

УДК 629.735.-519:629.7.018.7

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИСТАНЦИИ РАЗГОНА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ЗАПУСКЕ С РУКИ

*В.И. Сяхович, А.А. Щавлев, П.П. Якишонок*

*Физико-технический институт НАН Беларуси,  
научно-производственный центр «БАК и технологии»*

Этап запуска беспилотного летательного аппарата (БЛА) с руки является ответственной операцией, позволяющей своевременно выполнить поставленную задачу и обеспечить сохранность БЛА. Определяющим фактором безопасного запуска БЛА с руки является его дистанция разгона, которая зависит от аэродинамической схемы БЛА, располагаемой мощности силовой установки и скорости ветра. Под дистанцией разгона при запуске с руки будем понимать расстояние, пролетаемое БЛА до приобретения скорости взлета.

Расчет дистанции разгона произведем в следующей последовательности:

- расчет располагаемой мощности силовой установки БЛА;
- расчет дистанции разгона в зависимости от массы БЛА и скорости ветра;
- обработка телеметрических данных безопасного взлета БЛА при запуске с руки для определения дистанции разгона;
- определение области безопасного взлета БЛА при запуске с руки в зависимости от массы БЛА и скорости ветра.

## 1 Расчет располагаемой мощности силовой установки БЛА

Летно-технические характеристики БЛА в первую очередь определяются располагаемой мощностью. Для определения располагаемой мощности используются следующие исходные данные:

$N$  – максимальная мощность одного двигателя ( $N = 1400$  Вт);

$i$  – количество двигателей БЛА;

$P_{ст}$  – стендовая тяга двигателя  $P_{ст} = 35$  Н;

$d$  – диаметр двухлопастного винта ( $d = 12$  дюймов = 0,305 м).

Для расчета располагаемой мощности воспользуемся упрощенным методом [1], по которому в системе СИ отношение

$$\frac{P}{N_1} = 1,242 \left( \frac{N_1}{d^2} \right)^{-0,333} \exp \left( -0,6076 \left( \frac{N_1}{d^2} \right)^{-0,3632} V \right) \frac{H}{Bm}, \quad (1)$$

где  $N_1 = 0,9N = 1260$  Вт, а коэффициент 0,9 учитывает установочные потери.

Дальнейший расчет произведен по следующему алгоритму:

- используя полученное значение отношения (1) определяем значение тяги одного двигателя по формуле  $P = (P/N_1) \cdot N_1 = 0,052 \cdot 1260 = 65,5$  Н;
- определяем тягу одного двигателя с учетом коэффициента отличия реального винта от идеального ( $k = 0,8$ ) для скорости  $V = 0$  по формуле  $P_0 = 0,8P = 0,8 \cdot 65,5 = 52$  Н;
- определяем расчетный коэффициент  $k_p$  как отношение стендовой тяги к тяге двигателя  $k_p = P_{ст}/P_0 = 35/52 = 0,673$ ;
- определяем располагаемую тягу двигателя  $P_p = P_0 \cdot k_p = 52 \cdot 0,673 = 35$  Н;
- аналогичные операции выполняются для других значений скоростей полета.

Результаты расчетов приведены в табл. 1 для взлетного режима работы двигателя. График, построенный по результатам расчетов, приведен на рис. 1.

## 2 Расчет дистанции разгона

Расчет произведем для условий стандартной атмосферы. Для расчета на взлете принимаем: коэффициент лобового сопротивления  $C_x = const$ ,  $m$  – масса БЛА, а тяга винта  $P$  определяется по формуле

Табл. 1

$N_{\text{взл}} = 1400 \text{ Вт}, d = 0,305 \text{ м}$											
V, м/с	–	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
V, км/ч	–	36	54	72	90	108	126	144	162	180	198
P/N1, Н/Вт	0,052	0,043	0,039	0,035	0,032	0,029	0,026	0,024	0,022	0,020	0,018
Pp, Н	35	29	26	24	22	20	18	16	15	13	12
Np, Вт	–	288	393	476	541	590	625	649	663	670	669

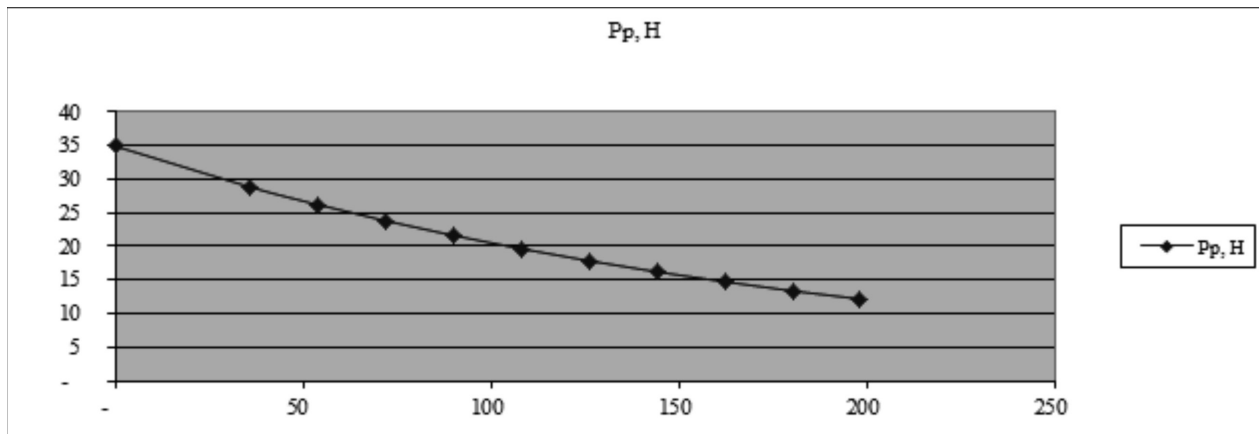


Рис. 1. График зависимости  $P_p = f(V)$

$$P = i \cdot P_{0,7} \cdot \cos \alpha = 2 \cdot 28 \cdot \cos 10^\circ = 55 \text{ Н}, \quad (2)$$

где  $P_{0,7}$  — тяга одного двигателя на  $V = 0,7V_{\text{взл}}$ , ( $P_{0,7} = 28 \text{ Н}$ );

$i$  — число двигателей БЛА ( $i = 2$ );

$\alpha$  — наиболее выгодный угол атаки при взлете ( $\alpha = 10^\circ$ ).

Длину дистанции разгона БЛА  $L_{\text{разг}}$  для взлета в штатных условиях можно определить по приближенной формуле

$$L_{\text{разг}} = \frac{V_{\text{взл}}^2}{2g \left( \frac{P_{\text{ср}}}{mg} - f - \frac{(C_x - fC_y)_{\text{см}}}{2C_{\text{yотп}}} \right)}. \quad (3)$$

Для БЛА при запуске с руки коэффициент индуктивного сопротивления  $f = 0$ . Тогда получаем

$$L_{\text{разг}} = \frac{V_{\text{взл}}^2}{\frac{2P_{\text{ср}}}{m} - \frac{C_x \times g}{C_y}}, \quad (4)$$

где  $V_{\text{взл}}$  — скорость взлета БЛА при запуске с руки.

При наличии ветра  $V_{\text{взл}} = V \pm U$ , где  $U$  — скорость ветра.

При наличии ветра будем иметь

$$L_{\text{разг}} = \frac{(V \pm U)^2}{\frac{2P_{\text{ср}}}{m} - \frac{C_x \times g}{C_y}}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{ср}}$  — тяга силовой установки (тяга двух двигателей  $P_{\text{ср}} = 55 \text{ Н}$ );

$C_x, C_y$  — аэродинамические коэффициенты ( $C_x = 0,0841, C_y = 0,84$  при принятом угле атаки при отрыве  $\alpha = 10^\circ$ ).

Результаты расчетов дистанции разгона  $L_{\text{разг}}$  по формуле (5) в зависимости от массы БЛА ( $m$ ) и скорости ( $U$ ) встречного ветра приведены в табл. 2, а графики этих зависимостей на рис. 2.

Проверка расчетов другим способом — с использованием баланса сил (согласно второму закону Ньютона  $m \frac{dV}{dt} = P - \frac{1}{2} C_x S \rho V^2$ ) показала

хорошую сходимость результатов (относительные погрешности не превышают 10%), что свидетельствует о высокой достоверности результатов.

### 3 Обработка телеметрических данных безопасного взлета БЛА при запуске с руки

В табл. 3 приведены следующие данные телеметрических измерений пяти удачных запусков с руки БЛА массой 7,3 кг, где

Табл. 2

$m$ , кг	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	
$V$ , м/с	12,00	12,49	12,96	13,42	13,86	14,29	14,70	15,10	15,50	
$L_{разг}$ , м	при $U = 0$ м/с	8,30	9,79	11,41	13,16	15,04	17,07	19,22	21,52	23,97
	при $U = 2$ м/с	5,77	6,91	8,16	9,53	11,02	12,62	14,35	16,20	18,18
	при $U = 4$ м/с	3,69	4,52	5,45	6,48	7,61	8,85	10,19	11,63	13,19
	при $U = 6$ м/с	2,08	2,64	3,29	4,02	4,84	5,74	6,73	7,82	9,00
	при $U = 8$ м/с	0,92	1,27	1,67	2,15	2,69	3,30	3,99	4,76	5,61
	при $U = 10$ м/с	0,23	0,39	0,60	0,85	1,17	1,54	1,97	2,46	3,01

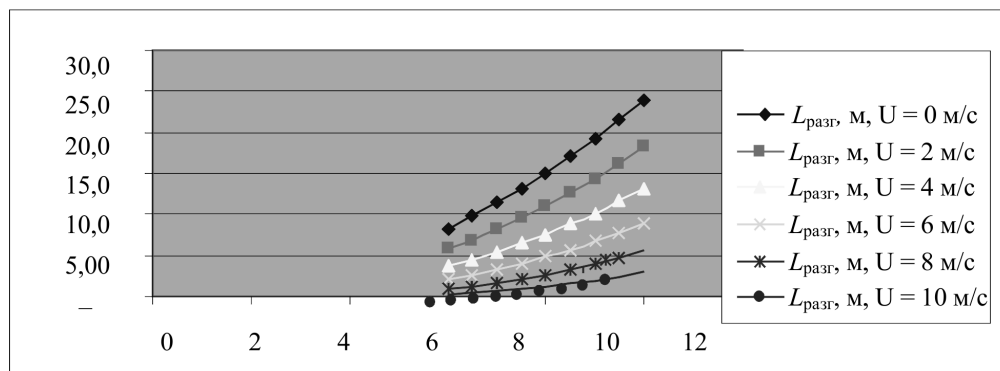


Рис. 2.  $L_{разг} = f(m, U)$

Табл. 3

$n_j$	$U$ , м/с	$V_t = 0$ , м/с	$W_t = 0$ , м/с	$V_t = 0,5c$ , м/с	$W_t = 0,5c$ , м/с	$V_t = 1c$ , м/с	$W_t = 1c$ , м/с	$V_t = 1,5c$ , м/с	$W_t = 1,5c$ , м/с	$V_t = 2c$ , м/с	$W_t = 2c$ , м/с	$L_{разг}$ , м
1	3	3	0	9	6	13,5	10,5	14,5	11,5	-	-	5,4
2	2	2	0	6	4	9,5	7,5	13	11	-	-	7,3
3,8	3	3	0	7	4	11	8	13	10	-	-	7,2
1,8	2	2	0	7	5	9	7	11	9	12	10	10,7
2,1	3,5	3,5	0	7	3,5	9	5,5	11	7,5	12,5	9	9,3

$n_j$  — перегрузка;

$U$ , м/с — скорость встречного ветра;

$V_p$ , м/с — воздушная скорость;

$W_p$ , м/с — путевая скорость.

По этим данным вычислены путевые скорости во времени разгона и дистанции разгона для приведенных случаев.

В результате статистической обработки результатов наблюдения дистанций разгона (табл. 3) получаем:

– оценка математического ожидания дистанции разгона  $\tilde{L}_{разг} = 7,98$  м;

– среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 2,05$  м.

За безопасную дистанцию разгона принимаем сумму

$$L_{безоп.} = 7,98 + 2,05 = 10,03 \approx 10 \text{ м.}$$

Данные телеметрии свидетельствуют, что импульс силы броска ( $n_j$ ) не оказывает существенного влияния на дистанцию разгона, так как этот импульс весьма кратковременный и не всегда направлен по траектории взлета, в особенности, если взлетная масса БЛА  $m > 5$  кг.

Из приведенных расчетов видно, что запуск БЛА с руки в штилевых условиях при данной

располагаемой мощности двигателей может быть безопасным только при взлетной массе  $m \leq 6,5$  кг. Для БЛА с большей массой необходимо увеличить мощность силовой установки.

#### 4 Определение области безопасного взлета БЛА при запуске с руки в зависимости от массы БЛА и скорости ветра

Для практического использования приведенных расчетов по определению безопасного запуска БЛА с руки в зависимости от массы БЛА ( $m$ ) и скорости ветра ( $U$ ) приведем область разрешения взлета для БЛА с силовой установкой — два двигателя по  $N = 1400$  Вт, используя для этого данные табл. 2. Расчеты произведем в следующей последовательности:

– по данным табл. 2 для каждой из скоростей ветра (0, 2, ..., 10 м/с) определяем взлетную ско-

рость при дистанции разгона  $L_{\text{разг}} = 10$  м, которые заносим в табл. 4;

– подставляя в формулу (5) безопасную дистанцию разгона ( $L_{\text{разг}} = 10$  м) и величину тяги используемых силовых установок, определяем допустимые массы БЛА для безопасного взлета, которые заносим в табл. 4;

– по данным табл. 4 в среде Mathcad определяем зависимость  $m_{\text{доп}} = f(U)$  и строим область разрешения взлета в зависимости от соотношений массы и скорости ветра.

Область разрешения взлета и зависимость  $m_{\text{доп}} = f(U)$  представлена на рис. 3.

В связи с тем, что масса БЛА является более стабильной величиной и может быть измерена в стационарных условиях при подготовке полета, а скорость ветра может изменяться во времени в больших пределах, целесообразно иметь обратную зависимость  $U_{\text{доп}} = f(m)$ , которая представлена на рис. 4.

Табл. 4.

Результаты определения взлетной скорости и допустимой массы БЛА с двумя силовыми установками по  $N = 1400$  Вт

$U$ , м/с	0	2	4	6	8	10
$V$ , м/с	12,53	13,49	14,72	15,99	17,98	19,81
$m$ , кг	6,594	7,750	8,826	10,0	10,04	10,0

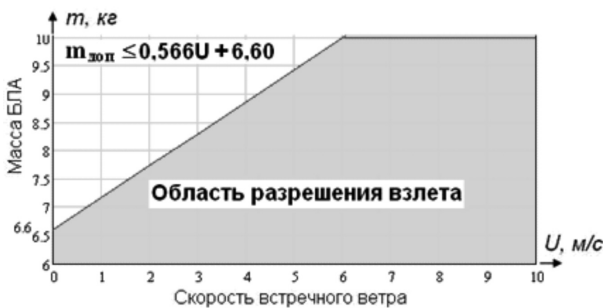


Рис. 3. Область разрешения безопасного взлета и определения допустимой массы БЛА в зависимости от скорости ветра

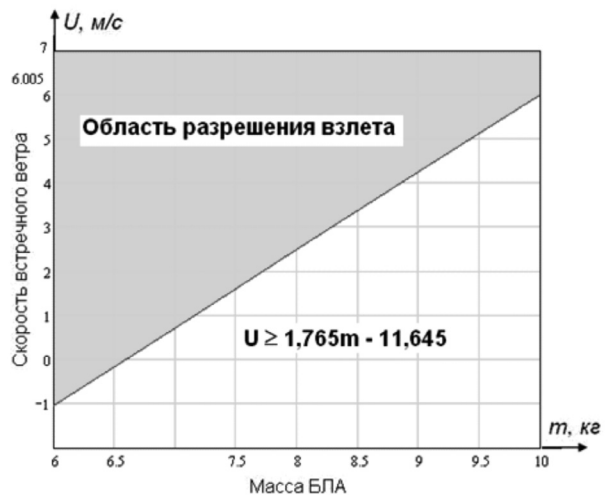


Рис. 4. Область разрешения безопасного взлета и определения достаточной скорости ветра в зависимости от массы БЛА

#### Литература

1. Бочкарев, А.Ф. Аэромеханика самолета / А.Ф. Бочкарев. — М.: Машиностроение, 1977.