнения расчетов для БПЛА с ПД
($m_0 = 600 \text{ кг}$; $100 \text{ км/ч} \leq V_{кр} \leq 400 \text{ км/ч}$; $100 \text{ м} \leq H \leq 4000 \text{ м}$; $t_{п} \leq 6 \text{ ч}$)

$\bar{m}_{пуст}$	$\bar{m}_{п.н}$	$V_{кр}$, км/ч	H, м	$t_{п}$, ч	$W_p / C_{ввл}$
0,5	0,14	373	3900	6,00	0,6491
	0,16	400	3900	5,92	0,7059
	0,18	400	3900	5,57	0,6429
	0,20	400	3300	5,21	0,5810
	0,22	400	3300	4,85	0,5203

Анализируя полученные результаты, следует отметить принципиально отличное влияние ограничений математической модели применения БПЛА с ТРД и ПД на эффективность их применения. Ввиду более жестких ограничений по высоте и скорости полета для БПЛА с ПД для обеспечения требуемой эффективности приоритетными являются изменение $t_{п}$, а также мероприятия направленные на снижение массы планера $\bar{m}_{пуст}$ и полезной нагрузки $\bar{m}_{п.н}$. Для БПЛА с ТРД критичным является время нахождения в воздухе, снижение которого может быть компенсировано, в первую очередь, за счет увеличения $V_{кр}$ и H.

Весовые ресурсы конструкции могут быть существенно улучшены за счет применения инновационных технологий, как в процессе конструирования планера и силовой установки БПЛА, так и при создании полезной нагрузки. Это позволит обеспечить требуемые тактико-технические характеристики БПЛА, а также повысить запас топлива. Это утвер-

ждение хорошо демонстрируется результатами расчетов, которые представлены в табл. 3, а также опытом создания БПЛА типа «ПРЕДЕЙТОР» (данные представлены для

$$V_{кр} = 400 \text{ км/ч}; H = 8000 \text{ м}; t_{п} = 6 \text{ ч}.$$

Выводы

1. Создаваемые сегодня беспилотные авиационные комплексы являются новыми и высокоперспективными системами вооружения требующими развития научно-методического аппарата создания и эффективного использования при решении задач по назначению.

2. Анализируя состояние дел в области создания отечественных беспилотных комплексов в целом и БПЛА различного назначения в частности, становится очевидным необходимость создания инструментов позволяющих обосновывать принятие решений уже на этапе их концептуального проектирования.

3. Одним из наиболее востребованных инструментов, позволяющих выполнять исследование влияния различных конструктивных решений на процесс применения БПЛА, исследование свя-

зей между параметрами БПЛА и взаимосвязей между ними, сравнительной оценки БПЛА, является использование частных моделей их применения.

Таблица 3

Влияние конструктивных параметров на эффективность применения БПЛА

m_0 , кг	$\bar{m}_{пуст}$	$\bar{m}_{п.н}$	Силовая установка с ТРД		Силовая установка с ПД	
			W_p	$W_p / C_{выл}$	W_p	$W_p / C_{выл}$
600	0,6	0,16	0,6699	0,5119	0,1529	0,1169
		0,14	0,7982	0,6099	0,1767	0,1350
		0,12	0,9349	0,7144	0,2023	0,1546
	0,5	0,16	0,8965	0,6850	0,2865	0,2189
		0,14	0,6698	0,5118	0,3167	0,2420
		0,12	0,6252	0,4777	0,3479	0,2659

4. Разработка частных моделей применения БПЛА различного назначения является этапом создания более общих имитационных моделей, способных решать более глобальные исследовательские задачи.

5. В работе получены предварительные результаты исследования частной математической модели, позволившей увязать основные тактико-технические, конструктивные параметры и показатели БПЛА при моделировании их применения для решения типовых задач поиска наземных целей.

Список литературы

1. Ростопчин В.В. Беспилотные авиационные системы / В.В. Ростопчин, С.С. Румянцев [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.avia.ru>.
2. Павлушенко М.И. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития. Научные записки ПИР-центра / М.И. Павлушенко, Г.М. Евстафьев, И.К. Макаренко // Научные записки ПИР-центра. – М.: Права человека, 2005. – 2(26). – 610 с.
3. Лукашев Э.П. «Новые» или миниДПЛА / Э.П. Лукашев, Н.В. Чистяков [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://dpla.ru/PortretEla.htm>. – Заголовок з екрану.
4. Беляев В.В. Война в воздухе. Новая угроза. Современные зарубежные БПЛА и перспективы их развития. «Хищник» выходит на охоту / В.В. Беляев // Авиация и космонавтика. – М.: 2005. – № 1. – С. 12-21.

5. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования. / [П.П. Афанасьев, И.С. Голубев, В.Н. Новиков и др.]; под ред. И.С. Голубева и И.К. Туркина. – Издание второе, переработанное и дополненное. – М.: 2008. – 656 с.

6. Артюшин Л.М. Методичний підхід до вирішення завдань відмовостійкого автоматичного керування груповим польотом безпілотних літальних апаратів / Л.М. Артюшин // Системи озброєння і військової техніки: наук. ж. – Х.: ХУ ПС, 2005. – № 1(1). – С. 3-10.

7. Беспилотные летательные аппараты: Методика приближенных расчетов основных параметров и характеристик / [В.М. Илюшко, М.М. Митрахович, А.В. Самков и др.]; под общ. ред. В.И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2009. – 302 с.

8. Беспилотные авиационные комплексы: Методика сравнительной оценки боевых возможностей / [М.М. Митрахович, В.И. Силков, А.В. Самков и др.]. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. – 288 с.

9. Проектирование самолетов / под ред. С.М. Егера. – М.: Машиностроение, 1983. – 616 с.

Поступила в редколлегию 14.02.2013

Рецензент: канд. техн. наук, проф. Ю.И. Миргород, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИБОРУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ТИПОВИХ ЗАВДАНЬ ПОШУКУ НАЗЕМНИХ ЦІЛЕЙ

А.В. Приймак, К.В. Сюлев, І.О. Рижук, О.В. Купрієнко

У роботі приведені підходи до формування математичною моделю застосування безпілотних літальних апаратів для вирішення завдань пошуку наземних об'єктів, сформульовані підходи до формування обмежень моделі. Виконаний аналіз результатів використання моделі для вибору якнайкращих варіантів параметрів і показників безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, модель, ефективність, обмеження, типове завдання, вибір параметрів.

MATHEMATICAL MODEL OF CHOICE OF BASIC PARAMETERS OF BESPILOTNOGO AIRCRAFT FOR DECISION OF MODEL TASKS OF SEARCH OF SURFACE AIMS

A.V. Priymak, K.V. Syulev, I.A. Ryzhuk, A.V. Kuprienko

In work, going is resulted near forming mathematical model of application of pilotless aircrafts for decision of tasks of search of surface objects, going is formulated near forming of limitations of model. The analysis of results of the use of model is executed for the choice of the best variants of parameters and indexes of pilotless aircrafts.

Keywords: pilotless aircrafts, model, efficiency, limitations, model task, choice of parameters.